

EVALUACION DE LAS METODOLOGIAS UTILIZADAS PARA LA DEFINICION DE PRIORIDADES EN CUENCAS HIDROGRAFICAS Y SU APLICACION A LA CUENCA DE LA QUEBRADA SANTA BARBARA (Carolina, Antioquia)

**Ricardo A. Smith,
Oscar J. Mesa,
Adriana Botero E. y
Jaime I. Vélez.**

**Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos
Facultad de Minas -
Universidad Nacional de Colombia
Medellín**

1. INTRODUCCION

En la mayoría de los países de América Latina y el Caribe es común comprobar que las iniciativas de desarrollo no suelen incluir en los proyectos, las medidas de conservación y protección de los recursos naturales básicos (agua, suelo y vegetación). Esto ha traído como consecuencia el deterioro de dichos recursos, lo cual se manifiesta en la reducción de terrenos disponibles para el cultivo, talas incontroladas de bosques (la deforestación anual en el mundo alcanza los 7 millones de hectáreas), destrucción de la cobertura vegetal, utilización del suelo para usos no aptos, contaminación de aguas, y en general continuo deterioro del medio ambiente.

Una metodología eficiente para solucionar estos problemas es el tratamiento adecuado de las cuencas hidrográficas, considerados

como los sistemas naturales productivos donde el hombre puede interactuar con los recursos, aprovechando los mismos para satisfacer las necesidades de la población.

En una cuenca hidrográfica pueden existir al mismo tiempo muchos usos competitivos por el espacio disponible, tales como: económicos (actividades productivas), sociales (necesidad de vivienda, empleo, etc), y ambientales (conservación del ambiente, disminución de la erosión, etc). Todos estos usos son de gran importancia, y el planificador debe decidir o sugerir la ocupación y las actividades por desarrollar en la cuenca, de tal manera que esos usos sean satisfechos en alguna medida, es decir, debe hacerse una planificación integral de la cuenca usando herramientas adecuadas para ese efecto.

En Colombia la planificación de las cuencas hidrográficas en la mayoría de los casos, no

se hace de una manera integral. En muchas ocasiones la planificación de cuencas se hace bajo la óptica del especialista que la propone: si es un economista ignorará en gran medida los efectos ambientales y sociales de las medidas tomadas, y si es un conservacionista las medidas que asuma limitarán cualquier medida productiva en la cuenca. No sólo no se dispone de una herramienta de planificación que incluya diferentes aspectos, sino que en muchas ocasiones tampoco se dispone de herramientas que midan el verdadero efecto asociado a la medida propuesta.

Para la planificación integral de cuencas se hace entonces necesario el uso de herramientas que permitan la cuantificación de los efectos de las diversas alternativas de manejo de una cuenca hidrográfica, y herramientas que permitan analizar esas alternativas teniendo en cuenta objetivos económicos, ambientales y sociales al mismo tiempo.

En Colombia se han desarrollado algunas metodologías para la planificación de cuencas, pero muy pocas de ellas evalúan el comportamiento de la misma bajo objetivos tanto económicos como ambientales y sociales, con relación a diferentes planes de manejo.

La que aquí se presenta, requiere una herramienta que permite cuantificar los efectos de las alternativas de manejo sobre el medio físico, para esto se usan modelos de erosión-sedimentación que permiten cuantificar la erosión correspondiente.

En la planificación integral de cuencas para seleccionar la alternativa de manejo más adecuada se propone como herramienta el uso de los métodos de análisis multiobjetivo considerando objetivos sociales, ambientales y económicos, en forma simultánea.

La tecnología actual de los sensores remotos y los sistemas de información geográficos se han convertido en una herramienta especial para el manejo de grandes bloques de información, permitiendo cubrir más área, manipular información en forma más detallada y poder ayudar al análisis de variación temporal de los fenómenos y eventos que ocurren sobre una cuenca. En esta investigación se usa el ARC-INFO.

