

MODELO PARA EVALUAR LA EROSION HIDRICA EN COLOMBIA UTILIZANDO
SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

SANDRA JANETH PEREZ GALLARDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA, D.C.

2001

MODELO PARA EVALUAR LA EROSION HIDRICA EN COLOMBIA UTILIZANDO
SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

SANDRA JANETH PEREZ GALLARDO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA, D.C.

2001

MODELO PARA EVALUAR LA EROSION HIDRICA EN COLOMBIA UTILIZANDO
SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

SANDRA JANETH PEREZ GALLARDO

Tesis de grado para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental

Director
PABLO LEYVA FRANCO
Director General del IDEAM

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA AMBIENTAL
BOGOTA, D.C.

2001

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, D.C. 14 de Febrero de 2001

A Dios, gracias por hacer realidad cada uno de mis sueños.

A mis padres y hermanos por su amor y apoyo incondicional.

A mi esposo David y mi hija Laura Milena, con todo mi amor.

AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Pablo Leyva, Director del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, por su apoyo, colaboración, dirección y confianza.

A los compañeros Carlos Gómez, Juan Carlos Alarcón, Efraín Domínguez y Gustavo Coy, quienes me colaboraron con sus conocimientos para el desarrollo del presente trabajo.

A los compañeros de la Oficina de Informática y Telecomunicaciones por el apoyo brindado.

A todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en la realización del presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION

1. MARCO INSTITUCIONAL
 - 1.1 UBICACION DEL TRABAJO DENTRO DEL MARCO INSTITUCIONAL
2. METODOLOGIA
3. INDICE DE AGRESIVIDAD O EROSIVIDAD DE LA LLUVIA
 - 3.1 CONSTRUCCION Y GENERACION DEL MAPA INDICE DE AGRESIVIDAD Ó EROSIVIDAD DE LA LLUVIA
 - 3.1.1 Construcción automática de isolíneas de agresividad de la lluvia
 - 3.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS
4. INDICE DE ERODABILIDAD DEL SUELO
 - 4.1 FACTOR TEXTURAL DE LAS UNIDADES DE SUELO
 - 4.1.1 Calificación textural
 - 4.1.2 Análisis de los resultados
 - 4.2 ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LOS SUELOS POR LA AGLUTINACION DE LA MATERIA ORGANICA Y LAS ARCILLAS
 - 4.2.1 Factor naturaleza de las arcillas
 - 4.2.2 Factor materia orgánica
 - 4.2.3 Estabilidad de la estructura del suelo
 - 4.3 INDICE DE ERODABILIDAD
 - 4.3.1 Análisis de los resultados

- 5. INDICE DE PROTECCION DE LA COBERTURA VEGETAL Y LA PENDIENTE
 - 5.1 INDICE DE PROTECCION A PARTIR DEL TIPO DE USO Y MANEJO DEL SUELO
 - 5.1.1 Descripción del Sistema de Información del Sector Agropecuario Colombiano-SISAC
 - 5.1.2 Uso y manejo del suelo
 - 5.1.3 Evaluación del índice de protección
 - 5.2 PENDIENTE DEL TERRENO
 - 6. EROSION HIDRICA ACTUAL Ó PERDIDA DE SUELO
 - 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- BIBLIOGRAFIA

INDICE DE MAPAS

- Mapa 1. Estaciones meteorológicas con datos de Índice de Fournier Anual-I.F.A
- Mapa 2. Mapa preliminar del índice de agresividad de la lluvia por el método de Fournier para Índice de Fournier Anual-I.F.A
- Mapa 3. Agresividad de la lluvia por cuencas con base en el Índice de Fournier Anual-I.F.A
- Mapa 4. Mapa final del índice de agresividad de la lluvia por el método de Fournier para Índice de Fournier Anual- I.F.A
- Mapa 5. Factor textural de los suelos
- Mapa 6. Estabilidad de la estructura de los suelos por la aglutinación de la materia orgánica y las arcillas
- Mapa 7. Índice de erodabilidad de los suelos
- Mapa 8. Índice de protección de la cobertura vegetal
- Mapa 9. Factor pendiente
- Mapa 10. Mapa de erosión hídrica actual ó pérdida de suelo en Ton/Ha/Año

INDICE DE GRAFICOS

- Gráfico 1. Ubicación del trabajo dentro del marco institucional
- Gráfico 2. Método de trabajo
- Gráfico 3. Semivariograma vs Distancia
- Gráfico 4. Semivariogramas obtenidos a partir de los diferentes métodos de Interpolación
- Gráfico 5. Clases y familias texturales de los suelos para una sección control
- Gráfico 6. Porcentaje de área cubierta para las clases texturales de las unidades de suelos
- Gráfico 7. Uso del suelo para el departamento de Santander
- Gráfico 8. Uso del suelo para el departamento de Risaralda
- Gráfico 9. Uso del suelo para el departamento del Quindío
- Gráfico 10. Uso del suelo para el departamento del Magdalena
- Gráfico 11. Uso del suelo para el departamento del Huila
- Gráfico 12. Uso del suelo para el departamento de Cundinamarca
- Gráfico 13. Uso del suelo para el departamento de Córdoba
- Gráfico 14. Uso del suelo para el departamento de Cesar
- Gráfico 15. Uso del suelo para el departamento de Cauca
- Gráfico 16. Uso del suelo para el departamento de Caldas
- Gráfico 17. Uso del suelo para el departamento de Boyacá

- Gráfico 18. Uso del suelo para el departamento de Bolívar
- Gráfico 19. Uso del suelo para el departamento de Atlántico
- Gráfico 20. Uso del suelo para el departamento de Antioquia
- Gráfico 21. Uso del suelo para el departamento de Valle del Cauca
- Gráfico 22. Uso del suelo para el departamento de Tolima
- Gráfico 23. Uso del suelo para el departamento de Sucre
- Gráfico 24. Procedimiento para evaluar el índice de protección
- Gráfico 25. Modelo espacial para evaluar la erosión hídrica
- Gráfico 26. Correlación entre los datos de erosión hídrica vs intensidad de erosión

INDICE DE CUADROS

- Cuadro 1. Clases texturales para las unidades de suelo del país
- Cuadro 2. Indices texturales para las unidades de suelo
- Cuadro 3. Calificación del factor naturaleza de las arcillas
- Cuadro 4. Calificación del factor materia orgánica
- Cuadro 5. Matriz de ponderación para evaluar la aglutinación de la materia orgánica y las arcillas.
- Cuadro 6. Rangos para los valores de aglutinación de la materia orgánica y las arcillas
- Cuadro 7. Rangos de altitud y calificación
- Cuadro 8. Matriz de ponderación para evaluar la estructura del suelo
- Cuadro 9. Índice y clasificación de la erodabilidad del suelo
- Cuadro 10. Índice de protección para los cultivos de la cuenca Magdalena-Cauca
- Cuadro 11. Indices de protección para las unidades del SISAC diferentes a Cu y Me
- Cuadro 12. Ejemplo del cálculo para hallar el índice de protección de las unidades Cu y Me por municipio
- Cuadro 13. Indices para el factor pendiente
- Cuadro 14. Datos de erosión hídrica actual ó pérdida de suelo
- Cuadro 15. Correlación entre los datos de erosión hídrica vs intensidad de erosión
- Cuadro 16. Pérdida de suelos en hectáreas y porcentaje para las subcuencas del país

INTRODUCCION

La degradación del territorio colombiano por erosión y sedimentación es el fenómeno más notorio y de amplias repercusiones económicas, sociales y ecológicas. Las causas son los factores naturales y antrópicos ligados a la historia geológica y morfoclimáticas, acentuada por la actividad social desordenada, que cada día se hace más crítica, debido al conflicto entre el uso que el hombre hace de su entorno ambiental y las potencialidades que éste le brinda.

Los factores naturales que permiten el desarrollo en forma avanzada y peligrosa del proceso de erosión hídrica y la sedimentación en el país son entre otros: el tipo de material afectado (suelo), los factores climáticos como la precipitación, el papel de protección que ofrece la cobertura vegetal al medio, el gradiente del terreno, las condiciones de drenaje y la ausencia de un adecuado manejo de los suelos ó especialmente los de ladera. Montenegro H, 1989 (*En INAT y otros, 1996*), señala que en el país se están perdiendo entre 170.000 a 200.000 Ha/año, teniendo en cuenta sólo los primeros 20 cm de profundidad.

Actualmente el estado actual del conocimiento sobre la erosión del suelo y sus efectos en el país es esencialmente cualitativo, de tal forma que la información cuantitativa sobre los procesos erosivos, sus efectos en la productividad, en la sedimentación, no están disponibles aún. Esta falta de información, dificulta la identificación y la aplicación de

prácticas estratégicas efectivas de conservación y la rehabilitación de las tierras en el país.

El proyecto que se propone es importante porque permitirá identificar y evaluar algunos de los factores que gobiernan el proceso de erosión como son: la precipitación, el tipo de suelo, la pendiente y la vegetación, a partir de la metodología de la FAO para evaluar erosión, ajustada para el país, con el fin de determinar la pérdida de suelo por erosión hídrica a nivel nacional.

Con este resultado se conocerá la degradación de los suelos en el país a partir de la erosión hídrica; además servirá como base para calcular el rendimiento de sedimento en una cuenca a partir del desarrollo de modelos a escala mayores y en un futuro obtener la erosión hídrica en tiempo real decadal cuando se interrelacione con valores de agresividad decadal de la lluvia, disponibilidad hídrica edáfica (excesos y déficits) y el factor protección por cultivos, constituyéndose en una información útil para evaluar la evolución en el tiempo de la erosión, importante para la toma de decisiones de política y gestión del recurso en el futuro del país.

Finalmente se entregará una metodología para ser implementada en un Sistema de Información Geográfica usando bases de datos alfanuméricas y espaciales, con los siguientes indicadores: agresividad de la lluvia, erodabilidad del suelo y protección de la cobertura vegetal, con el fin de lograr una espacialización del país con respecto a la erosión hídrica, complementando de esta forma los modelos hidrológicos, sedimentológicos, de degradación y estabilidad, que actualmente adelanta el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluar la degradación de los suelos por la erosión hídrica en el territorio colombiano a escala 1:1.500.000, a partir de la elaboración de un modelo utilizando los sistemas de información geográfica-SIG, para hacer seguimiento de la pérdida de suelo en el país.

ESPECIFICOS

- Evaluar el índice de erosividad de la lluvia con el fin de definir el potencial que tiene la lluvia para erosionar.
- Evaluar el índice de erodabilidad del suelo a partir de algunas de sus propiedades las más importantes a esta escala de trabajo.
- Evaluar el índice de protección de la cobertura vegetal de acuerdo con el mapa de coberturas vegetales uso y ocupación del espacio a escala 1:500.000 del IDEAM y el índice pendiente del terreno.
- Elaborar el modelo aplicando una ecuación matemática que permita la interrelación entre los índices anteriores.

1. MARCO INSTITUCIONAL

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, ha venido adelantando diferentes estudios para evaluar la erosión en el país, a partir de la definición de modelos e indicadores, el primero, corresponde al Modelo de Estabilidad, el cual se basa en conocer como se interrelacionan los factores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, con los ecosistémicos, hidrológicos y meteorológicos, para conocer cual es la susceptibilidad del medio para generar movimientos en masa; el segundo modelo es el de degradación, el cual trata de conocer el deterioro de los suelos desde varios aspectos como la salinización, la desertificación, la compactación, la contaminación y la erosión hídrica, esta última tratada en el instituto como escurrimientos superficiales y profundos. Para lograr lo anterior, el IDEAM ha realizado los siguientes estudios:

- La erosión y sedimentación en Colombia (IDEAM, 1998), en donde se identificaron a nivel nacional con base en información 1:500.000 generalizada a 1:1.500.000, los procesos geomorfológicos actuales para cada sistema morfogénico¹, enmarcados dentro de cinco grandes categorías: erosión hídrica superficial, remoción en masa, procesos litorales, procesos glaciares y periglaciares, litorales y procesos de sedimentación.

¹ Sistema Morfogénico: Unidad cartográfica en el que se circunscribe un conjunto de procesos dominantes y condicionados por factores como la estructura geológica, condiciones bioclimáticas, la pendiente, los suelos, los modelados heredados y las formas de ocupación antrópica. IDEAM-UNAL. 1997.

- Estabilidad de las formaciones superficiales (IDEAM, 1998), es un estudio que permitió valorar los procesos geomorfológicos, ponderarlos y cualificarlos dentro de cuatro niveles de estabilidad.
- Susceptibilidad a los movimientos en masa (IDEAM, 2000), es un trabajo adelantado a partir de la interpretación de imágenes de satélite Landsat 5 TM para ubicar zonas con diferentes procesos de erosión hídrica y movimientos en masa.
- Pronóstico de movimientos en masa: Programa que se viene adelantando diariamente en el Servicio de Información Ambiental del Instituto, con el propósito de darle al país un boletín con la identificación de las áreas más susceptibles a los eventos por remoción en masa e igualmente dar la alerta oportuna cuando las condiciones así lo exijan.

1.1 UBICACION DEL TRABAJO DENTRO DEL MARCO INSTITUCIONAL

La erosión dentro del modelo de degradación, es un proceso que ha empezado a desarrollarse en el Instituto, inicialmente, se ha obtenido una evaluación cualitativa de la erosión actual y futura, teniendo en cuenta la resistencia de los suelos a la erosión, primero, considerando la cobertura vegetal, para evaluar la erosión actual, y posteriormente sin cobertura vegetal, para visualizar el panorama de máxima erosión en el futuro; estos resultados han sido trabajados en el "Modelo de evaluación, seguimiento y monitoreo de los impactos ambientales en los suelos colombianos por la agricultura intensiva" (Gómez, C. IDEAM, 2001).

El modelo para evaluar la erosión hídrica en Colombia, realizado en el presente estudio, forma parte del modelo de degradación, pero su valoración es cuantitativa, porque se indica cuál es la pérdida de suelo en el país en ton/ha/año. Este modelo es estático, pero es la base de un modelo dinámico a partir de la integración con información suministrada

por otras dependencias del Instituto de la siguiente manera (Gráfico 1): el factor erodabilidad del suelo ó K podrá mejorarse a partir de la información proporcionada por las subdirecciones de Geomorfología y Meteorología sobre humedad ó disponibilidad hídrica en el suelo, igualmente mejorará el valor de K si se conocen los valores de escorrentía proporcionados por la subdirección de Hidrología. El factor R ó erosividad de la lluvia será el factor que le proporcionará al modelo su carácter dinámico, trabajando el índice de founier decadal y la intensidad de la lluvia, datos proporcionados por la subdirección de Meteorología. El factor protección de la cubierta vegetal mejorará cuando se tenga espacializado la mayor parte de los cultivos y cuando los datos sobre protección de cultivos, cambios en el uso del suelo, proporcionados por las subdirecciones de Ecosistemas y Ecología Económica, sean más detallados; finalmente, el conocimiento de tecnologías mejoradas para el sector agrícola sé obtendrá por parte de la Oficina de Ciencia y Tecnología.

La interrelación de esta información permitirá finalmente obtener la amenaza, vulnerabilidad y el riesgo de la erosión hídrica, y evaluar los aspectos socio-económicos que también juegan un papel muy importante en este proceso de degradación de suelos.

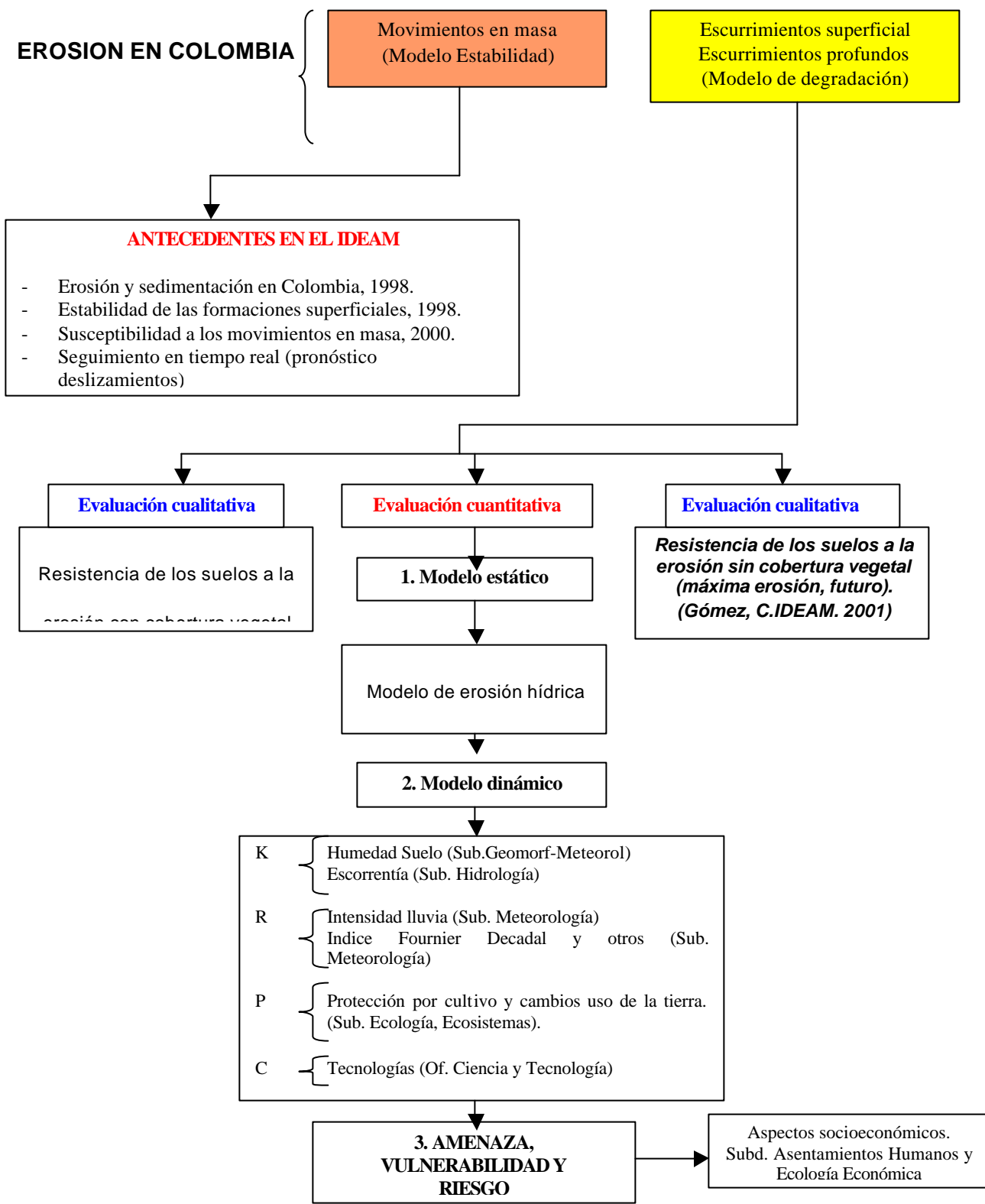


Gráfico 1. Ubicación del trabajo dentro del marco institucional

2. METODOLOGIA

La metodología que se ha desarrollado, se basa en la utilización de información básica temática alfanumérica y gráfica. Para el desarrollo y presentación del modelo, se utilizaron los sistemas de información geográfica (ver Gráfico 2).