Los principales problemas que se investigaron en este trabajo fueron entonces:

1. Se investigaron metodologías que permitan determinar, entre todas las alternativas propuestas, cuál es la más adecuada, a la luz de criterios económicos, sociales, y ambientales. El uso de múltiples criterios se debe a la necesidad de considerar la relación del hombre con su habitat y sus actividades de supervivencia, en cualquier decisión que tome.
2. La selección de un plan alternativo de manejo para una cuenca se hace normalmente utilizando un solo criterio que en general es de tipo económico. La metodología propuesta en el numeral anterior pretendió tomar esa decisión teniendo en cuenta criterios sociales, económicos, y ambientales. Se hace entonces necesario investigar, desarrollar y proponer diversos indicadores o atributos que representen esos criterios y que estén disponibles en nuestro medio.
3. Uno de los criterios ambientales más utilizados para la toma de decisiones en manejo de cuencas es el deterioro de la cuenca, cuantificado por su erosión o producción de sedimentos. Aunque este es uno de los muchos criterios ambientales que podrían considerarse en la

toma de decisiones, pareciera ser uno de los más importantes por considerar. A pesar de esa importancia, el efecto de las diversas medidas de manejo sobre la capacidad de erodar o deteriorar el medio físico se mide en general de una manera muy simple, usando en los casos más sofisticados la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Estas herramientas tan simples y generales no siempre dan una cuantificación real del cambio en la erosión o producción de sedimentos de acuerdo con los diversos manejos que se propongan. Se propuso entonces, el análisis y uso de modelos de simulación del proceso lluvia-escorrentía entre los que se encuentra el ANSWERS, que representa el flujo de agua y sedimento en la cuenca, y el cual es capaz de mostrar esos cambios.

2. ANALISIS DE LAS METODOLOGIAS PARA LA PRIORIZACION DE CUENCAS

En cuencas significativamente grandes, ante la dificultad para desarrollar en el corto y mediano plazo un plan de manejo que involucre a toda la cuenca, se han desarrollado algunas metodologías para priorizar subcuencas donde el desarrollo de dicho plan sea más benéfico. De esta manera, siguiendo el orden de prioridad establecido, se formulan y desarrollan los planes de manejo para las diferentes subcuencas.

Las metodologías empleadas para la priorización de cuencas son el procedimiento utilizado por la División de Cuencas Hidrográficas de la C.V.C (C.V.C 1987, 1988) y la metodología aplicada por E.P.M en la cuen-

ca de la quebrada Santa Bárbara (Carolina del Príncipe Antioquia).

Es conveniente mencionar que la metodología usual de priorización, corresponde solamente a la etapa inicial de estudios tendientes a elaborar "planes de manejo" en las cuencas y/o subcuencas analizadas. Por tanto, posteriormente es necesario realizar un diagnóstico detallado tanto de tipo biofísico como socio-económico con el fin de plantear y evaluar alternativas de programas y proyectos, según estrategias definidas con anterioridad, de las cuales resulta el plan de manejo.

2.1 Metodología empleada por la C.V.C.

Este procedimiento comprende las siguientes etapas:

- a. Definición de criterios. Se considera que los criterios están asociados con las características básicas de una cuenca y que son variables representativas del estado general de ella.
- b. Ponderación de los criterios seleccionados, reflejando el grado de importancia de cada criterio dentro de la cuenca estudiada.
- c. Búsqueda de mecanismos que permitan cuantificar o valorar cada uno de los criterios.
- d. Con el fin de homogenizar la cuantificación de los diversos criterios y poder comparar las cuencas, se utiliza una escala común (valores entre 1 y n). Para ello se determina el tamaño o amplitud del intervalo de valores correspondiente a cada criterio, así:

$$\text{Amplitud de Intervalo} = \frac{\text{Dato mayor} - \text{Dato menor}}{n}$$

Con esta amplitud, para los mismos datos, se establecen n categorías o intervalos de clase entre el dato mayor y el menor, asignando un valor máximo de n puntos a la categoría superior a partir de la cual se hacen asignaciones en orden descendente hasta la categoría inferior.

La calificación de cada criterio será el número de puntos correspondiente a la categoría dentro de la cual se encuentra el dato del respectivo criterio. Para evitar distorsiones, debe analizarse la tendencia de los valores para cada criterio, desechando aquel o aquellos valores que se alejen de la tendencia central de los datos restantes. A los valores omitidos se les asigna, el valor máximo o mínimo de la escala.

- e. Calcular el total del valor ponderado para cada una de las cuencas a priorizar:

$$\begin{array}{l} \text{Valor} \\ \text{Total} \\ \text{Ponderado} \end{array} = \sum_{i=1}^n \text{Calific. Criterio}_i * \text{Valor Poderac. Criterio}_i$$

Donde n es el número máximo de criterios.