La elaboración del mapa de erosión hídrica ó erosión actual, comprende cuatro fases principales:

- En la primera fase, a partir de la información temática, se realizan diferentes procesos digitales como interpolación, intersección, concadenación, edición de tablas, etc., utilizando varios sistemas de información geográfica. Cada una de los métodos aplicados para obtener los indicadores que van a dar origen a los mapas temáticos son explicados en los capítulos correspondientes.
- En la segunda fase, después de realizar el procesamiento digital para determinar cada índice, se obtienen los diferentes mapas temáticos (índice de erosividad, índice de erodabilidad, índice de protección y factor pendiente).
- En la tercera fase, se aplica la multiplicación de los cuatro mapas índices en un SIG.
- Finalmente se obtiene el mapa de erosión hídrica ó erosión actual en el país, como una primera aproximación cuantitativa de la pérdida de suelo en el territorio colombiano.

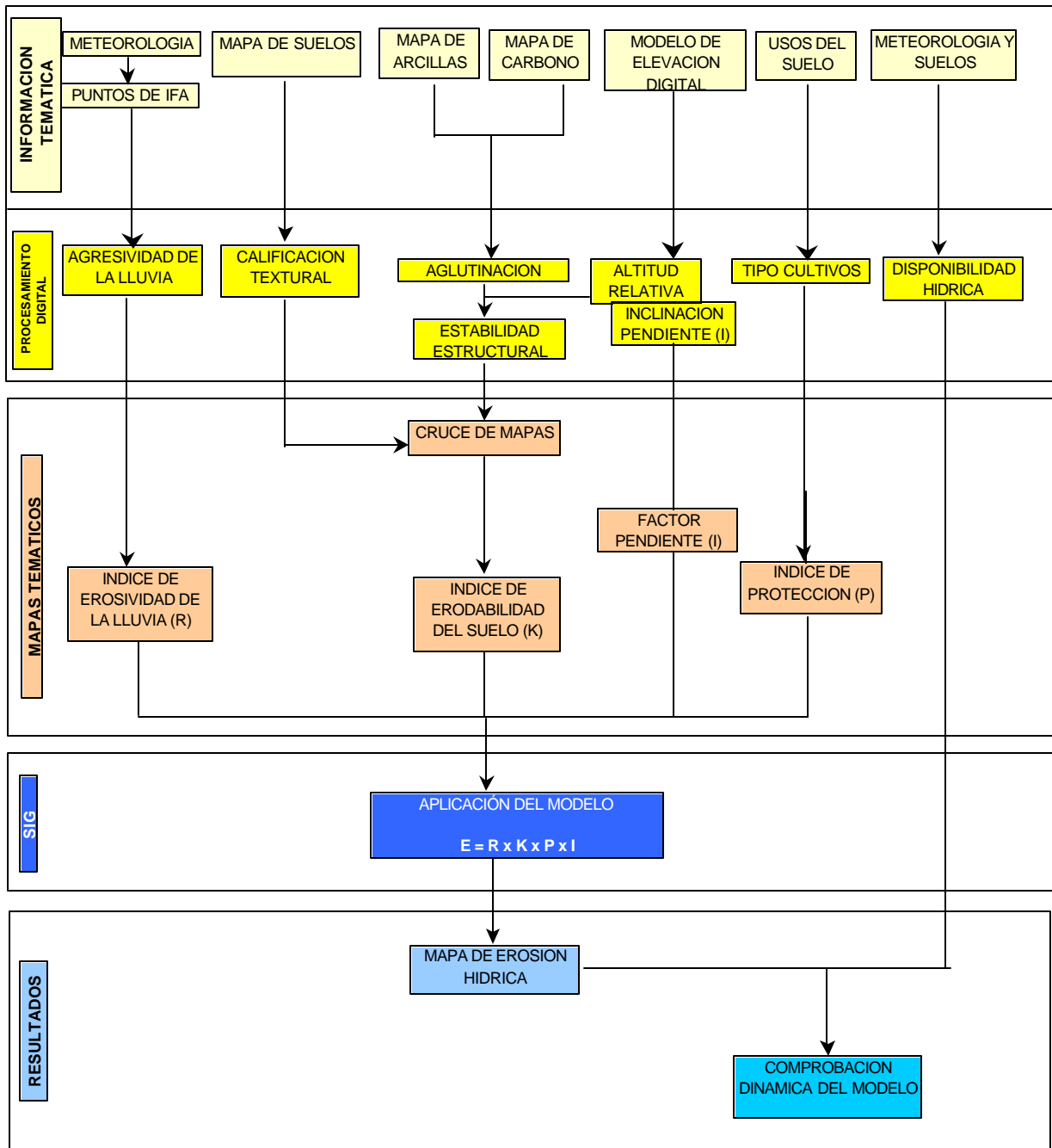


Gráfico 2. Método de trabajo

3. INDICE DE AGRESIVIDAD O EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

Uno de los factores que determinan la erosión es la agresividad o erosividad de la lluvia; se define como la capacidad potencial de la precipitación, de causar erosión en un período determinado. Para calcular este índice existen diversas metodologías, entre las más conocidas se encuentran:

- EI30: Integra el producto de la energía cinética de la lluvia por la intensidad máxima de ésta en 30 minutos.
- IF (Indice de Fournier): Se define como la relación p^2/P , donde p es la precipitación del mes más lluvioso del año en mm, y P es la precipitación anual.
- Indice de Fournier Modificado por la FAO: Define una nueva ecuación para el cálculo del índice de agresividad climática como:

$$\sum_{i=1}^{12} P_i^2/P$$

Donde P_i es la precipitación media mensual y P es la precipitación media anual. Esto se fundamenta porque no solo el mes de mayor precipitación produce erosión superficial sino

que hay meses con menores cantidades de precipitación que también producen erosión superficial (Arnoldus, 1977).

3.1 CONSTRUCCION Y GENERACION DEL MAPA INDICE DE AGRESIVIDAD O EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

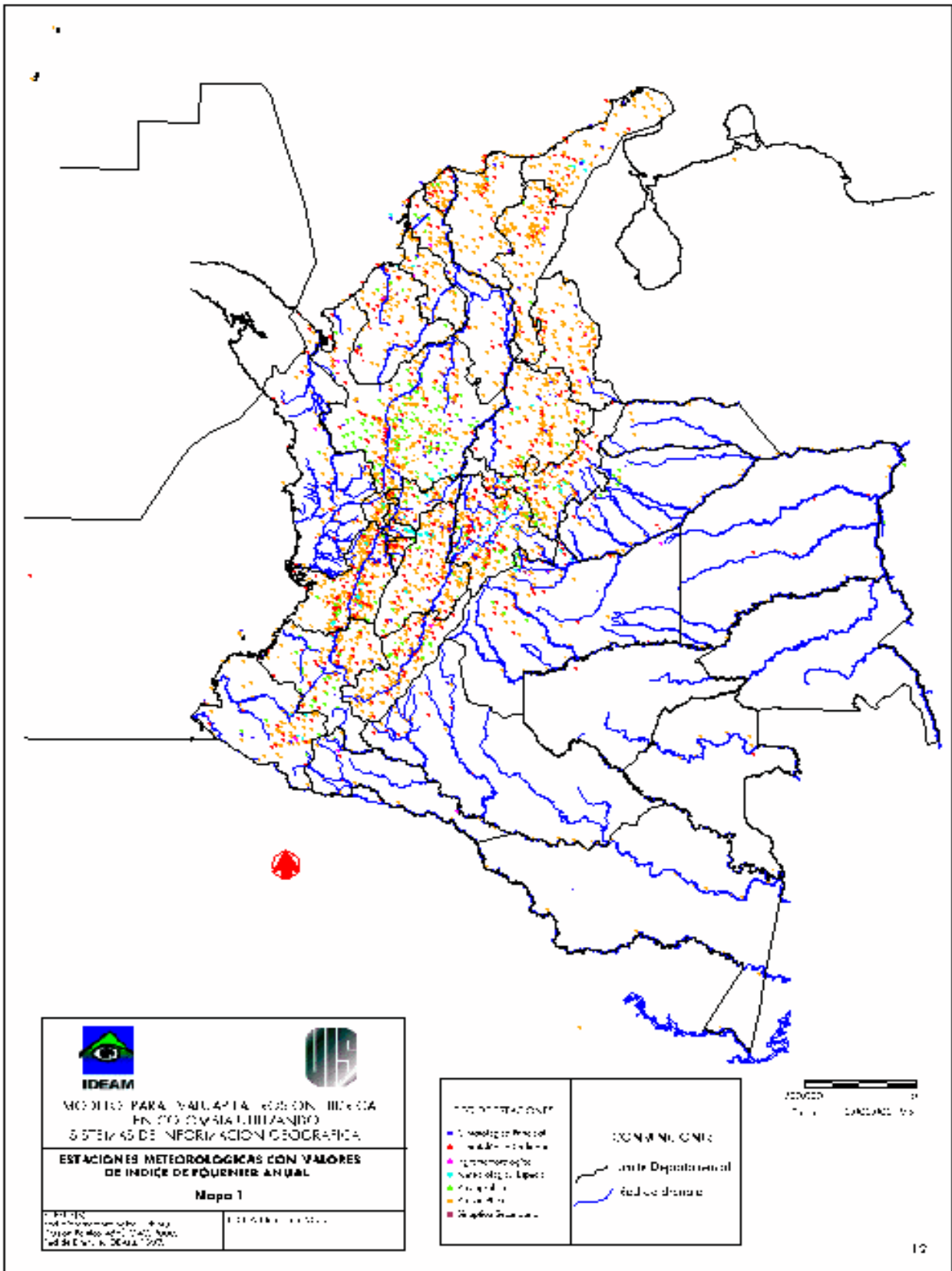
Para la elaboración de este mapa índice, se toman los datos obtenidos de agresividad anual del Proyecto Erosión (Rey, J. IDEAM, 1996), los cuales se obtuvieron a partir del índice de Fournier Anual calculado con el Índice Decadal utilizando la siguiente expresión matemática:

$$\text{IFD} = \frac{(\text{Y del 1 día})^2 + (\text{Y del 2 día})^2 + \dots + (\text{Y del 10 día})^2}{(\text{Y de 1 día}) + (\text{Y del 2 día}) + \dots + (\text{Y del 10 día})}$$

En la anterior expresión, el IFD se define de la siguiente manera: para cada día de cada década se estima la precipitación media de todos los años de registro de una estación dada, se eleva al cuadrado y se repite el proceso para todos los días; luego se suman estos valores y se dividen por la sumatoria de las medias de cada uno de los diez días.

Después de calcular el IFD, se suman los correspondientes a las décadas de cada mes para hallar el Índice de Fournier Mensual (IFM) y finalmente con la sumatoria de todos los IFM se obtiene el Índice de Fournier Anual (IFA).

Inicialmente, para el Modelo de Erosión Hídrica se tomó los valores obtenidos de IFA, para 4200 estaciones meteorológicas localizadas a lo largo de todo el país (Mapa 1).



3.1.1 Construcción automática de isolíneas de agresividad de la lluvia. Para la construcción del mapa índice de agresividad de la lluvia se aplicó el algoritmo de interpolación Kriging, debido a su capacidad para trabajar con datos irregularmente distribuidos, dando resultados más cercanos a los de interpolación manual, además, presenta un soporte matemático bien fundamentado.

Kriging es un avanzado procedimiento geoestadístico que genera una superficie estimada desde una distribución dispersa de puntos con valores en Z. Este procedimiento involucra una investigación interactiva de las características espaciales ó de los valores representados por Z antes de que el usuario seleccione el mejor método para generar la superficie de salida.

Los valores representado por Z indican la variación espacial, cuantificada en kriging usando el método del semivariograma, este se computa a partir de los puntos de entrada. El valor de la muestra en el semivariograma para una distancia de separación de h (se refiere a longitud ó distancia en el eje de la X), es la diferencia cuadrática promedio en el valor de Z entre pares de la muestra de puntos separados por h.

La ecuación utilizada por kriging para calcular el semivariograma es la siguiente:

$$Y(h)=1/2n \sum_{i=1}^n \{Z(X_i)-Z(X_i-h)\}^2$$

Donde n = es el número de pares de puntos de la muestra separados la distancia h.

A partir de la anterior ecuación, se genera una gráfica que muestra la distribución de la semivarianza vs la distancia (ver Gráfico 3). Con este modelo, kriging calcula la varianza predictiva para cada una de las cinco funciones de variograma (esférica, lineal,

exponencial, gaussiana, circular), con esto, se selecciona cual de las funciones muestran mejor la distribución de los puntos en el semivariograma y utilizarla para generar la interpolación.

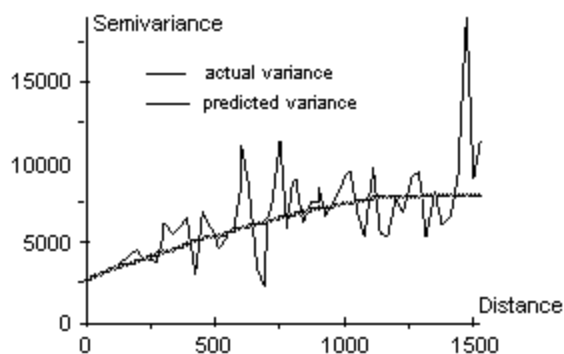
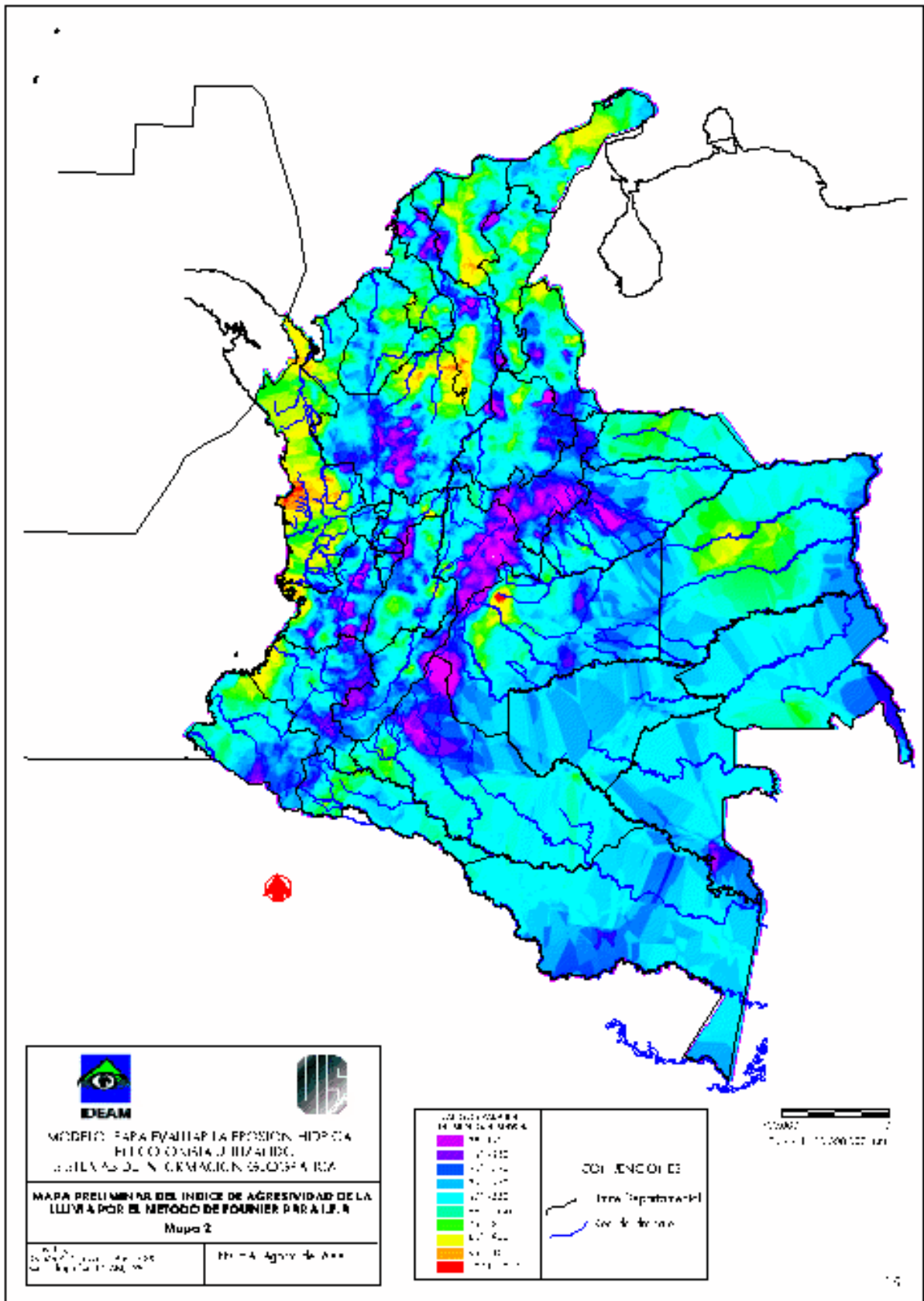


Gráfico 3. Semivariograma vs Distancia. Tomado ArcInfo 7.3.1.