- f. Ordenamiento de mayor a menor de los totales de valores ponderados, el cuál dará el orden de prioridad buscado.

Los resultados de la priorización son utilizados como pauta para el desarrollo de los programas y proyectos a realizar en las cuencas, de tal forma, que no se emprenden acciones en la cuenca con prioridad dos, hasta no haber finalizado los proyectos recomendados para la cuenca con prioridad uno y así sucesivamente.

2.2 Metodología de la Unidad de Planeación de Recursos Naturales de las Empresas Públicas de Medellín

Mientras la anterior metodología propone una priorización, diagnóstico, evaluación y por último el plan de manejo, en ésta, con base en un diagnóstico y en las acciones propuestas en un plan de manejo, se propone la priorización de subcuencas teniendo en cuenta la erosión, como único criterio para la priorización. El ordenamiento de las subcuencas se realiza mediante el uso de índices cualitativos que califican la erosión relativa y la torrencialidad.

La erosión relativa se calcula siguiendo el procedimiento especificado en "Determinación del Índice de Erosión Relativa en la Cuenca de la Quebrada Santa Bárbara", (Duque, 1988), que consiste en otorgar valores de 0 a 10 a cuatro factores seleccionados (pendiente, suelogeología, precipitación y cobertura vegetal).

La región de interés se divide en cuadrículas y en cada una de ellas se evalúa el valor de los índices para cada uno de los cuatro factores.

Una vez se tienen los índices para la totalidad de las cuadrículas, se aplica la expresión:

$$ER = 0.27 (\text{GEOLOGIA}) + 0.51 (\text{COBERTURA VEGETAL}) + 0.05 (\text{PRECIPITACION}) + 0.17 (\text{PENDIENTE})$$

con la que se obtiene la erosión relativa para cada una de ellas.

El índice de erosión relativa (IER) de una subcuenca es el promedio de los valores de las cuadrículas que la conforman.

Por su parte la torrencialidad consiste en evaluar la expresión:

$$IT = PM \cdot DD \cdot CO / (A \cdot L \cdot F \cdot B)$$

en donde, PM es la pendiente media del cauce, [m/Km]; DD es la densidad de drenaje, [Km/Km²]; CO es el coeficiente orográfico, [m²/Km²]; A es el área de la subcuenca, [Km²]; L es la longitud del cauce principal, [Km]; F es el índice de Gravelius, [Km/Km²] y B es la cobertura de bosques, [Km²].

Para calcular la prioridad o índice por el cual se ordenarán las subcuencas se propone calcular el "índice de prioridad", obtenido como la suma de los índices de erosión relativa y torrencialidad, previamente escalados linealmente de 0 a 5 de tal manera que el índice total:

$$IP = IER + IT \quad \text{varía entre 0 y 10}$$

Habiendo calculado el IP para cada subcuenca, los mayores valores indicarán cuencas con más alta prioridad y que por tanto deben ser atendidas primero por las acciones del plan de manejo y conservación de la cuenca.

3. ANALISIS MULTIOBJETIVO

Cuando se tiene un recurso disponible en una cuenca, se pueden presentar diferentes usos de éste según sea la persona o entidad que lo requiera. En vista de que los recursos

son limitados es necesario determinar cuál de todos los usos puede producir el mayor incremento económico al mismo tiempo que se tenga la mayor disminución en el deterioro del recurso, lo cual es bastante complejo, debido principalmente a la gran variedad de usuarios como de potencialidades del recurso.

El uso de los métodos de Análisis Multiobjetivo en la planificación del manejo de cuencas, suministra metodologías, lineamientos y criterios que permiten un desarrollo integrado de los recursos físicos de la cuenca.

Es así, como el propósito principal de los métodos de análisis multiobjetivo es identificar la ó las mejores soluciones considerando múltiples objetivos (sociales, financieros, económicos, ambientales, físicos, entre otros) en forma simultánea. El conjunto de soluciones óptimas obtenidas se denomina el conjunto de soluciones no dominadas. Dicho conjunto lo conforman aquellas soluciones sobre las cuales no se puede decir que una es mejor que la otra cuando se consideran todos los objetivos al tiempo.