Para aplicar el algoritmo, se tomaron los datos de IFA de cada una de las 4200 estaciones, se realizó el análisis del semivariograma con el fin de definir cual método de interpolación es el más indicado.

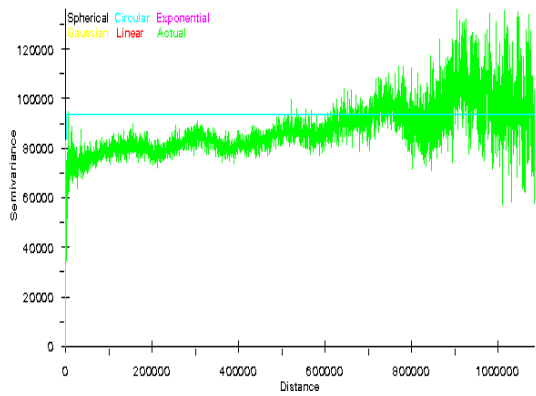
De acuerdo con el Gráfico 4, los métodos de interpolación esférico, exponencial, gaussiano y lineal presentan una curvatura idéntica, por lo tanto, el resultado de interpolación de los datos es el mismo utilizando cualquiera de los métodos anteriores, sin embargo, por la rapidez con que son procesados los datos, se decidió utilizar el método de interpolación lineal, sin tener en cuenta inicialmente las líneas de divisorias de aguas entre cuencas (Ver Mapa 2).

Este resultado presenta ciertas incongruencias en la interpolación, principalmente hacia el sector límite entre las regiones Andina y Orinoquía-Amazonía debido a que se mezclan los datos de IFA de las estaciones distribuidas en forma homogénea y con una buena

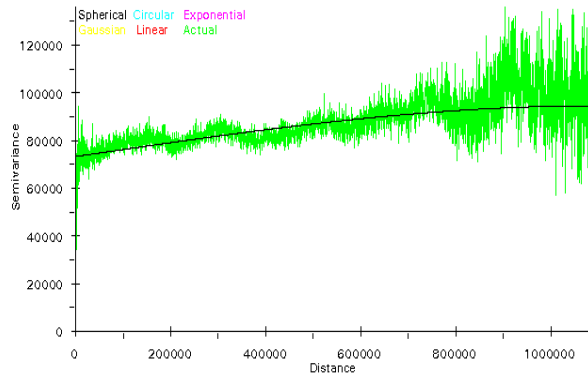


??

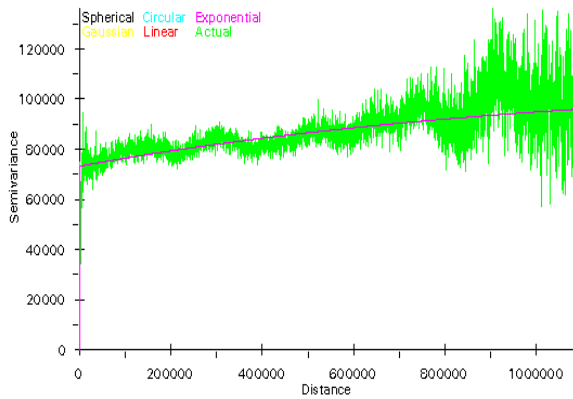
METODO CIRCULAR



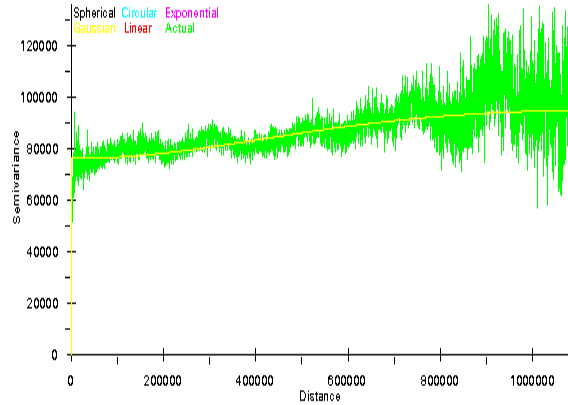
METODO ESFERICO



METODO EXPONENCIAL



METODO GAUSSIANO



METODO LINEAL

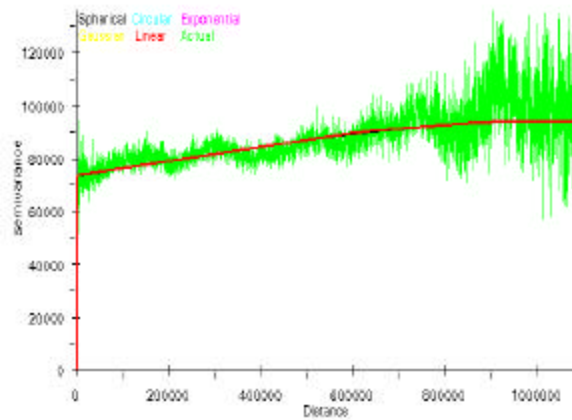


Gráfico 4. Semivariogramas obtenidos a partir de los diferentes métodos de interpolación Kriging.

densidad en la región Andina, con los escasos datos en la Orinoquía-Amazonía, esto se debe, a que los sistemas de interpolación de datos no tienen mecanismos para considerar la influencia del relieve durante la interpolación espacial de estos, lo que no les permite construir correctamente las isolíneas de variables influidas por la topografía del terreno al que se relacionan (por ejemplo, precipitación, escorrentía, etc.).

Para efectos de una interpolación correcta, en estos casos, se requiere que la información a interpolar este homogéneamente distribuida y con una buena densidad de datos. En la mayoría de los casos las redes de observación tienen sus nodos ubicados en forma heterogénea y con una densidad muy irregular de estaciones, por lo tanto para obtener una interpolación idónea es necesario tener en cuenta otros factores que pueden complementar la falta de puntos de observación.

Entre esos factores podemos mencionar como los más importantes:

- ?? La influencia altitudinal del relieve
- ?? El efecto de la divisoria de aguas
- ?? El carácter de la circulación atmosférica local
- ?? La cobertura vegetal
- ?? Factores geológicos e hidrogeológicos

Esta lista podría continuar hasta extenderse a un vector de factores difícil de manejar y con componentes cuyo peso real en los resultados de la interpolación no sería muy efectivo; además técnicamente la inclusión de estos factores en los sistemas automáticos de interpolación no es muy sencilla (IDEAM, Nota Técnica 220999-06 edoc).

Teniendo en cuenta las observaciones anteriores, se decidió aplicar la metodología empleada por la subdirección de Hidrología del IDEAM para la construcción del mapa de isolíneas de escorrentía. El aplicativo permite interpolar datos de escorrentía considerando por lo menos las cuchillas principales que se encuentran en el espacio de interpolación, esto se aplicó para los datos de agresividad anual, siguiendo los siguientes pasos:

Definición de las zonas de interpolación: Se tomaron las mismas 6 zonas de interpolación que tienen en cuenta las cuchillas representadas por las cordilleras y que por encima de los 500 msnm producen efectos sobre la configuración de las isolíneas de escorrentía. Las zonas son :

ZONA 1 - Cuenca del río Magdalena hasta la estación Peñoncito

ZONA 2 - Cuenca del río Cauca hasta la estación las Varas

ZONA 3 - Cuenca del río Catatumbo

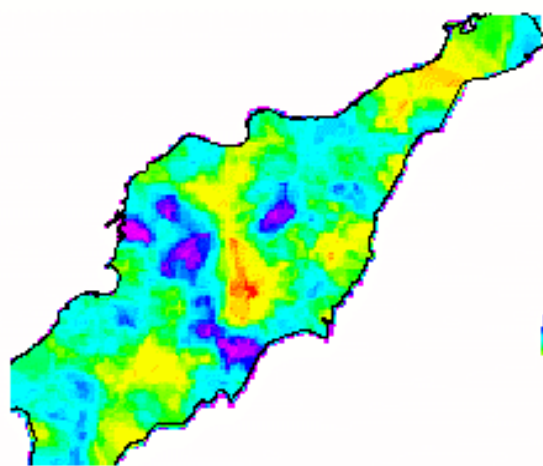
ZONA 4 - Cuencas de los ríos Amazonas Orinoco

ZONA 5 - Cuencas de los ríos Patía y Atrato

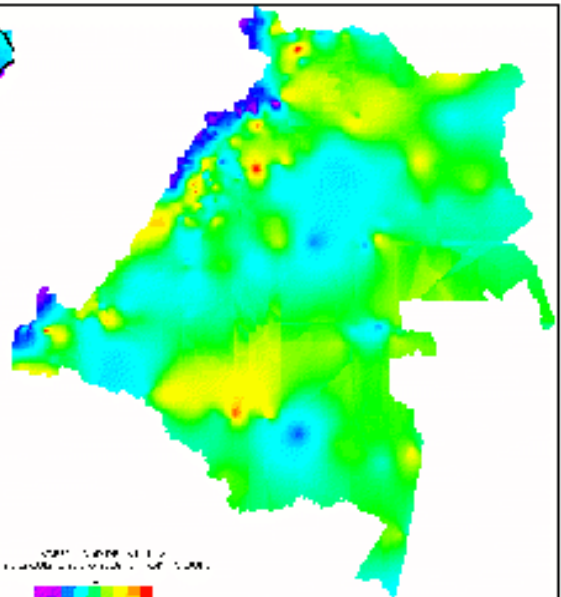
ZONA 6 – Caribe

Interpolación para cada una de las zonas designadas: Una vez seleccionadas las estaciones correspondientes a cada una de las zonas de delimitación con la respectiva variable a interpolar, que para el caso de estudio es el IFA, se procede a realizar la interpolación de cada zona de manera independiente (Mapa 3).

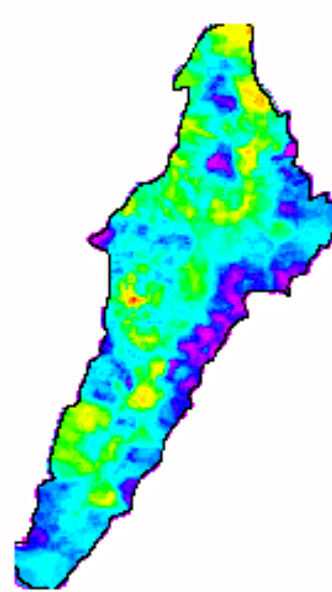
Unión de los resultados de las diferentes zonas de interpolación: De la interpolación anterior se obtienen archivos "*.dat" de formato XYZ ASCII los cuales se integran en uno solo para ser nuevamente interpolados, con el fin de obtener el mapa final de Índice de



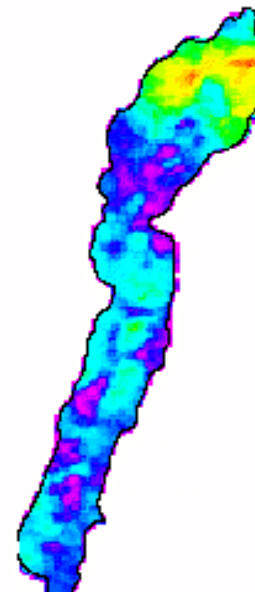
AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 1



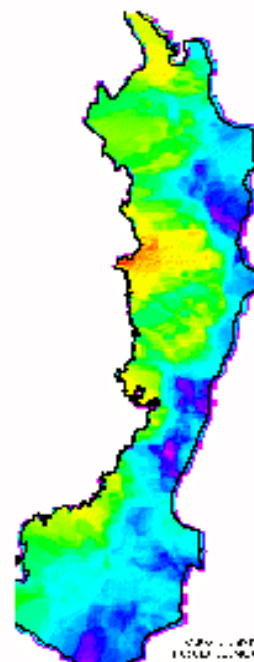
AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 2



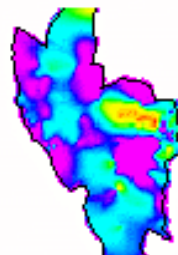
AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 3



AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 4



AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 5



AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA EN EL SUBCUECA 6

<p>MODELO PARA EVALUAR LA RIESGOS DE LA ENGENGNERIA URBANA DE LAS EMAS DE INGENIERIA ESPACIAL</p>	
<p>AGRESIVIDAD DE LA LLUVIA POR CUENCAS CON BASE EN EL IFA</p>	
<p>Mapa 3</p>	
<p>INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES DE MEDIELLAN</p>	<p>FECHA: Octubre 2003</p>

agresividad de la lluvia, el cual conserva la interpolación de cada una de las cuencas con los valores de IFA correspondientes a las estaciones de cada área respetando la divisoria de aguas de las seis zonas ó cuencas tomadas en el estudio (Mapa 4).

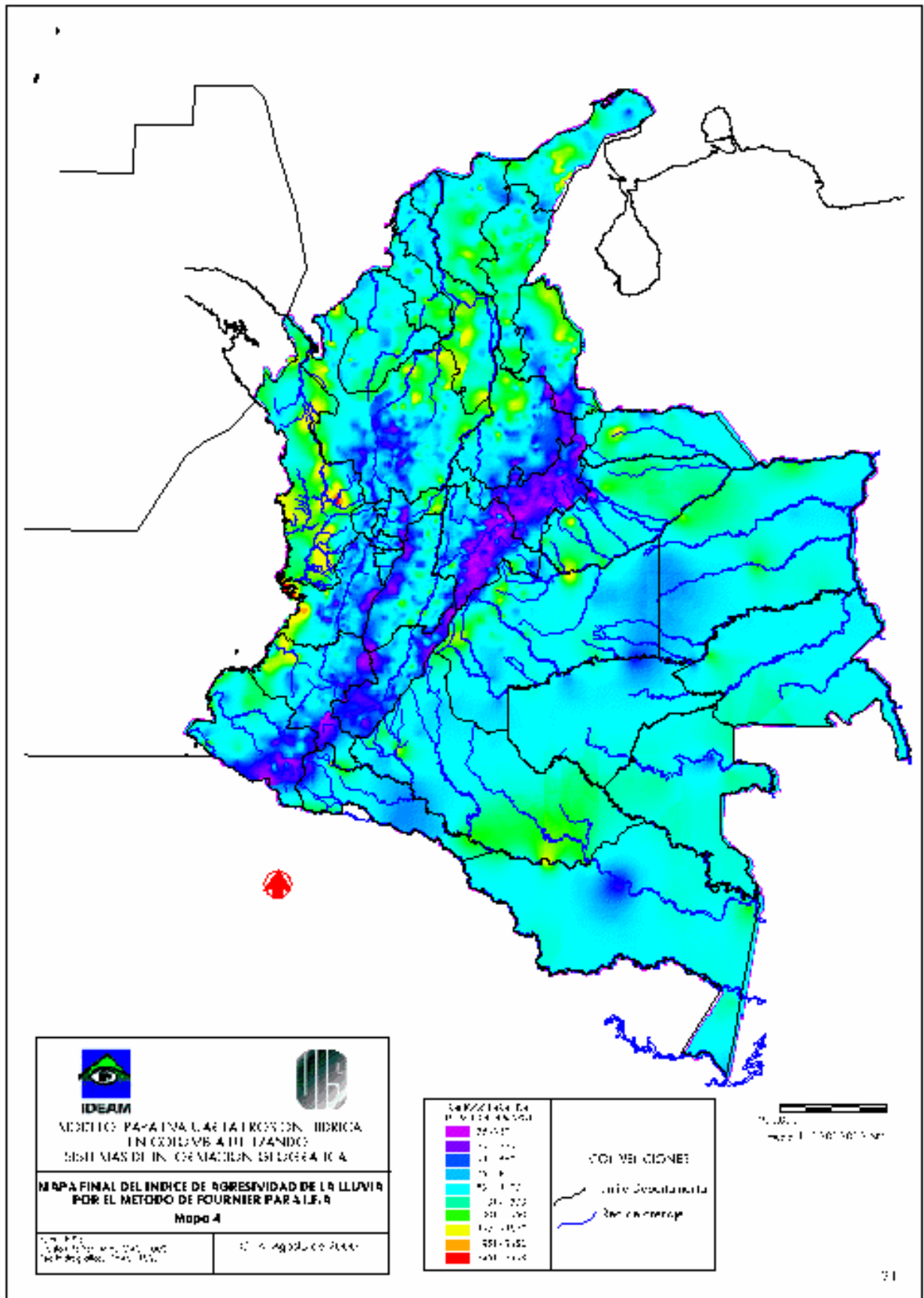
3.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En el resultado obtenido del mapa de agresividad de la lluvia utilizando este segundo método, se puede observar que existe una clara delimitación de las isolíneas de agresividad en las divisorias de las cordilleras, sin presentarse cruce de información.

Posteriormente se realizó una comparación entre los valores obtenidos usando el primer método de interpolación con el segundo, en diferentes puntos de cada mapa, encontrándose una diferencia aproximada del 20% entre los valores de interpolación obtenidos en el primer resultado con respecto al segundo, indicando la mayor exactitud del segundo método.

El mapa final índice de agresividad de la lluvia, obtenido a partir del segundo método, permite determinar que las zonas de alta montaña, son las que presentan los menores valores de agresividad, los mayores valores se presentan principalmente hacia la zona de la costa Pacífica por ser la zona más pluviosa del país, sin embargo, estos valores de agresividad de las lluvias se amortiguarán si los índices de erodabilidad son bajos, la protección de la cobertura vegetal es alta, la pendiente y la agresividad de las prácticas de manejo de cultivos y las tecnologías es baja.

Las zonas más importantes para tener en cuenta para una evaluación general de las pérdidas de suelo desde el punto de vista de la capacidad de la lluvia para producir erosión, son aquellas con valores de IFA entre los 651 y 1100, pues corresponden a las



vertientes medias y bajas de las cordilleras, donde predominan las actividades agrícolas sin un adecuado manejo y donde además se encuentran ubicados la mayor parte de los asentamientos humanos del país.

4. INDICE DE ERODABILIDAD DEL SUELO

Erodabilidad del suelo se conoce como la mayor o menor susceptibilidad del material edáfico a ser disgregado y transportado por los agentes erosivos.

Para calcular este índice se modificó la metodología empleada en la Ecuación de Pérdida de Suelos (Wischmeier y Smith, 1978) para hallar el factor K, el cual se calcula en función de cuatro componentes: la textura, la estructura, el contenido de materia orgánica y la permeabilidad; otros componentes que también se han utilizado para otros estudios son la estabilidad de los agregados o la capacidad de infiltración. El índice de erodabilidad en el presente modelo se calculó a partir del componente textural, la materia orgánica e incluyendo la naturaleza de las arcillas como una variable que sustituye la permeabilidad y la capacidad de infiltración.

4.1 FACTOR TEXTURAL DE LAS UNIDADES DE SUELOS

La textura en el suelo es un factor importante para la regulación del agua y del aire en el mismo, y por tanto en el grado de permeabilidad, el cual influye en mayor o menor grado en la erosión del suelo. Las texturas que corresponden a la categoría de muy finas a finas, son impermeables tanto al aire como al agua, por lo tanto son las menos adecuadas

en la regulación de estos dos factores externos, constituyéndose en unidades de suelos donde el agua no penetra sino escurre por la superficie; las texturas gruesas y muy gruesas, actúan en forma contraria, son totalmente permeables, el agua penetra en forma exagerada y su movilización no se puede controlar; las texturas más adecuadas contra los efectos erosivos son las medias, porque permiten ejercer un mayor control en la regulación del agua y del aire.

Las clases texturales obtenidas para las unidades de suelos a escala 1:1.500.000 se determinaron a partir de la sección control del perfil modal representativo de cada unidad cartográfica de suelos; para cada perfil modal se tomaron las profundidades de los horizontes entre 25 y 75 cms y se multiplicaron por el porcentaje de arena, limo y arcilla que presenta cada horizonte, los valores obtenidos se suman y se dividen por 75; el resultado se lleva al triángulo textural para suelos (Gráfico 5), obteniéndose las siguientes clases texturales (Cuadro 1), de acuerdo con la taxonomía de suelos de la séptima aproximación de los Estados Unidos.

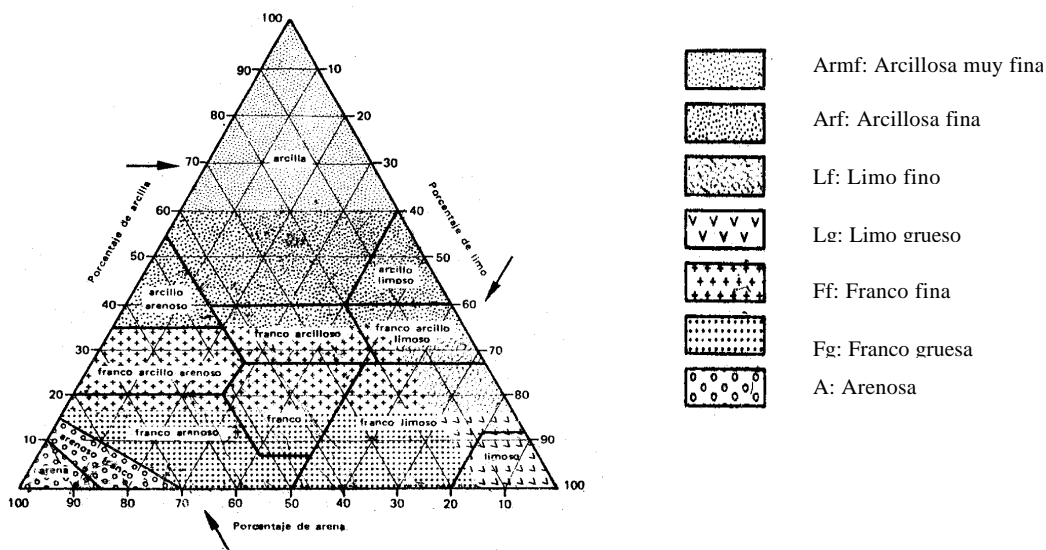


Gráfico 5. Clases y familias texturales de los suelos para una sección control. Tomado de Soil Taxonomy. Second Edition. 1999.

Cuadro 1. Clases texturales para las unidades de suelos del país

Símbolo suelo	Clase textural	Símbolo suelo	Clase textural
Aa	Arf	Me	Arf
Ab	Orgánica	Mf	Arf
Ac	Arf	Na	Fg
Ad	Arf	Nb	Ff
Ae	Ff	Nc	Fg
Af	Fg	Nd	Fg
Ag	Fg	Ne	Ff
Ah	Ff	Nf	Arf
Aj	Arm	Ng	Arf
Ak	Ff	Pa	
Ca		Pb	Arf
Cb	Arf	Pc	Fg
Cc		Pd	
Cd	Ff	Pe	Arf
Ce	Fg	Pf	Ff
Cf	Fg	Pg	Arf
Cg	Ff	Va	Fg
Cj	Ff	Vb	Ff
Ck	Fg	Vc	Fg
Cm	Arf	Vd	Fg
Cn	Arf	Ve	Arm
Co	Arf	Vf	Arf
Ch	Ff	Vg	Fg
Da	A	Vh	Arf
Db	Arf	Vj	Arf
Dc	Ff	Vk	Arf
Dd	Arf	Vm	A
De	Ff	Vn	Arf
Df	Arf	Vo	A
Dg	Fg	Vp	Fg
Dh	Arf	Vq	Ff
Dj	A	Vr	Fg
Ea	A	Vs	Arf
Eb	A	Vj	Arf
Ec	A	Vk	Arf
Ma	Ff	Vm	A
Mb	Arf	Vn	Arf
Mc	Fg	Vo	A
Md	Arf	Vp	Fg
Vr	Fg	Vq	Ff
Vs	Arf		

Según la tabla anterior, las clases texturales que predominan para las unidades de suelos son: arcillosas muy finas (Armf), arcillosas finas (Arf), franco finas (Ff), franco gruesas (Fg) y arenosas (A). Como se encuentran relacionadas con las unidades de suelos a la escala 1:1.500.000, el % de área que cubren en el país es el siguiente (ver Gráfico 6):

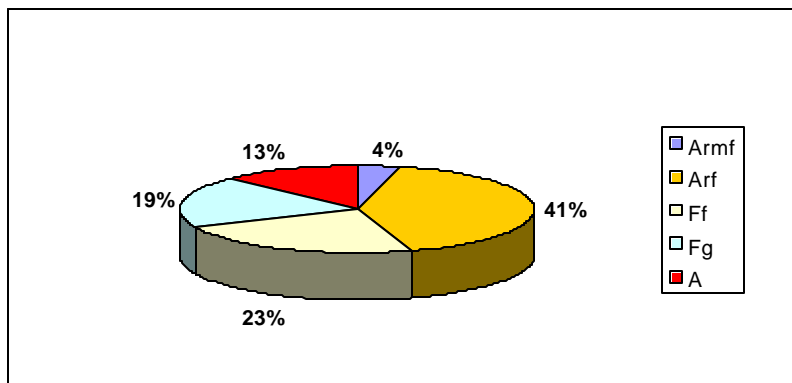


Gráfico 6. % de área cubierta por las clases texturales de las unidades de suelos a 1:1.500.000.

4.1.1 Calificación textural. Como la textura de los suelos es sólo uno de los factores que forman parte del índice de erodabilidad, cada clase textural dependiendo de la proporción relativa en que se encuentran las partículas minerales, recibe una calificación de acuerdo con la posibilidad de desagregarse y contribuir con la erosión; con base en lo anterior, las clases texturales se calificaron entre 0 y 1, siendo aquellos índices que se aproximan a 1 los que menor resistencia ejercen hacia la erosión en el país; estos índices se homologaron con la clasificación empleada por Ortiz, 1984, en la República Mexicana (Cuadro 2), para determinar su aplicación en el modelo.

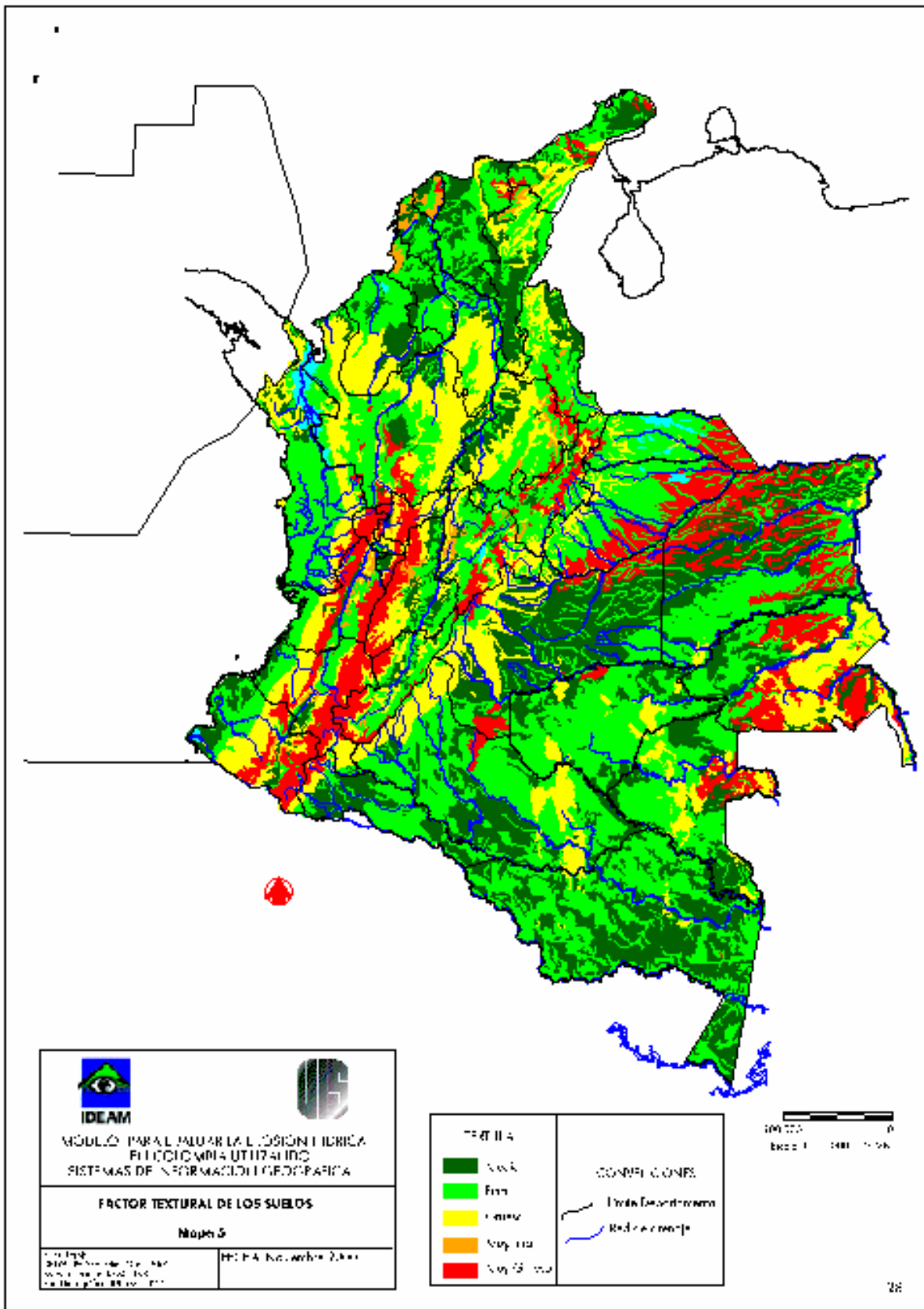
Cuadro 2. Índices texturales para las unidades de suelos

Calificación (IDEAM, 2000)			Homologación según calificación (Ortiz, 1984).		
Clase textura	Descripción	Índice	Clase textural	Descripción	Índice
Arcillosa muy fina (Textura muy fina)	> 60% Arcilla	0.4	Textura fina	> 35 % Arcilla	0.1
Arcillosa fina (Textura fina)	< 60% Arena	0.2	Textura fina	> 35 % Arcilla	0.1
Franco fina (Textura media)	> 18% ó más de Arcilla	0.1	Textura media	< 35% Arcilla y 65 % Arena	0.3
Franco gruesa (Textura gruesa)	< 18% Arcilla	0.3	Textura gruesa	< 18% Arcilla y 65% Arena	0.2
Arenosa (Textura muy gruesa)	> 60% Arena	0.5	Textura muy gruesa	> 65% Arena	0.5

4.1.2 Análisis de los resultados. El factor textural de los suelos se representa espacialmente para el país en el mapa 5, en él se observa que las mejores texturas (franco finas y arcillosas finas), se encuentran principalmente en la Orinoquía y la Amazonía, en la zona montañosa de la cordillera Oriental e igualmente en algunos sectores de la montaña media a baja de las cordilleras Central y Occidental, además, en la mayor parte de las zonas planas de las regiones Caribe y Pacífica.

Las texturas arenosas y arcillosas muy finas, que son las menos adecuadas para evitar los procesos erosivos se encuentran hacia las vertientes medias a altas de las cordilleras Oriental, Central y Occidental, en algunos sectores de la Orinoquía, la Sierra Nevada de Santa Marta y la Guajira.

Esto indica, que desde el punto de vista del factor textural, las vertientes medias de la cordillera Oriental y la Sierra Nevada de Santa Marta, así como las zonas planas del Pacífico, Caribe, Orinoquía y Amazonía, presentan las mejores características texturales de los suelos en el país, y por lo tanto serían las zonas con mayor resistencia a la erosión, considerando solamente este parámetro.



4.2 ESTABILIDAD DE LA ESTRUCTURA DE LOS SUELOS POR LA AGLUTINACION DE LA MATERIA ORGANICA Y LAS ARCILLAS

La estructura del suelo indica el modo de agregación de las partículas, su origen resulta de procesos de diversa naturaleza: biológicos, químicos y, por último, físicos y mecánicos; el predominio de uno u otro proceso da origen a los diferentes tipos de estructura.

En la formación de la estructura juega un papel muy importante los cementos floculados: se trata de coloides ó en un sentido más amplio, son arcillas, oxihidróxidos, carbonatos y cementos orgánicos, que se encuentran en estado de complejos-organo-minerales, formando puentes o revestimientos alrededor de las partículas minerales gruesas, uniéndolas entre sí, para formar agregados separados. Si no hay suficiente cantidad de cementos o son poco eficaces, la estructura puede hacerse particular (suelta en caso de textura gruesa y coherente en caso de textura fina).

Para establecer la estabilidad de la estructura, se partió de la información obtenida a escala 1:1.500.000 sobre materia orgánica y arcillas, considerando que son coloides electronegativos que representan una fracción importante en la formación de complejos orgánicos y organo-minerales con los cementantes ó aglutinantes, y por lo tanto manifiestan la estabilidad de la estructura edáfica ó resistencia de los suelos a la erosión.

4.2.1 Factor naturaleza de las arcillas. Las arcillas son silicatos de aluminio más o menos hidratados, microcristalinos, con estructura en estratos, presentan propiedades particulares como son: por su carga negativa, retienen cationes en la forma llamada de cambio (pueden ser reemplazados por otros cationes, en determinadas condiciones); algunas arcillas como las expansibles tienen la capacidad de absorber agua; por ser coloides, pueden encontrarse en el suelo en estado disperso ó en estado floculado y por

esto juegan un papel en la formación de agregados, constituyendo junto con la materia orgánica, los cementos de estos agregados.

Metodología para evaluar la naturaleza de las arcillas. La calificación de este componente parte de la clasificación del mapa de arcillas del IGAC, a escala 1:1.500.000, a partir del cual se determina para cada tipo de arcilla de 1 a 5, dependiendo de las características químicas como es la capacidad de intercambio catiónico y sus características mineralógicas como la capacidad de almacenamiento de elementos químicos.

En este rango de ponderación, 5 indica las mejores ofertas naturales, son las arcillas que mantienen mejor los agregados y proporcionan las mejores condiciones nutritivas al suelo. El resultado de calificación se observa en el cuadro 3.

4.2.2 Factor materia orgánica. La materia orgánica del suelo cumple un papel similar al de la arcilla reteniendo agua, las sustancias nutritivas inorgánicas y los materiales nutritivos orgánico; es también importante para mantener la fauna y flora del suelo que con sus hifas y mucílagos aumentan la resistencia de los agregados, a destruirse, a la erosión y para mantener un suelo húmedo con permeabilidad adecuada.