Una vez se tenga el conjunto de soluciones no dominadas, la solución al problema estará constituida en general por un conjunto de soluciones y no por una única solución, en caso de tener que poner en práctica solamente una solución, esta se escogerá entre el conjunto de soluciones no dominadas.

Cuando el conjunto de soluciones no dominadas es muy amplio, el procedimiento de selección de la solución por implementar es muy complejo para el decisor. De ahí, que lo mejor es el uso de las preferencias del decisor desde el inicio de la aplicación de la metodología, para llegar de una vez a un conjunto de soluciones mucho más reducido o a la solución finalmente escogida.

El procedimiento general de análisis multiobjetivo se puede resumir en dos etapas, definir el conjunto de soluciones no dominadas, y usar la estructura de preferencias del decisor para definir un conjunto de soluciones ó una solución final.

Al considerarse el uso de estos métodos, se debe tener presente que:

- Existe un elemento de alto riesgo e incertidumbre en casi todas las decisiones que se toman.
- Al tener varios decisores, cada uno de ellos puede tomar decisiones o influenciar en ellas, de acuerdo a su estructura de preferencias.
- Todos los decisores tienen el mismo conjunto de objetivos, que se necesitan optimizar.

El desarrollo de técnicas para la decisión de un problema considerando múltiples objetivos ha tenido un rápido incremento en los últimos años, en su gran mayoría el énfasis y el estilo de la técnica implementada depende de la disciplina y de la experiencia del investigador.

La literatura sobre técnicas para la solución de problemas con múltiples objetivos es abundante y resulta difícil en este estudio abarcarla toda. Existen diferentes formas de clasificar las técnicas del Análisis Multiobjetivo, Smith Q. y otros [1993], de La Hoz [1989], Cohon [1978], presentan algunas de estas clasificaciones, así como describen el desarrollo matemático de los métodos más relevantes.

Los métodos de análisis multiobjetivo que se analizan en este estudio son: el método de los promedios ponderados; los métodos

ELECTRE II y IV; y el método de las Funciones de Valor Multiatributo (FVM).

4. ESTIMACION DE LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA

4.1. Erosión Laminar

Esta erosión no es fácil de observar, ni de medir, ya que sólo alcanza valores del orden de mm/año en la superficie de la cuenca. Sin embargo, ha sido bastante estudiada experimentalmente, a tal punto que se han desarrollado metodologías para su cuantificación en función de parámetros fáciles de obtener, mediante los cuales se puede observar la sensibilidad de la pérdida de suelo a los distintos factores que la afectan.

Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) fue diseñada como una herramienta de trabajo conveniente para satisfacer las necesidades de conservacionistas, técnicos, y planificadores. Es un modelo multiplicativo, en el que los parámetros importantes para la predicción de la pérdida de suelo en alta pendiente son agrupados en seis grandes factores, cada uno de los cuales: puede ser representado por un solo número, puede ser estimado de las características del suelo, o de datos de una investigación de erosión en una localidad base y es libre de cualquier orientación geográfica.

La USLE no es en realidad un modelo matemático que describa la producción de sedimentos en una cuenca, pero su forma es muy sencilla y puede utilizarse como tal.

La USLE es una metodología que permite el cálculo de la producción de sedimentos en surcos y por erosión laminar en una cuenca homogénea, es decir, los parámetros son iguales a través de toda la cuenca. Para un uso más racional de la USLE es conveniente dividir la cuenca en el máximo número de subcuencas que sea posible, en las cuales se pueda garantizar la homogeneidad de los parámetros.

La información requerida para obtener la producción de sedimentos aplicando la USLE es la siguiente: información de lluvias (la cual es necesaria para el cálculo del factor R), tipo de suelo de la cuenca (para el cálculo del factor K), longitud y pendiente promedio de la cuenca (para el cálculo del factor LS), tipo de cultivo y prácticas de conservación existentes en la cuenca (para obtener el factor CP).

Los resultados que se obtiene al aplicar la USLE son un promedio de la producción de sedimentos en un período de tiempo, (determinado por los factores R y K), sin tener en cuenta la depositación que pudiera ocurrir.

Modelo SWRRB

El modelo SWRRB simula la hidrología y los procesos relacionados con esta en una cuenca. Para simular la hidrología utiliza el procedimiento del número de curva y para obtener la producción de sedimentos utiliza la MUSLE.