Cuadro 3. Calificación del factor naturaleza de las arcillas

Símbolo	Tipo de Arcilla	Oferta Natural
A	Alofana	5
MTV	Montmorillonita, Vermiculita	4.75
MTK	Montmorillonita, Caolinita	4.5
MTVK	Montmorillonita, Vermiculita, Caolinita	4.5
AKMT	Alofana, Caolinita, Montmorillonita	4.4
MTKV	Montmorillonita, Caolinita, Vermiculita	4.3
MTMV	Montmorillonita, Micas, Vermiculita	4.3
MTKM	Montmorillonita, Caolinita, Micas	4.2
MTMK	Montmorillonita, Micas, Caolinita	4.2
VM	Vermiculita, Micas	3.75
KMTV	Caolinita, Montmorillonita, Vermiculita	3.7
MMTV	Micas, Montmorillonita, Vermiculita	3.7
IAK	Integrados, Alofana, Caolinita	3.6
KA	Caolinita, Alofana	3.5
KVMT	Caolinita, Vermiculita, Montmorillonita	3.5
VKQ	Vermiculita, Caolinita, Cuarzo	3.4
KMA	Caolinita, Micas, Alofana	3.02
KVMT	Caolinita, Micas, Montmorillonita	3.02
K	Caolinita	3
KI	Caolinita, Integrados	3
KIM	Caolinita, Integrados, Micas	3
KM	Caolinita, Micas	3
KMI	Caolinita, Micas, Integrados	3
MK	Micas, Caolinita	3
KIG	Caolinita, Integrados, Gibsita	2.9
KIQ	Caolinita, Integrados, Cuarzo	2.8
KMQ	Caolinita, Micas, Cuarzo	2.8
KQ	Caolinita, Cuarzo	2.8
KG	Caolinita, Gibsita	2.75
KGI	Caolinita, Gibsita, Integrados	2.7
Q	Cuarzo	1

Fuente: IDEAM, 2000.

Como la materia orgánica se acumula cerca de la superficie del suelo, parece que es susceptible primero a erosionarse, pero debido a su alta permeabilidad, a los complejos organominerales estables y a la resistencia de los agregados, reducen al mínimo el peligro de flujo superficial; su pérdida depende más de la cubierta vegetal y su manejo, por eso es importante el factor de protección que brinda la vegetación y la adición de materia vegetal muerta al suelo para que mantenga un stock de materia orgánica renovada.

El proceso de erosión aumentará a medida en que disminuya la cubierta vegetal y el humus, esto traerá como consecuencia una pérdida proporcional de sustancias nutritivas,

una reducción importante en la humedad del suelo y una menor oferta edáfica para mantener una cobertura vegetal protectora.

Metodología para evaluar la Materia Orgánica. Para calcular este componente, se utilizó el mapa de carbono orgánico en los suelos a escala 1:1.500.000 del IGAC. Este mapa presenta una información acerca del % de Carbono presente en los suelos del país, desde el punto de vista de cantidad más no de calidad, debido a que no existe la información para todo el país. Se consideró para esta evaluación la cantidad e indirectamente la calidad a partir de la biodegradación y su relación con la temperatura como se explicará más adelante.

Este valor de % C se tomó y se calificó de 1 a 5, teniendo en cuenta que a mayor cantidad, mayor oportunidad tiene la materia orgánica de ejercer su labor de cementante, la calificación de 5 indica la relación más alta del % de materia orgánica, la cual puede impartir al suelo una mayor estabilidad para sus agregados, aumentando así el grado de resistencia a la erosión, en caso contrario tomará el valor de 1. La calificación determinada para este factor se presenta en el siguiente cuadro:

Cuadro 4. Calificación del factor materia orgánica

Clase	Valor % C	Calificación
Muy bajo	< 1%	1
Bajo	1-1.5%	2
Medio	1.5-2.5%	3
Alto	2.5-6%	4
Muy Alto	>6%	5

Fuente: IDEAM, 2000. Modelo de susceptibilidad de los suelos a la estabilidad.

4.2.3 Estabilidad de la estructura del suelo. La estabilidad de la estructura se define como la resistencia de los agregados del suelo a desintegrarse por la acción del agua y

por el manipuleo. Mientras mayor sea la estabilidad, mayor será la resistencia de un suelo a la erosión.

La agregación del suelo y la estabilidad estructural son favorecidas como se indicó anteriormente por la presencia de materia orgánica, arcillas y óxidos de hierro y aluminio, igualmente, de las características que transmiten las rocas a los suelos y de la acción del clima.

Con la calificación obtenida para la materia orgánica y la naturaleza de las arcillas, se obtuvieron los valores de aglutinación, a partir de la definición de una matriz de ponderación (ver Cuadro 5). Estos valores se llevan a 5 rangos teniendo en cuenta a partir de que valor se encuentran las mejores condiciones para obtener una máxima floculación ó cementación (Cuadro 6).

Cuadro 5. Matriz de ponderación para evaluar la aglutinación entre la materia orgánica y las arcillas

Arcillas	% de carbono				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	3.5	4.2
2.7	1.2	2.2	3.12	3.6	4.25
2.75	1.25	2.25	3.14	3.64	4.3
2.8	1.3	2.32	3.16	3.66	4.35
2.9	1.39	2.38	3.18	3.68	4.38
3	1.4	2.4	3.2	3.7	4.6
3.02	1.42	2.42	3.22	3.72	4.64
3.4	1.46	2.46	3.24	3.73	4.70
3.5	1.48	2.5	3.25	3.74	4.72
3.6	1.5	2.52	3.26	3.75	4.76
3.7	1.55	2.54	3.27	3.76	4.77
3.75	1.59	2.58	3.28	3.78	4.78
4	1.6	2.6	3.3	3.8	4.8
4.2	1.64	2.68	3.32	3.82	4.82
4.3	1.68	2.72	3.34	3.84	4.86
4.4	1.72	2.74	3.36	3.86	4.92
4.5	1.75	2.75	3.37	3.88	4.96
4.75	1.78	2.78	3.38	3.9	4.98
5	1.8	2.8	3.4	4	5

Fuente: IDEAM, 2000. Modelo de susceptibilidad de los suelos a la estabilidad.

Cuadro 6. Rangos para los valores de aglutinación de la materia orgánica y las arcillas

Rango	Descripción	Calificación
1 - 1.72	Muy Baja	5
1.75 - 2.27	Baja	4
2.75 - 3.32	Moderada	3
3.34 - 3.84	Alta	2
3.86 - 5.00	Muy Alta	1

Con la definición de rangos para los valores de aglutinación, se determina que por encima del valor 3.12, se encuentran las mejores condiciones para que tanto la materia orgánica como las arcillas formen estructuras cementantes a los procesos erosivos, a la erosión de la gota de lluvia, al arranque ó desprendimiento y transporte del suelo.

Posteriormente, y teniendo en cuenta que en la evaluación de la materia orgánica se tomó sólo la cantidad y no la calidad, está última se manejó un poco a partir de la temperatura, evaluada a través de la altitud, teniendo claro el siguiente concepto: a menor temperatura se conserva mejor la materia orgánica, a mayor temperatura ésta se biodegrada tan rápido que no permite la oportunidad de tener una materia orgánica constante que ejerza una aglutinación y estructuración estable, pero, igualmente en climas demasiados fríos, aunque la materia orgánica no se biodegrada rápidamente sí se disminuye la eficacia de la cementación.

Con base en lo anterior, la información altitudinal se dividió en cinco rangos (Cuadro 7) y con los rangos de aglutinación, se realizó un nuevo cruce entre los dos mapas temáticos (aglutinación y altitud), definiendo una nueva matriz (Cuadro 8).

Finalmente se obtiene la espacialización de la estabilidad de la estructura del suelo por la aglutinación de la materia orgánica y las arcillas para el país.

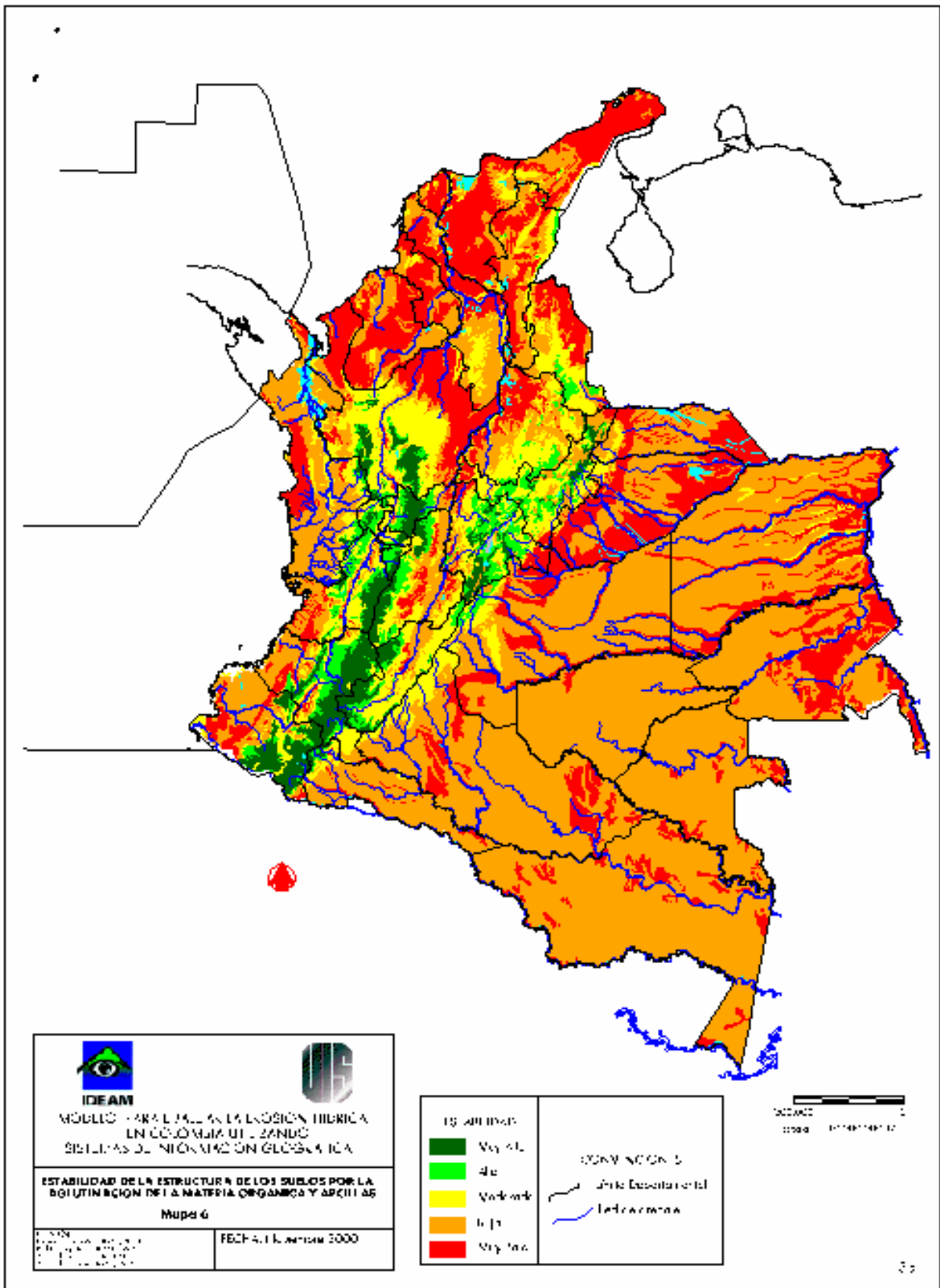
Cuadro 7. Rangos de altitud y calificación

Rangos de altitud	Calificación
0-600	5
601 - 1000	4
1001 - 2000	3
2001 - 5000	2
> 5000	1

Cuadro 8. Matriz de ponderación para evaluar la estructura del suelo

Altitud	Aglutinación				
	5	4	3	2	1
5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2
4	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2
3	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2
2	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1
1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1

Análisis de los resultados. La estabilidad de la estructura de los suelos por la aglutinación de la materia orgánica y las arcillas (Mapa 6), indica que en el país, las áreas que presentan mayor resistencia a la erosión corresponden a aquellas zonas de montaña donde las alturas superan los 2500 m.s.n.m, principalmente hacia la cordillera Central, donde además se encuentran los suelos ricos en cenizas volcánicas (alofanas), de grano fino, las cuales forman complejos organoedáficos que le imparten al suelo una estructura estable, mientras se mantengan los aportes orgánicos que suministran los bosques estratificados andinos.



Aquellos sectores, correspondientes a las vertientes medias, tanto de la cordillera Central como de la Oriental, presentan una estabilidad moderada a baja, son suelos originados de anfibolitas, pizarras, esquistos, son cascajosos, débiles en su estructura, ó provienen de granitos, los cuales originan suelos arenosos, débiles igualmente en su estructura y por lo tanto bastante susceptibles a la erosión.

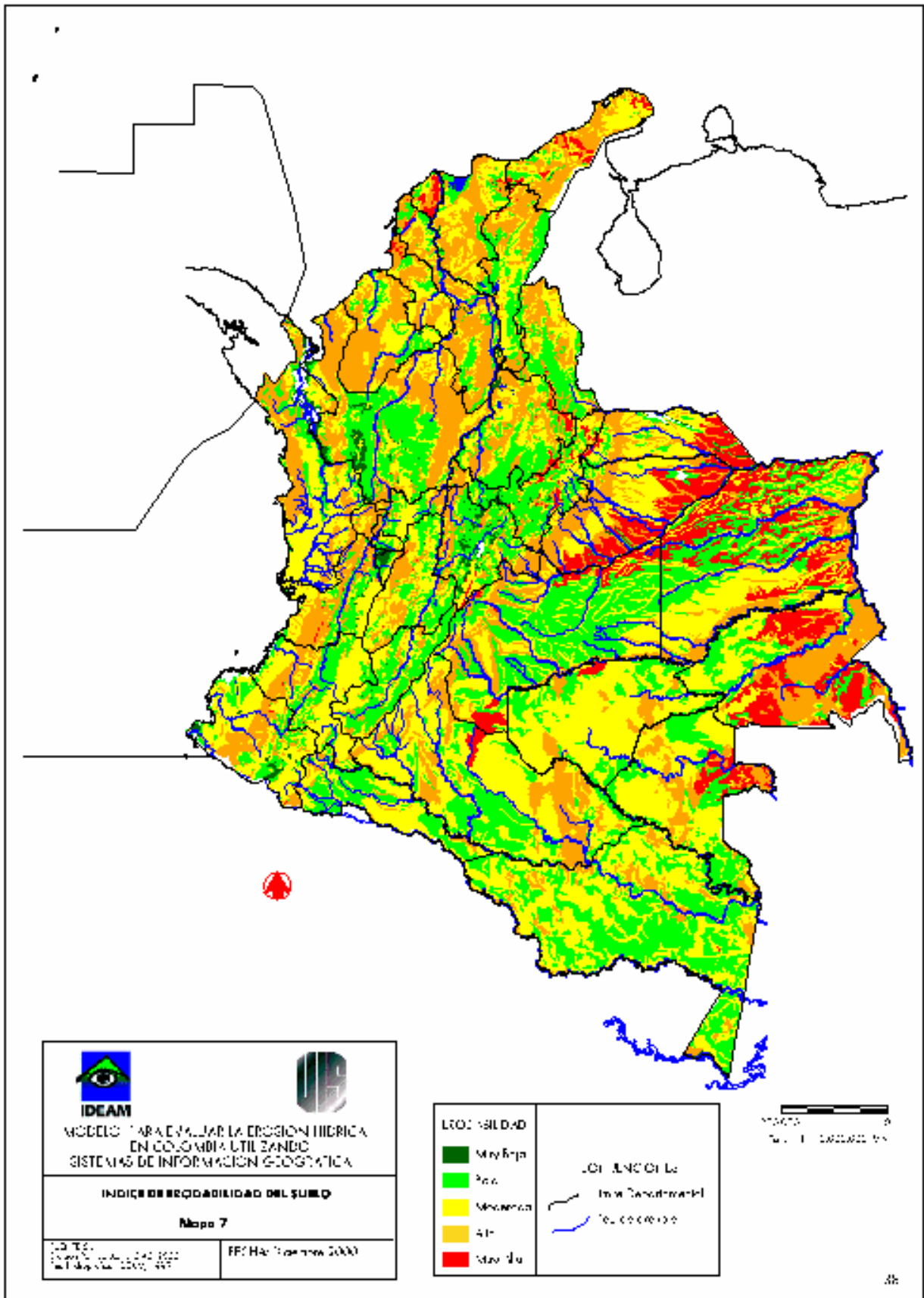
Las estabilidades más bajas se presentan principalmente hacia los sectores planos de la costa Atlántica, estos presentan suelos con excelentes propiedades arcillosas para la cementación de los agregados, pero con pésimas cantidades de materia orgánica que garanticen una mejor aglutinación de los agregados.

4.3 INDICE DE ERODABILIDAD

El índice de erodabilidad del suelo, que es el segundo factor que influye en el riesgo de erosión, se calcula a partir de las propiedades del suelo como son la textura y la estabilidad de la estructura (por aglutinación de la materia orgánica y las arcillas), siendo las más importantes propiedades que condicionan la resistencia a la erosión del suelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los índices para el factor textural y la estabilidad de la estructura del suelo por la aglutinación de la materia orgánica y las arcillas, se determina el índice de erodabilidad para el país.

Estos índices que bien pueden denominarse índices parciales, se suman para establecer los valores de la erodabilidad (factor K ó Índice de erodabilidad) (Cuadro 9), y espacializar finalmente las zonas en el país que presentan mayor o menor resistencia a la acción erosiva (Mapa 7).



Cuadro 9. Índice y clasificación de la erodabilidad del suelo.

Calificación	Índice ó Factor K
Muy Baja	< 0.3
Baja	0.31 - 0.5
Moderada	0.51 - 0.6
Alta	0.61 - 0.8
Muy Alta	> 0.8

4.3.1 Análisis de los resultados. Como se puede observar en el mapa 7, las zonas montañosas de la cordillera Central y Oriental, presentan una resistencia a la erosión bastante alta, esto es debido principalmente en la cordillera Oriental, no sólo a la presencia de cenizas que ejercen sobre los agregados del suelo una fuerte cementación, sino también que las vertientes medias de esta cordillera presentan las mejores características texturales y por lo tanto son las áreas del país más resistentes a la erosión; hacia las zonas más altas principalmente de la cordillera Oriental, el grado de resistencia va disminuyendo, porque igualmente el contenido suelos con cenizas disminuye, la acción de la materia orgánica en estas zonas es menos eficiente para mantener una mayor cementación de los agregados y la textura en estos suelos son las menos adecuadas para evitar los procesos erosivos.

La mayor parte de la región Caribe, presenta una erodabilidad alta, los suelos de estas áreas son poco resistentes a los procesos erosivos, igual sucede que ciertos sectores planos y montañosos, en algunas localidades de la región Andina; gran parte de cordillera Occidental y todo el piedemonte llanero, también se caracterizan por ser poco resistentes a los procesos erosivos. La región de la Orinoquía-Amazonía, presenta en general de moderada a alta resistencia a la erosión, en esta zona se encuentran áreas con un calificativo de erodabilidad alto, el cual cambiará cuando se complemente en trabajos posteriores, la información de oxihidróxidos en el país, muy importantes en esta zona del territorio colombiano.

5. INDICE DE PROTECCION DE LA COBERTURA VEGETAL Y LA PENDIENTE

La cubierta vegetal del suelo que lo protege contra la agresividad de la lluvia influye considerablemente en la erosión, aunque la relación no es lineal, es decir, que una reducción sustancial de la erosión puede presentarse aún cuando el suelo está protegido por una cubierta vegetal de densidad relativamente baja, ésta relación es bastante compleja de calcular.

Existen pocos índices para calcular cuantitativamente la relación entre la vegetación y la pérdida de suelo, el más conocido y utilizado es el índice de protección de la cubierta vegetal frente a la erosión hídrica. Para estudios más detallados, el factor cobertura vegetal puede evaluarse con base en ecuaciones matemáticas establecidas para el cálculo de la biomasa.

La vegetación presenta dos funciones respecto a los procesos erosivos, por una parte cubre con su follaje el suelo, protegiéndolo de las gotas de lluvias especialmente las más intensas, las cuales al caer sobre el suelo desnudo, rompen los agregados del suelo, facilitando de esta manera el arrastre de partículas con el agua de escorrentía. De otro lado el enraizamiento de las plantas, amarra el suelo de tal manera que contrarresta el desprendimiento y arrastre de materiales.

Para el presente trabajo, se considera el índice de protección a partir de la acción protectora de la cobertura del follaje de la vegetación natural y los cultivos, ajustando y determinado los índices para cada una de las unidades del mapa del Sistema de Información del Sector Agropecuario Colombiano - SISAC.

5.1 INDICE DE PROTECCION A PARTIR DEL TIPO DE USO Y MANEJO DEL SUELO

5.1.1 Descripción del SISAC. La información del mapa del SISAC se encuentran clasificada en cuatro grandes grupos que son: tierra en agricultura, tierra en pastos, tierras en bosques y tierras sin uso agropecuario o forestal. Cada una de estas unidades presentan sus divisiones y significados así.

Tierra en agricultura: Se divide en 3 clases de cultivos.

- Cultivos transitorios (Cu): corresponden a áreas con cultivos localizados en diferentes pisos térmicos, de los cuales se puede obtener una ó dos cosechas al año. Dentro de esta categoría se encuentra algodón, arroz, ajonjolí, sorgo, maíz, soya, tabaco, patilla, melón, yuca, frijol, papa, cebada, trigo y hortalizas.
- Cultivos semiperennes: son también áreas con cultivos localizadas en diferentes pisos térmicos, los cuales no requieren sembrarse anualmente como la caña (Cn) y el banano (Ba).
- Cultivos perennes: son áreas cubiertas con cultivos en pisos térmicos medio y cálido, y necesitan renovarse periódicamente. Dentro de esta categoría se encuentra el café asociado con otros cultivos como plátano, yuca y frutales (Cf), la palma africana (Pa), los árboles frutales en cultivos puros o asociados (Fr), y una categoría denominada misceláneos (Me), que generaliza cultivos transitorios, semiperennes y perennes, sin

especificar cuales, los cuales se encuentran mezclados con pastos, rastrojos y/o relictos de bosque.

Tierra en pastos: Presenta cuatro clases de pastos.

- Pastos manejados (Pm): cobertura densa de pastos, con obras de adecuación y/o prácticas agronómicas.
- Pastos naturales o introducidos con cobertura densa (Pn): cobertura densa de pastos, sin obras de adecuación ni prácticas agronómicas.
- Pastos naturales o introducidos con cobertura rala (Pn1): cobertura rala de pastos, principalmente, sin obras de adecuación y sin prácticas agronómicas.
- Pastos con rastrojo (Pn/Ra): Areas con cobertura de pastos mezclados con rastrojo.

Tierra en bosques: Presenta cinco clases de bosques.

- Bosque primario (Bp): Areas en donde no se han realizado aprovechamientos madereros y la intervención humana es mínima.
- Bosque intervenido (Bi): Areas en donde se han efectuado aprovechamientos selectivos de especies y sobre las cuales se han establecido pastos y cultivos de subsistencia.
- Bosque plantado (Bpt): Areas cultivadas con especies maderables.
- Sabana arbustiva (Sb): Areas que presentan vegetación de tipo arbustivo sobre superficies onduladas.
- Vegetación xerofítica (Xe): Areas con vegetación de tipo achaparrado, espinosa y de poca densidad.

Tierras sin uso agropecuario o forestal: Se dividen en cuatro clases.

- Pantanos y ciénagas (Pa-CI): son áreas inundadas con vegetación herbácea y de tipo arbustivo.
- Pajonales y/o zonas sin cobertura vegetal (Pe): corresponde a áreas con escasa o ninguna cobertura vegetal.
- Rastrojo (Ra): son áreas con vegetación herbácea o arbustiva.
- Páramos y nieves perpetuas (P-N): Areas con vegetación propia de páramos y regiones nivales.

5.1.2 Uso y manejo del suelo. Con el fin de conocer en forma más completa la información sobre cultivos en el país y su relación con los procesos erosivos, se obtuvo información por parte de las UMATAS sobre el tipo de cultivos y el área que ocupan en cada municipio.

Esta información fue depurada y analizada inicialmente para los municipios correspondientes a la cuenca Magdalena-Cauca, no solo para la ejecución del presente trabajo, sino también para los estudios de investigación que se adelantan en el IDEAM sobre: *Modelo de evaluación, seguimiento y monitoreo de los impactos ambientales en los suelos colombianos por la agricultura intensiva* (Gómez, C. 2001) y *Efectos de los plaguicidas en el suelo, agua y aire en la cuenca Magdalena-Cauca* (Coy, G. 2001).

A partir de este análisis, se determinaron 62 cultivos para la cuenca Magdalena-Cauca (Cuadro 10), los cuales se identificaron con los números 1 ó 2, dependiendo de la tecnología aplicada, 1 corresponde a cultivos tecnificados y 2 para cultivos tradicionales, igualmente, se determinó si el cultivo era transicional ó permanente, la demanda de

plaguicida que necesita el cultivo y el grado de protección que ejerce al suelo, valor importante para el trabajo en desarrollo.

Cuadro 10. Índice de protección para los cultivos de la cuenca Magdalena - Cauca

Cultivos	Clase cultivo: Transitorio (T) Permanente (P)	Tecnología	Protección contra la erosión
Aguacate(1)	P	1	0.15
Aguacate(2)	P	2	0.11
Ajonjolí(1)	T	1	0.225
Algodón(1)	T	1	0.225
Arracacha(2)	T	2	0.45
Arroz riego(1)	T	1	0.225
Arroz sec man(2)	T	2	0.11
Arroz sec mec(1)	T	1	0.15
Arveja(2)	T	2	0.225
Banano(1) Magdalena	P	1	0.15
Cacao	P	2	0.04
Café(2)	P	2	0.045
Café(3)	P	1	0.15
Caña azúcar(1)	P	1	0.064
Caña miel(2)	P	2	0.064
Caña panela(1) Santander	P	2	0.064
Cebada	T	1	0.225
Cebada(2)	T	2	0.225
Cebolla bulbo(1) y (2)	T	1	0.45
Cebolla bulbo(2)	T	2	0.45
Cebolla j. (1)	T	1	0.15
Cítricos(1) Caldas	P	1	0.15
Cítricos(2)	P	2	0.11
Coco(2)	P	2	0.15
Curuba(1) y (2)	P	2	0.075
Curuba(1) y (2)	P	1	0.075
Chontaduro(2)	P	2	0.075
Fique(2)	P	2	0.15
Frijol	T	2	0.225
Frijol(1) Cauca	T	1	0.225
Granadilla(1) y (2)	P	1	0.11
Gayaba(2)	P	2	0.05
Haba(2)	T	2	0.225
Limón(1) y (2)	P	1	0.15
Limón(1) y (2)	P	2	0.15
Maíz tecnificado(1)	T	1	0.225
Maíz tradicional(2)	T	2	0.225
Mango(2)	P	2	0.15
Maní	T	2	0.225

Maracuya	P	1	0.11
Millo	T	1	0.225
Mora	P	2	0.225
Naranja(2)	P	2	0.075
Name	T	2	0.45
Palma africana Cesar	P	1	0.15
Papa	T	1	0.45
Patilla	T	2	0.15
Pera(2)	P	2	0.15
Piña	T	2	0.225
Plátano(1) Caldas	P	1	0.15
Plátano(2)	P	2	0.075
Repollo(1)	T	1	0.225
Sorgo(1)	T	1	0.225
Soya(1)	T	1	0.225
Tabaco negro(1)	P	1	0.225
Tabaco negro(2)	P	2	0.11
Tabaco rubio(1)	T	1	0.225
Tomate	T	1	0.225
Tomate de árbol(1) y (2)	P	1	0.11
Tomate de árbol(1) y (2)		2	0.11
Trigo	T	1	0.225
Uva	P	1	0.15
Yuca(2)	P	2	0.45
Zanahoria(1)	T	1	0.45

5.1.3 Evaluación del índice de protección. La evaluación de este índice se hizo para todas las unidades del mapa del SISAC. Para determinar los índices de protección (Ver Gráfico 24) no sólo de los cultivos sino también de las unidades de pastos y bosques, sé revisó la bibliografía existente para este factor, con lo cual se pudo determinar que a medida que los índices se aproximan a 1, menor es su protección al suelo y mientras más se aproximan a cero, mayor es su efecto protector; partiendo de este concepto y homologando diferentes índices para varios cultivos en el país, se determinaron los índices del cuadro 10, para los cultivos de la cuenca Magdalena-Cauca.

Para las tierras de pastos y bosques del mapa del SISAC, la evaluación del índice parte del mismo concepto anterior, el resultado es homologado con la clasificación realizada por Gómez, C. 2001, para evaluar el grado de protección contra la erosión con base en la densidad de la cobertura vegetal identificadas para 10 usos mayores del suelo (Ver Cuadro 11).

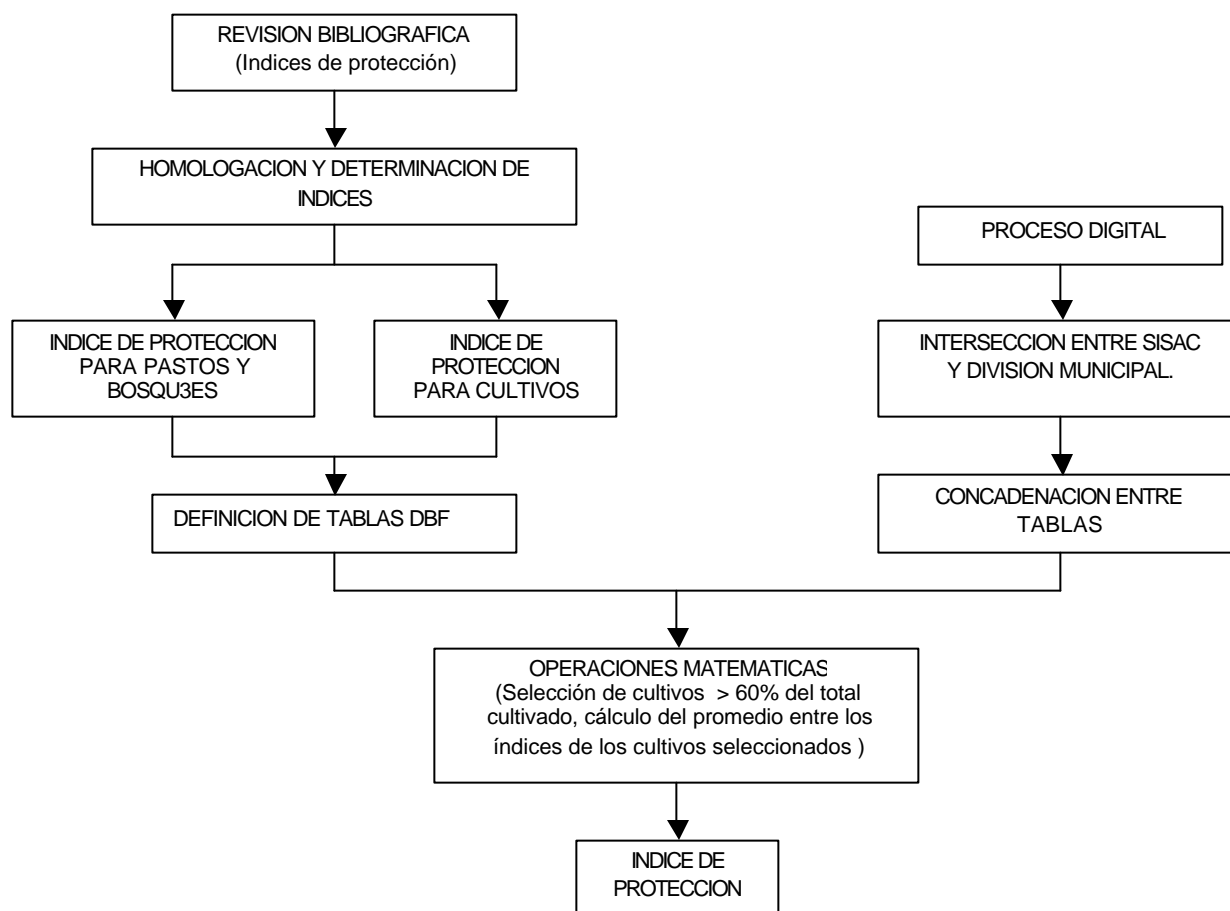


Gráfico 24. Procedimiento para evaluar el índice de protección

Como la descripción de las unidades Cu y Me por municipio son bastante generales, comparadas con la información suministrada por las UMATAS, los índices para las unidades Cu y Me se determinaron por municipio de la siguiente manera: Cada municipio

Cuadro 11. Índices de protección para las unidades del SISAC diferentes a Cu y Me.

Unidades del SISAC	Índice de protección	Usos mayores del suelo	Grado de protección
		Cultivo limpio tubérculo (papa, yuca, zanahoria)	Red
Pajonales y zonas sin cobertura vegetal	0.225	Cultivo limpio (hortalizas, piña, tabaco, tomate, maíz, cereales)	
Xerofitia	0.225		
Frutales	0.15	Cultivo semilimpio (agrícola) café plena exposición, fique, papaya, plátano, palma africana, frutales.	Red
		Sistema silvoagrícola (limpio)	
Pastos naturales ó introducidos con cobertura rala	0.09	Cultivo semilimpio (pastoreo)	Red
Rastrojo	0.075	Sistema silvoagrícola (semilimpio)	Light Red
Pastos mejorados	0.064	Cultivo denso (caña de azúcar, pasto de corte)	Orange
Pasto con rastrojo	0.065		
Pastos naturales	0.056	Sistema silvopastoril	Light Red
Sabana arbustiva	0.056		
		Sistema silvoagrícola (denso)	Yellow
		Silvoagrícola (café arábigo)	Green
		Bosque comercial o cultivo de cacao	Light Green
Bosque intervenido	0.0375	Bosque productor-protector	Light Green
Bosque primario	0.0346	Bosque protector	Dark Green
Páramos	0.0346		

Fuente: Adaptado de Gómez, C. 2001.