La USLE Modificada (MUSLE) fue desarrollada por Williams (1976), quien propuso que el término energía de la lluvia, el índice EI30, en la USLE podría ser reemplazado por un término de energía de la escorrentía para predecir la producción de sedimentos directamente. Williams (1975b) reemplazó el factor R en la USLE con varios parámetros

y usó la ecuación resultante para predecir la producción de sedimentos de las cuencas. El parámetro que daba el mejor estimativo fue $Q \cdot q_p$, el producto del volumen de escorrentía y descarga pico. Williams denotó este término como energía de la escorrentía. La ecuación resultante es:

$$Y = 95 \cdot (Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot CP$$

donde Y es el sedimento producido en una tormenta aislada en toneladas; Q es el volumen de escorrentía en acre-pie, q_p es la descarga pico en pie^3/seg , y K, LS, CP, son términos estándar de la USLE, cada uno de los cuales es un promedio ponderado por el área sobre la cuenca.

El uso de la MUSLE debe estar limitado a aquellas cuencas que son relativamente homogéneas. Las cuencas que están en proceso de perturbación son generalmente muy heterogéneas y es necesario dividir las subcuencas homogéneas. También su utilización sólo es adecuada en aquellas cuencas donde son válidas las metodologías para la estimación del proceso precipitación-escorrentía, que el modelo tiene implementadas.

Los procesos que están involucrados en el modelo SWRRB son: escorrentía superficial, percolación, flujo de retorno, evapotranspiración, almacenamiento en lagunas y embalses y depositación. El modelo SWRRB requiere para su uso la siguiente información: Geometría de la cuenca, hidrología, suelos, conocer la existencia de embalses y lagunas presentes en la zona, y estudiar el comportamiento de los vertederos principal y de emergencia.

Para la aplicación del modelo se debe tener en cuenta que la cuenca puede ser dividida

en cinco subcuencas como máximo, basándose en suelos, uso de la tierra, topografía, vegetación, precipitación, temperatura.

El modelo requiere información muy detallada de las características de los suelos para cada estrato, que es difícil de obtener a nivel de cuenca, y por tanto se deben utilizar valores estimados. Las características de los suelos para un punto determinado de la subcuenca se generaliza para la subcuenca.

Modelo ANSWERS

El ANSWERS es un modelo que simula el comportamiento de una cuenca que tenga como uso principal la agricultura, durante e inmediatamente después de un evento de lluvia.

En primera instancia, su aplicación es para planificar y evaluar diferentes estrategias para control de las fuentes no puntuales de erosión y contaminación por agentes químicos en áreas cultivadas intensamente. Para tales situaciones, la respuesta hidrológica de la cuenca para una tormenta dada es el mecanismo que controla el transporte de los sedimentos y los contaminantes de la red de drenaje.

El ANSWERS es un modelo determinístico basado en la siguiente hipótesis:

En todos los puntos dentro de una cuenca, existen funciones que relacionan las tasas de flujo y aquellos parámetros hidrológicos que la gobiernan, por ejemplo, intensidad de la lluvia, infiltración, tipo de suelo, etc. Además estas tasas pueden ser utilizadas para modelar otros fenómenos de las relaciones de transporte tales como erosión del suelo y movimientos de químicos dentro de la cuenca.

La cuenca se divide en una malla irregular de elementos cuadrados. Un elemento es un área dentro de la cual todos los parámetros hidrológicos importantes son uniformes.

El tamaño del elemento no es crítico porque no hay áreas de tamaño finito dentro de las cuales no exista algún grado de variación en uno o más parámetros, lo importante es que un elemento debe ser lo suficientemente pequeño de tal manera que cambios arbitrarios en los parámetros de un elemento adyacente tenga una influencia insignificante sobre la respuesta en la totalidad de la cuenca.

Las relaciones entre agua y producción de contaminantes sólo necesitan ser simuladas en un elemento pequeño y uniforme. Los valores de los parámetros pueden variar de cualquier manera entre los elementos; el modelo está en capacidad de representar fácilmente cualquier grado de variabilidad espacial dentro de una cuenca. Los elementos actúan como un sistema compuesto ya que la interacción del flujo de los elementos ocurre porque: el flujo superficial, el flujo entre las eras de los cultivos y el flujo de aguas subterráneas desde cada elemento es flujo de entrada a los elementos adyacentes. Los contaminantes son generados y transportados por estos flujos y por el impacto de las gotas de lluvia.

El modelo ANSWERS requiere la siguiente información:

1. Requerimientos de simulación (unidades de entrada y salida).
2. Información de lluvia (Tiempos e intensidades).
3. Información del suelo (Humedad antecedente, infiltración, respuesta del drenaje y la erodabilidad potencial).

4. Información acerca del uso del suelo (Tipo de cultivo, rugosidad de la superficie y características de almacenamiento).
5. Descripción de los canales (Ancho y rugosidad).
6. Información individual de los elementos (Localización, topografía, drenaje, suelo, uso del suelo, y prácticas de manejo).

El ANSWERS está en capacidad de obtener los totales de la lluvia, del flujo y el sedimento promedio producido, como también el total del sedimento atrapado por las prácticas de manejo (BMPs), si existen.

A través de toda la simulación se mantienen estadísticas sobre las cantidades reales de suelo removido o depositado en cada elemento. Aunque el suelo realmente sale del elemento, en caso de balance negativo, éste puede o no alcanzar el sistema de canales. Esto se debe al hecho de que puede haber depositación aguas abajo del elemento antes del canal.

En el archivo de resultados se detalla la cantidad de sedimento depositado en cada uno de los elementos que contienen canal. El ANSWERS no hace simulación del proceso de erosión en el canal.

4.2. Erosión por movimientos en masa

La cuantificación y predicción de la erosión por movimientos en masa es un tema sobre el cual se adolece de escasez de información en la literatura. En un país como Colombia, en donde se presentan paisajes de alta pendiente y regímenes de alta precipitación, la importancia relativa de este tipo de erosión

y producción de sedimentos, es mayor que en zonas de tierras planas y con regímenes pluviales más moderados.

Para el análisis de la producción de sedimentos por movimientos en masa en la cuenca, es importante determinar los procesos específicos mediante los cuales se presentan estos fenómenos, además de identificar los factores que determinan estos procesos.

Para cuantificar este tipo de erosión se aplicó la USLE a cada una de las cicatrices existentes, modificándole los parámetros para adecuarlos a las condiciones del sitio.

5. APLICACION AL CASO DE CAROLINA

Desde hace muchos años cerca del casco urbano del municipio de Carolina se viene presentando una abundante depositación de sedimentos, elevando los cauces de las quebradas Santa Bárbara, El Carmelo y La Paz que cruzan o bordean la población, ocasionando problemas tales como obstrucción de las descargas del alcantarillado, inutilización de algunos puentes y carreteras, retención de aguas servidas, aumento del nivel freático en las zonas vecinas a la quebrada, e inundaciones de algunos terrenos.

Para el planteamiento de una solución o manejo de la cuenca se debe determinar la importancia de cada componente actuante en el sistema general; por consiguiente, fuera de las soluciones técnicas, todos los problemas también pueden ser tratados con un manejo político, socio-económico e institucional adecuado con la comunidad de Carolina.

5.1. Aspectos físicos generales de la cuenca.

La quebrada Santa Bárbara está localizada en el Municipio de Carolina del Príncipe, al nordeste del Departamento de Antioquia.

La cuenca tiene una precipitación promedio anual de 3.205 mm y una altura de 1.860 msnm, una evaporación promedio anual de 1.030 mm, presenta temperaturas entre los 18° y los 30°C, y 77% de humedad relativa. Las aguas de la quebrada Santa Bárbara drenan al embalse de Troneras, construido en 1962 sobre el río Guadalupe. El área de la cuenca es de 3.100 hectáreas, agrupadas por el uso de la tierra según se describe en la Tabla 5.1.

La cuenca está conformada por rocas ígneas del Batolito Antioqueño. El área de la cuenca se puede dividir en cuatro unidades geomorfológicas, con una distribución porcentual así: unidad de vertientes altas aproximadamente un 40%, con pendientes mayores a 30°; unidad de vertientes intermedias, que conforman mas o menos el 30%, con pendientes entre 7° y 30°; unidad de colinas saprolíticas bajas, que cubren el 25% y por último unidades de valle aluvial que ocupan aproximadamente el 5%, con pendiente entre 0° y 7°.