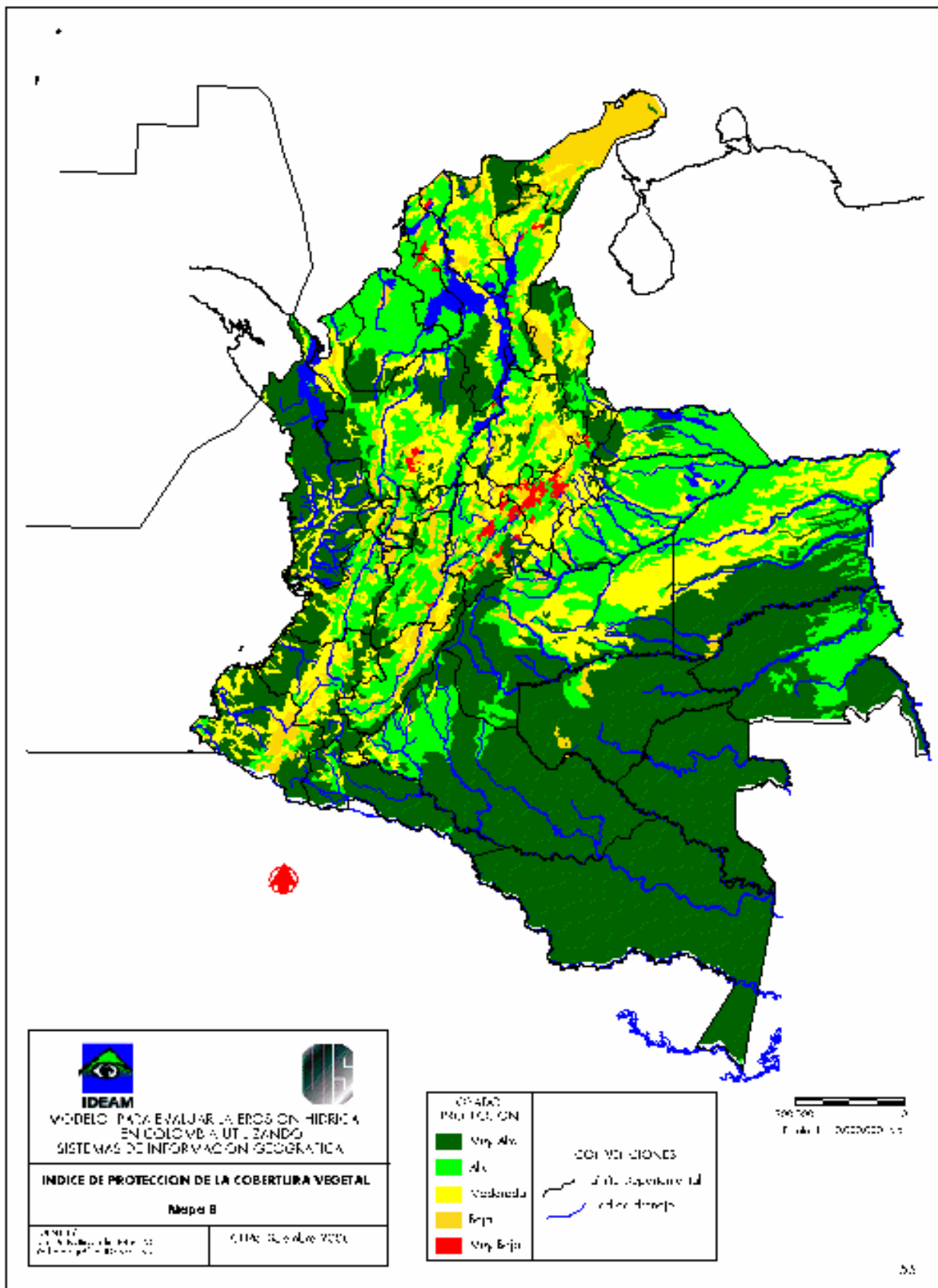
presenta una serie de cultivos, cada uno con su propio índice de protección como se anotó en el cuadro 10; no es indicado realizar una sumatoria de todas las hectáreas de los cultivos puesto que hay extensiones bastante representativas en el municipio frente a otras muy pequeñas, por lo tanto se decidió tomar en primer lugar los cultivos que tuvieran la mayor extensión en el municipio y cuya sumatoria representara más del 60% del valor total cultivado; posteriormente, se calcula el promedio entre los índices de esos cultivos y se obtiene el índice de protección de las unidades Cu y Me por municipio (Cuadro 12).

Cuadro 12. Ejemplo del cálculo para hallar el índice de protección para las unidades Cu y Me por municipio

Municipio	Principales cultivos	Total (Ha)	Índice de protección
ABEJORRAL	MAIZ(2)	11,2	0,2250
	CAFÉ(1)	34,0	0,2000
	PLATANO(2)	21,9	0,0750
	PAPA(1)	13,0	0,4500
	Total	80,0	0,2375
ABRIAQUI	FRIJOL(2)	43,2	0,2250
	CAFÉ(1)	26,3	0,2000
	Total	69,5	0,2125

Análisis de los resultados. Es importante anotar primero que el área representada en el mapa se encuentra amarrada al área de digitalización de las unidades Cu y Me del SISAC, hasta el momento, no se ha podido obtener la información digital de todos los cultivos y las respectivas áreas en el país para lograr su ubicación exacta, por lo tanto, este resultado es una primera aproximación a nivel nacional; en segundo lugar, se trabajaron los departamentos que pertenecen a la cuenca Magdalena-Cauca.

El mapa 8, representa el índice de protección de la vegetación y los cultivos para el país; las áreas identificadas con muy baja protección y con una extensión importante, se encuentran principalmente en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Antioquia, corresponden a sectores agrícolas de la zona montañosa de la cordillera Oriental, donde predomina los cultivos limpios transitorios de papa, cebada y trigo, que poco ó ningún grado de protección le proporcionan al suelo; áreas más pequeñas dentro de esta categoría de protección se encuentran en los departamentos de Sucre, Cesar, Bolívar y Atlántico, pero a diferencia de los anteriores departamentos, los cultivos que aquí predominan y a los cuales se debe la baja protección son el maíz y la yuca, igualmente correspondientes a cultivos limpios transitorios, pero localizados en una zona plana.



Las áreas identificadas con un índice de protección bajo, se encuentran en gran parte del territorio nacional, su valor de protección está definido en los departamentos de la región Caribe como Atlántico, Magdalena, Bolívar, Cesar, Córdoba, por áreas con pajonales y cultivos principalmente de banano, arroz, palma africana, plátano y yuca; en La Guajira, por grandes extensiones de vegetación xerofitia y pajonales; en algunos departamentos de la región Andina como Antioquia, Santander, Tolima, Caldas, Cundinamaraca, Valle y Nariño, el grado de protección se debe a zonas donde los cultivos principales son el café, banano, arroz de riego y la caña panelera; todos los anteriores usos del suelo ejercen un grado de protección bajo.

En el país, las áreas calificadas con un índice de protección moderada corresponden primero, a hectáreas representativas de palma africana en los departamentos de Magdalena, Cesar y Bolívar; segundo, a áreas cultivadas de caña panelera en Antioquia y Valle del Cauca, de cacao y guayaba en Santander, de plátano en el Quindío y de arroz de riego en el departamento del Tolima; tercero, zonas con rastrojo y pastos naturales con rastrojo en los departamentos de La Guajira, Norte de Santander, Chocó, Córdoba, Boyacá, Arauca, Casanare, Caldas, Vichada, Cundinamarca, Cauca, Huila y Nariño.

Las zonas con pastos naturales y pastos mejorados tienen un índice de protección hacia el suelo alta, la mayor parte de los departamentos del país tiene áreas con este tipo de vegetación.

Las regiones de la Amazonía, del Pacífico, parte de la Orinoquía y algunos departamentos de la región Andina, donde aún se encuentran extensiones de bosque primario, bosque intervenido, páramos y sabanas arbustivas, presentan el mayor índice de protección al suelo y por lo tanto serán las áreas con menores procesos de erosión hídrica.

5.2 PENDIENTE DEL TERRENO

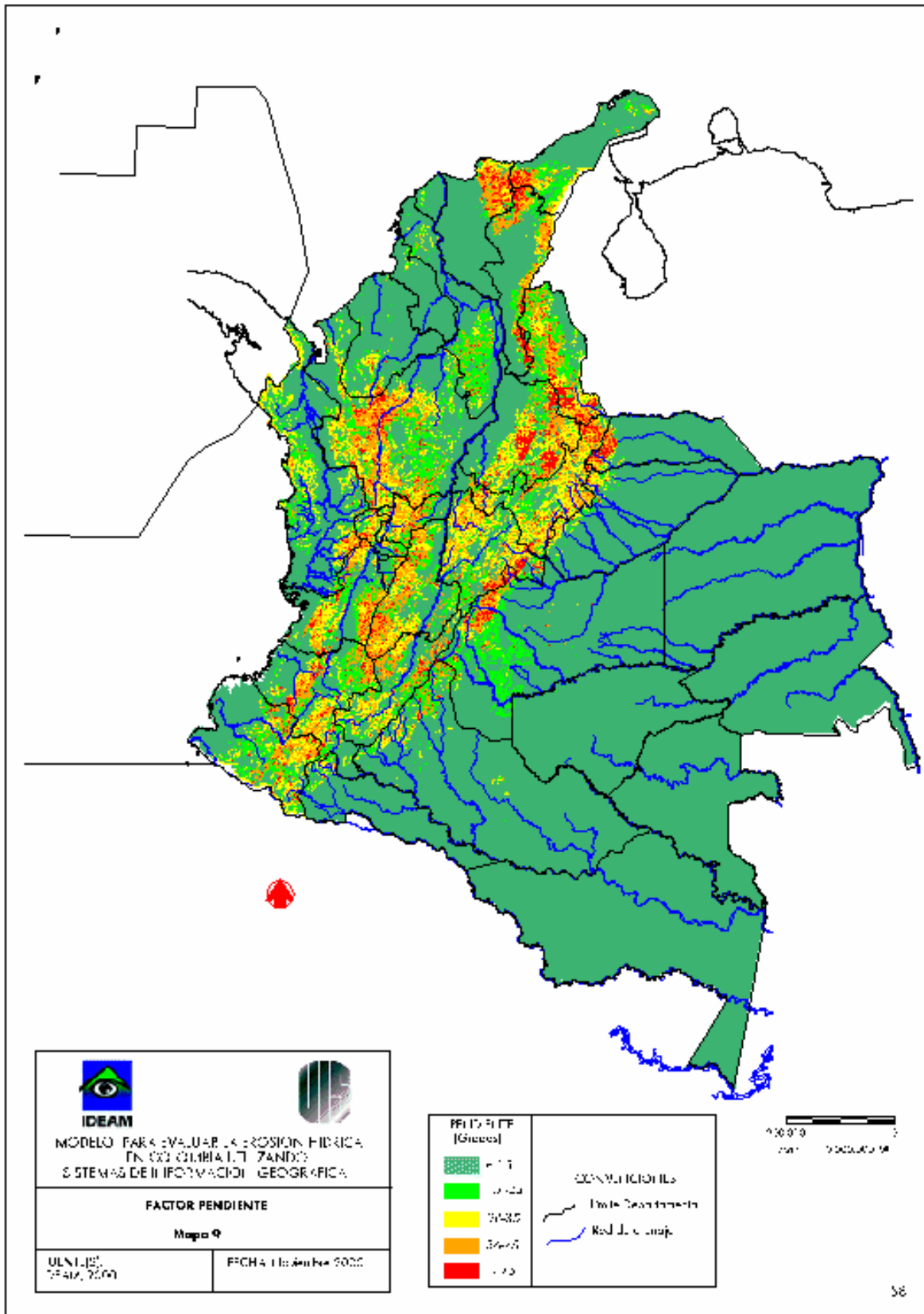
Este factor es importante en los estudios de erosión, por eso, la determinación de este índice está ligado a la escala de trabajo y son el reflejo directo de la erosionabilidad del suelo a medida que los índices crecen en valor.

Para el presente trabajo como es a escala nacional, la información se tomó a partir del mapa de pendientes elaborado por la Subdirección de Geomorfología y Suelos del IDEAM en el año 2000 (Mapa 9), a partir de la información de curvas de nivel provenientes de la cartografía IGAC digitalizada por el DANE, a diferentes escalas (1:25.0000, 1:100.000 y 1:200.000).

Para determinar el índice del factor pendiente, los valores del mapa anterior corresponden a la inclinación, los cuales se dividen en 5 clases, correlacionadas con los rangos e índices que Suárez, J. 1998, retomó para el país de Ambalagan, 1992 (Cuadro 13).

Cuadro 13. Índices para el factor pendiente

Valor de la pendiente	Rango de la pendiente	Índice
> 45°	> 45°	2
45°	36°- 45°	1.7
30°	26°- 35°	1.2
15°	15° -25°	0.8
< 15°	<= 15°	0.5



6. EROSION HIDRICA ACTUAL Ó PERDIDA DE SUELO

El cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica, es considerablemente compleja, debido a la cantidad de variables que se interrelacionan; para que la estimación a nivel nacional sea válida, el modelo está basado en procesos físicos para pequeños componentes del proceso de erosión como por ejemplo: la erosión por el impacto de la lluvia (índice de erosividad), la medida en que el suelo está expuesto o cubierto por la vegetación (índice de protección), y el tipo de suelo (erodabilidad).

El mapa de erosión hídrica actual ó pérdida de suelo parte de la aplicación de un modelo de factores, que es un modelo empírico donde cada una de las variables, en este caso los índices de erosividad, erodabilidad, protección y pendiente, están cuantificados y luego se combinan multiplicándolos espacialmente pixel a pixel. Para facilitar los cálculos, la información espacial correspondiente a cada uno de los mapas índices fue inicialmente depurada, y luego, rasterizada, para realizar la operación matemática de multiplicación utilizando una herramienta SIG, que permite manejar y analizar importantes volúmenes de información (Gráfico 25).

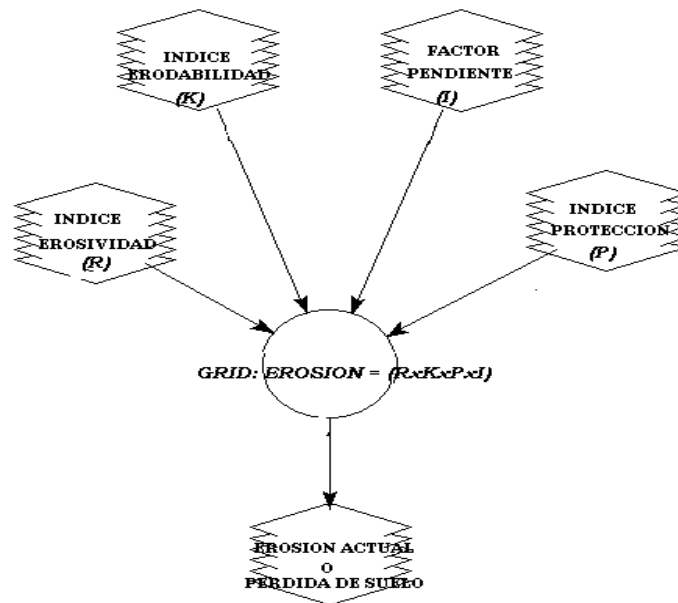
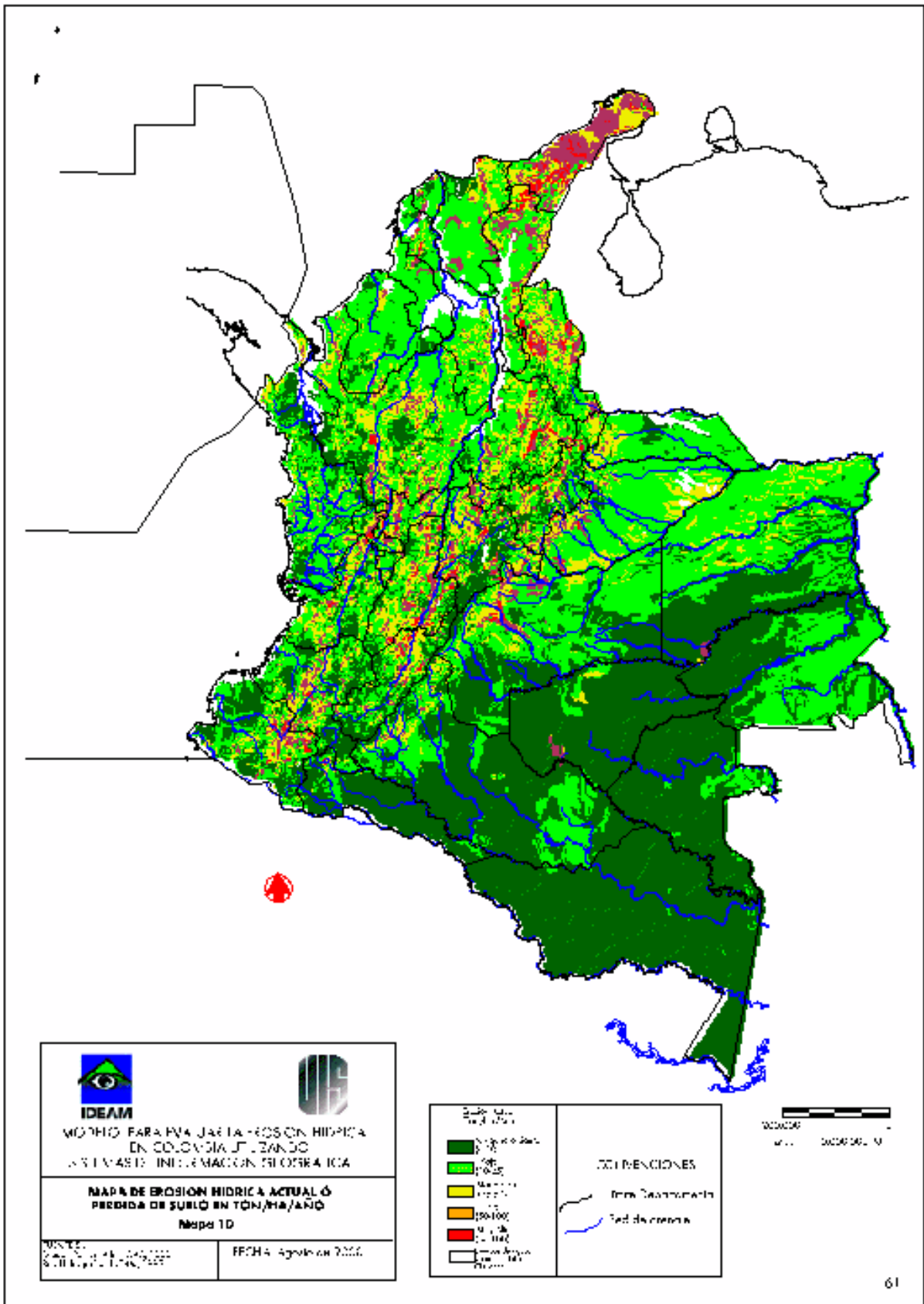


Gráfico 25. Modelo espacial para evaluar la erosión hídrica

Los resultados obtenidos a partir del análisis espacial se plasman en el mapa 10, donde se determinan las zonas más afectadas en el país por erosión hídrica. Los valores de pérdida de suelo encontrados oscilan entre 1.66 y 426 Ton/Ha/Año y son agrupados en intervalos ó clases de degradación, los cuales permitan localizar, de forma rápida y precisa, las zonas de máximo riesgo. Los niveles de pérdida de suelo considerados son las siguientes:

Cuadro 14. Datos de erosión hídrica actual ó pérdida de suelo

Clase de degradación	Pérdida de suelo (Ton/Ha/Año)
Ninguna ó ligera	< 10
Erosión baja	10-25
Erosión moderada	25-50
Erosión alta	50-100
Erosión muy alta	> 100



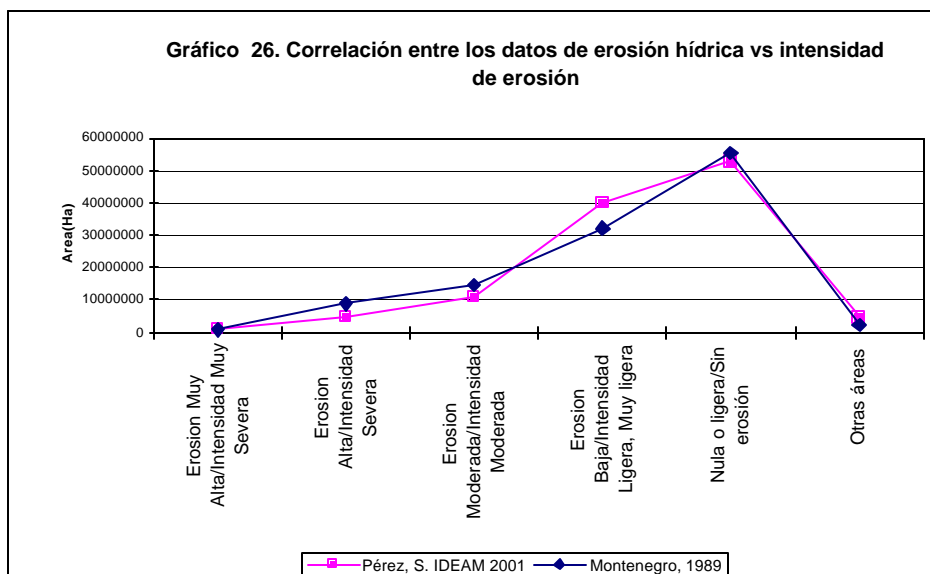
El mapa de erosión hídrica actual muestra que la zona de los valles interandinos, así como las vertientes medias a bajas y algunos sectores de la parte montañosa alta del país tienen pérdidas significativas de suelo y representan el 14.83% del territorio nacional (Cuadro 15); aunque el 81,08% del territorio no presenta problemas graves de erosión, aquellas áreas que actualmente están en riesgo son las que presentan erosión moderada a alta, estos sitios son los que actualmente obedecen un tratamiento especial, con prácticas de conservación eficientes y tecnologías apropiadas, para evitar que el proceso de erosión siga avanzando y llegue hasta niveles irreversibles.

Las zonas identificadas con muy alta erosión, como por ejemplo las cuencas medias y bajas de los ríos Chicamocha, Suárez en Santander, Juanambú y Patía en Nariño, Villa de Leyva en Boyacá y el Desierto de la Tatacoa en el Huila, así como la vertiente Sur Oriental de la Sierra Nevada de Santa Marta, son áreas donde el proceso de erosión ha hecho que se pierdan más de 100 ton/ha/año de suelo, por lo tanto, estas zonas ha perdido su fertilidad natural y allí el proceso de erosión es irreversible.

Los resultados obtenidos fueron correlacionados con los valores de intensidad de erosión de Montenegro, 1989 en INAT, 1996 (Cuadro 15 y Gráfico 26), en donde se observa que existe un ajuste bastante importante entre ambos resultados, la diferencia entre estos datos se debe a las metodologías utilizadas.

Cuadro 15. Correlación entre los datos de erosión hídrica vs intensidad de erosión

Erosión Hídrica Actual (Pérez, S. IDEAM, 2001)	Superficie (Ha)	% de área	Intensidad Erosión (Montenegro, 1989)	Superficie (Ha)	% de área
Erosion Muy Alta	1.035.570.4	0.9	Muy severa	829.757	0.73
Erosion Alta	5.007.789.08	4.38	Severa	8.875.575	7.77
Erosion Moderada	10.909.715.1	9.55	Moderada	14.703.750	12.88
Erosion Baja	39.863.472.1	34.91	Ligera, Muy Ligera	32.134.896	28.14
Nula o ligera	52.724.096.9	46.17	Sin erosión	55.371.995	48.49
Otras áreas	4.634.156.42	4.05	Otras áreas	2.259.049	1.98
Total	114.174.800	100	Total	114.174.800	100



Para obtener una información más precisa acerca de la erosión hídrica actual, que sirva para facilitar en el futuro el rendimiento de sedimentos en las diferentes cuencas del país, se presentan los resultados de pérdida de suelos por cuencas (Cuadro 16). Como se puede observar, las cuencas correspondientes a: Alta Guajira, Baja Guajira, Río Cesar, Directos Norte Sierra Nevada, Río Catatumbo, Alto Patía, Bajo Patía, Río Micay, Medio Cauca, Río Sogamoso, Alto Meta, Alto Magdalena y Medio Magdalena, son las que presentan mayor degradación de los suelos por erosión hídrica; la pérdida de suelo en estas cuencas es mayor a las 25 tn/ha/año, sin embargo, son zonas importantes para realizarles el seguimiento y monitoreo, debido a que gran parte de su extensión presenta erosión moderada que llegará a ser crítica (erosión alta), si no se toman las medidas preventivas a tiempo con una buena planificación en el uso del suelo.

Cuadro 16. Pérdida de suelos en hectáreas y porcentaje para la subcuencas del país

Cuenca	Muy Alta (Ha)	% Muy Alta	Alta (Ha)	% Alta	Moderada (Ha)	% Mod	Baja (Ha)	% Baja	Muy Baja (Ha)	% Muy Baja
Alta Guajira	68958	6,6	832213	79,8	119419	11,4	19683	1,8	2539	0,24
Baja Guajira	88028	18,0	251735	51,5	100553	20,5	47713	9,7	232	0,04
Rio Cesar	107369	5.1	439526	21.0	420504	20.1	1075103	51.4	48235	2.3
Directos Norte Sierra Nevada	16988	3.6	87394	18.6	203147	43.2	139719	29.7	23064	4.9
Río Catatumbo	87220	5.4	287742	17.7	524194	32.3	647939	39.9	75200	4.6
Alto Patia	51494	5,3	167359	17,3	247569	25,6	343457	35,6	155601	16,1
Río Micay			55320	14.8	80321	21.4	165598	44.2	73243	19.6
Medio Cauca	69028	3.6	260884	13.7	573378	30.1	797686	41.9	201921	10.6
Río Sogamoso	119175	5.2	258254	11.3	554890	24.3	880153	38.5	475592	20.8
Alto Meta	30997	0,8	396722	10,0	603025	15,1	2176856	54,6	777620	19,5
Alto Magdalena	190182	3,6	509164	9,7	1218496	23,3	1733991	33,2	1577981	30,2
Bajo Patía	31402	2.4	122104	9.4	221426	17.1	509877	39.4	409048	31.6
Medio Magdalena	75717	1.4	510911	9.2	1438234	25.8	3035991	54.5	511736	9.2
Río Coyanero-Dagua	3802	0.5	52033	7.2	181615	25.0	337620	46.5	151181	20.8
Alto Cauca	26464	1,2	157644	7,0	430898	19,3	975730	43,6	645619	28,9
Bajo Magdalena	9094	0,3	232581	6,6	249699	7,1	2783112	78,6	265392	7,5
Directos Occ. Sierra Nevada	6893	0.9	49207	6.3	167828	21.5	413109	52.9	143175	18.4
Sabana de Bogotá	14934	4.6	18481	5.7	44754	13.8	75225	23.1	171916	52.8
Río San Juan	11825	0.8	67037	4.4	227230	15.0	940544	62.0	271293	17.9
Río Nechí	4393	0.3	74888	4.9	324013	21.2	820314	53.6	306270	20.0
Río Baudó Directos			28714	3.1	166700	17.8	607979	65.0	131350	14.1
Alto Caquetá	7977	0,4	25548	1,4	152240	8,2	855750	46,0	819039	44,0
Alto Guaviare	41982	1,2	99114	2,8	306261	8,7	1145187	32,7	1908220	54,5
Río Arauca			42130	2.8	198221	13.2	1061172	70.7	198612	13.2
Río Sinú-Caribe			65663	2.3	417020	14.5	2050921	71.2	345913	12.0
Bajo Cauca			8044	2,2	54741	15,2	289823	80,7	6710	1,9

Bajo Meta	14238	0,2	128093	2,0	1023211	16,2	4782627	75,5	384372	6,1
Medio Guaviare			55968	1.6	31466	0.9	624307	17.9	2782953	79.6
Río Mira-Guiza			6619	1.3	35531	6.8	200223	38.3	280899	53.7
Río Atrato			29514	1.1	325332	11.7	1395665	50.1	1036167	37.2
Río Tolo			656	1.1	10075	17.5	35417	61.6	11317	19.7
Río Apaporis			54106	1.1	6136	0.1	220386	4.4	4727881	94.4
Río Saquianga-Patía Norte			8830	1.0	62413	6.9	356088	39.2	480580	52.9
Bajo Caquetá			11257	0,1	155095	1,2	2178814	16,8	10647166	81,9
Río Inirida					47250	0.9	1148312	21.4	4158372	77.7
Río Putumayo					14522	0.3	258197	4.7	5229467	95.0
Río Tomo-Tuparro					360949	11.4	2313157	72.9	497059	15.7
Río Vaupés							934090	20.7	3582570	79.3
Río Vichada					77001	2.7	1932927	68.6	807048	28.6
Río Vita					105340	8.5	1053584	85.5	73601	6.0
Bajo Guaviare							601186	25.1	1793760	74.9
Río Atabapo							384115	82.4	81869	17.6
Río Pure							16128	1.8	897631	98.2
Río Guanía							1476511	68.4	682697	31.6

7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

- El enfoque general del estudio, es la evaluación cuantitativa a nivel nacional, los resultados no están orientados a medidas puntuales especificadas de manera detallada en relación con la erosión.
- La aplicación del sistema de información geográfica permitió implementar un modelo para el cálculo de la pérdida de suelo y generar los correspondientes mapas temáticos.
- Los mejores resultados para encontrar el índice de erosividad de la lluvia fue la interpolación de las isolíneas individuales para las seis áreas hidrográficas, teniendo en cuenta la escala de trabajo y siguiendo las recomendaciones anotadas en el Proyecto Erosión (Rey, J. IDEAM, 1996).
- Los índices propuestos fueron determinados para la escala de trabajo con base en la información disponible, para estudios más detallados el rango de estos índices se modificarán.
- El mantenimiento de una cubierta vegetal en las zonas críticas sería suficiente para minimizar e incluso eliminar los procesos erosivos relacionados con la erosión hídrica.
- El 81.08% del territorio nacional no presenta problemas graves de erosión, el otro 14.83% corresponde a pérdidas significativas de suelo presente en 13 cuencas del país.
- El índice de erodabilidad del suelo para esta escala puede detallarse con índices litológicos que permitan evaluar la relación entre el tipo de roca y la resistencia a la erosión.

- Los resultados alcanzados mediante la aplicación del modelo son estáticos para series históricas de precipitación obtenidos hasta el año 1993, para que el modelo sea dinámico, deberá ser sometido a evaluación multitemporal, utilizando la información de otros temáticos en el instituto, incluso en tiempo real.
- Parece evidente que el mantenimiento de una cubierta vegetal en las zonas críticas sería suficiente para minimizar e incluso eliminar los procesos erosivos relacionados con la erosión hídrica.
- La modificación de las prácticas y tecnologías agrícolas no apropiadas, son tareas necesarias con el fin de preservar la calidad de los suelos existentes en el país.

BIBLIOGRAFIA

COTLER, H. *Modelamiento de la erosión en el medio andino a través de un Sistema de Información Geográfica*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1996. 10 p.

DUCHAUFOR, P. *Manual de Edafología*. Editorial Masson, S.A. Barcelona. 1987. Pág. 1-209.

EDESO, José et al. *Aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica en los estudios geomorfológicos y medioambientales: El mapa sintético de riesgos potenciales y el mapa de erosión*. España. 1999. Pág. 1-25.

EMPRESA DE TRANSFORMACION AGRARIA. *Restauración hidrológico forestal del cuencas y control de la erosión*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 1994. Págs. 885.

FEDERACION DE CAFETEROS. *40 años de investigación en Cenicafé*. Vol1. Suelos. 1982.

GOMEZ, C. IDEAM. *Modelo de evaluación, seguimiento y monitoreo de los impactos ambientales en los suelos colombianos por la agricultura intensiva*. Tesis de Grado. Maestría en Gestión Ambiental. Universidad Nacional-IDEAM. 2001. Documento Inédito.

GOMEZ, J. *Sistemas de información Geográfica*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 2000.

GRIGGS, et al. *Sistemas de información geográfica-conección con los modelos de simulación y aplicación a las materias relacionadas con la erosión*. Erosión de Suelos en América Latina. Suelos y Aguas 1. Taller sobre la utilización de un SIG en la evaluación de la erosión actual de suelos y la predicción del riesgo de erosión potencial. FAO. Santiago de Chile. 1992. Pág. 21-32.

ICONTEC. *Norma técnica colombiana NTC 1486. Documentación, presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación*. Santa Fe de Bogotá, D.C. 1996.

INDERENA, 1977. *La erosión de tierras en Colombia*. Santa Fe de Bogotá.

IDEAM. Dinámica de los factores de la erosión y sedimentación en el país. Subdirección de Geomorfología y Suelos. Documento Inédito. Santa Fe de Bogotá, 1997.

----- La información geopedológica y su significado en la estabilidad y productividad de los sistemas naturales colombianos. Subdirección de Geomorfología y Suelos. Santa Fe de Bogotá, 1997. 1-24 p.

----- Estudio Nacional de Procesos Morfodinámicos. La erosión, la sedimentación y la estabilidad de la formación superficial en Colombia. Santa Fe de Bogotá, 1998. 1-32 p.

----- Indicadores ambientales y sostenibilidad. Subdirección de Geomorfología y Suelos. Población y Asentamientos Humanos. Ecosistemas. Documento Interno. Santa Fe de Bogotá, 1998. 1-18 p.

----- Nota Técnica 220999-06 edoc. Construcción y generación de mapas de isolíneas de escorrentía. Subdirección de Hidrología. Santa Fe de Bogotá, 1999.

----- Modelo de susceptibilidad de los suelos a la estabilidad. Subdirección de Geomorfología y Suelos. Santa Fe de Bogotá, 1999.

ISAAKS, Edward et al. Applied Geostatistics. Oxford University Press, 1989.

JONES, C.A et al. Predicción de la erosión hídrica y eólica de suelos. Erosión de Suelos en América Latina. Suelos y Aguas 1. Taller sobre la utilización de un SIG en la evaluación de la erosión actual de suelos y la predicción del riesgo de erosión potencial. FAO. Santiago de Chile. 1992. Pág. 7-20.

KIRKBY, J.J. and MORGAN, R. P.C. Erosión del suelo. Edición John Wiley and Sons. Ltd. 1980. New York. Pág. 1-265.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS Y TRANSPORTE. *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Secretaría de Estado para las políticas del agua y el medio ambiente. España, 1992. 549-589 p.

PRADO WILDNER, L. y DA VEIGA, M. Relación entre erosión y pérdida de fertilidad del suelo. Erosión de Suelos en América Latina. Suelos y Aguas 1. Taller sobre la utilización de un SIG en la evaluación de la erosión actual de suelos y la predicción del riesgo de erosión potencial. FAO. Santiago de Chile. 1992. Pág. 55-80.

ORTIZ, Carlos A. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la República Mexicana. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 1984. Pág. 89-115.

REY, J. IDEAM. Proyecto de erosión. Documento Interno. Bogotá, D.C. 1996. 23 pp.

SALAZAR LEA PLAZA, J.C. El proyecto GLASOD-SOTER. Erosión de Suelos en América Latina. Suelos y Aguas 1. Taller sobre la utilización de un SIG en la evaluación de la erosión actual de suelos y la predicción del riesgo de erosión potencial. FAO. Santiago de Chile. 1992. Pág. 33-52.

STAMATIONS, A Floras. Use of geoinformation techniques in identifying and mapping areas of erosion in a hilly landscape of central Greece. JAG. Vol. 1. Issue 1. 1999. Pág. 68-77.

SUAREZ, Jaime. Deslizamientos y estabilidad de taludes en Zonas Tropicales. UIS. Bucaramanga. 1998. Pág. 355-384.

SURFER FOR WINDOWS, Versión 6. User's Guide. Contoring and 3D Surface Mapping. Golden Software, Inc. U.S.A. 1995. Pág. 5-32, 5-38.

TORRES, Alvaro y otros. Modelamiento ambiental para análisis de susceptibilidad erosiva en la cuenca tributaria del Embalse del Proyecto Porce II. Consultoría Colombiana S.A. Empresas Públicas de Medellín. Medellín. 1991. 10 Pág.

VANEGAS, Jesús A. Predicción cuantitativa de la pérdida de suelos por erosión pluvial en la Cuenca del río Checua. Tesis de Grados. UJTL. Facultad de Agrología. Bogotá, D.E. 1987. Pág. 1-122.

VARGAS, G. Proyecto manejo de recursos naturales de la cuenca alta del río Guaitiquía. Estudio de las variables ambientales de ingeniería geológica y geomorfológica del sector bajo de la cuenca alta del río Guaitiquía. Fase I. Geosensing Ltda, Alcaldía de Villavicencio, Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, GTZ. Santa Fe de Bogotá, 1998.

VARGAS, et al. Estudio geoambiental y zonificación de amenazas por erosión y remoción en masa en la cuenca del río Teusacá, Sabana de Bogotá. Colombia. Santa Fe de Bogotá. D.C., 1998. 44 pg.

WISCHMEIER, W.H. y SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture Science and Education Administration. 58 pp.