Tabla 5.1
Uso actual de la tierra en la cuenca

TIPO DE USO	ha	%
Vegetación natural	460	14,8
Potreros (pastos naturales)	2.480	80,0
Zona urbana, infraestructura, Cauces	120	3,9
Reforestación	30	1,0
Cultivos	10	0,3
TOTAL	3.100	100,0

Los potreros, que son los que cubren la mayoría de la cuenca, son gramas naturales en muy mal estado, poco protectoras del terreno y con raíces poco profundas, esto como consecuencia del excesivo pastoreo y de las prácticas de mejoramiento, renovación y conservación.

Los suelos de la cuenca son en general de texturas finas y moderadamente finas, provenientes en su mayoría de cuarzodioritas, fácilmente erosionables en contacto con el agua, impermeables o de una permeabilidad muy baja.

5.2. Diagnóstico del estado actual de la cuenca

Las principales causas del problema erosión-sedimentación son:

- Causas relacionadas con la producción y el transporte:
La alta producción y transporte de sedimentos en la cuenca, son causadas por la interacción de la ocurrencia de altas precipitaciones en la cuenca, (con lluvias hasta de 138 mm/día), las altas pendientes, y el uso inadecuado de la tierra (80% de la cuenca está cubierta por pastos en muy mal estado).
- Causas relacionadas con la deposición de sedimentos:
Antes de la construcción del embalse de Troneras, la sedimentación en los alrededores de Carolina era poco significativa y de carácter temporal. El embalse produjo una serie de cambios en la dinámica fluvial de la quebrada, reduciendo la velocidad y turbulencia de la corriente y disminuyendo así la capacidad de transporte de sedimentos, los

cuales empezaron a sedimentarse en la entrada de éste.

5.3. Modelos Aplicados.

Los modelos de producción de sedimentos aplicados a esta cuenca son: USLE, SWBRR y ANSWERS. Para obtener la producción de sedimentos total se debe tener en cuenta si el modelo calcula producción total o si sólo tiene en cuenta la erosión laminar.

5.3.1 Aplicación de Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE)

- Trabajo de la Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos (1990).

Los factores de la USLE en la cuenca de la quebrada Santa Bárbara para calcular la erosión laminar en toda la cuenca (dividida en 11 subcuencas) en sus condiciones actuales fueron:

Resultados obtenidos con la aplicación de la USLE:

- Condiciones actuales del uso de la tierra:
 $C = 0.036$ Volumen total de sedimento = 87060.57 m^3
- Sensibilidad del coeficiente C:
 $C = 0.020$ Volumen total de sedimento = 47413.25 m^3
 $C = 0.010$ Volumen total de sedimento = 23706.62 m^3
 $C = 0.003$ Volumen total de sedimento = 7111.98 m^3

La variación que presenta el volumen de sedimentos es muy significativa al cambiarse el valor de C, indicando la importancia de determinar correctamente el valor de este parámetro.

- Trabajo de grado realizado por John Jairo Cano [1991]:

Para la aplicación de la ecuación USLE en la cuenca, él divide ésta en tres zonas, cuya

SUBCUENCA	Area (ha)	R	K	L(M)	Φ	S	LS	P
Q. Los Pinos	253	450	0.15	130.36	12.35	4.032546	11.68678	0.8
Q. La Teresita	440	450	0.15	132.00	11.25	3.444132	10.05665	0.8
Q. Tachuelo	149	450	0.15	131.81	16.17	6.407825	18.69428	0.8
Q. La Hermosa	98	450	0.15	91.30	16.75	6.811939	15.94345	0.8
Q. Sta. Bárbara (parte alta)	467	450	0.15	133.00	13.82	4.886555	14.33319	0.8
Q. Sta. Bárbara (parte media)	143	450	0.15	107.52	15.35	5.85563	15.11807	0.8
Q. La Paz (Parte alta)	370	450	0.15	112.50	14.44	5.269526	13.97952	0.8
Q. N.N.	126	450	0.15	97.31	14.25	5.150745	12.52546	0.8
Q. La Paz (Parte baja)	83	450	0.15	179.70	5.71	1.16618	4.097542	0.8
Q. El Carmelo	558	450	0.15	133.3	14.09	5.051690	14.83761	0.8
Q. Sta. Bárbara (Parte baja)	320	450	0.15	115.1	11.82	3.743565	10.06838	0.8

delimitación se logra al considerar el área de influencia de cada uno de los tres pluviógrafos instalados en la zona. Ellos son: Carolina, La Sirena y Guanacas. En la tabla 9 de la referencia se resumen los valores de los parámetros de la USLE.

En el estudio sólo considera un valor para el coeficiente de cobertura $C = 0.05$, dando un volumen de sedimentos igual 148.309 m^3 .

5.3.2. Aplicación del Modelo SWRRB

Alvarez e Hincapié [1990] utilizaron el modelo SWRRB, encontrando los siguientes resultados:

- Condiciones actuales de uso de la tierra:
 $C = 0.004$ Volumen total de sedimento
 $= 110.050 \text{ m}^3$
- Siembra de árboles hasta la cota 2000:
 $C = 0.003$ Volumen total de sedimento
 $= 81.862 \text{ m}^3$
- La cuenca se reforesta toda con bosques:
 $C = 0.002$ Volumen total de sedimento
 $= 38.022 \text{ m}^3$
Esta sería la producción de sedimentos mínima en la cuenca
- Aumento de la cobertura arbórea de las cuencas Santa Bárbara de 40% a 65% y El Carmelo de 41% a 65%:
 $C = 0.002$ Volumen total de sedimento
 $= 59.458 \text{ m}^3$

5.3.3. Aplicación del Modelo ANSWERS

La construcción del archivo de datos requerido por el modelo, se puede dividir en dos

partes. La primera contiene los valores de los parámetros utilizados por las diferentes ecuaciones implementadas en el modelo, y la segunda, recopila la información de cada una de las celdas en que es dividida la cuenca: cota del terreno, tipo de suelo, tipo de uso del suelo, entre otros.

Mediante la utilización del SIG ARC/INFO se procedió a obtener la información requerida para la construcción de la segunda parte del archivo de datos, así:

- Digitación de los siguientes mapas:
Mapa de tipos de suelos
Mapa general de la cuenca, el cual contiene: vías, infraestructura, hidrografía
Mapa del uso y manejo del suelo actual
Plano topográfico
- Creación de un mapa de celdas
(Cada celda $= 250 \text{ km}^2$)
- La malla de celdas se superpone a los diferentes mapas temáticos. El resultado de esto y mediante un programa manejador de base de datos se obtiene la información requerida para el archivo de datos del ANSWERS

Una vez construido el archivo de datos, se procede con la aplicación del modelo ANSWERS. Para poder determinar la validez de los resultados obtenidos con el modelo, éste se aplicó, considerando para el factor C , los valores utilizados en los diferentes estudios referenciados. Los valores de los volúmenes de sedimentos obtenidos son los siguientes:

Valores considerados por el Postgrado de Recursos Hidráulicos:

- Condiciones actuales:
 $C = 0.036$ Volumen de sedimentos $= 94.736 \text{ m}^3$

- La cuenca se reforesta hasta la cota 2000
C = 0.020 Volumen de sedimentos = 53.969 m³
- Toda el área de la cuenca es reforestada
C = 0.010 Volumen de sedimentos = 27.327 m³

Valor de C considerado en el trabajo de John Jairo Cano:

- C = 0.050 Volumen de sedimentos = 134.525 m³

Considerando los valores utilizados en la aplicación del SWRRB:

- Condiciones actuales:
C = 0.003 Volumen de sedimentos = 94.736 m³
- La cuenca se reforesta hasta la cota 2000
C = 0.002 Volumen de sedimentos = 75.072 m³
- C = 0.001 Volumen de sedimentos = 48.735 m³

5.3.4 Movimientos en Masa

Los movimientos en masa están influenciados por la saturación del terreno, el socavamiento de la base de las laderas y las altas pendientes presentes en las cuencas. Los movimientos son en su mayoría de tipo rotacional siguiéndole en orden de importancia el traslacional.

Se cubicaron los derrumbes existentes, para saber el potencial de volumen total de sedimentos que existe en ellos. Estos derrumbes se ubicaron en el mapa, se les determinó el

volumen aproximado utilizando nivel, cinta y brújula y se tomaron las medidas suficientes para determinar el volumen transportado y el remanente.

De la cubicación de los derrumbes no se podrá extraer una tasa anual de erosión real, pero para tener una tasa de erosión aproximada, se calculó la erosión laminar por medio de la USLE, en sus condiciones actuales.

Se localizaron y midieron 54 movimientos en masa con las siguientes características:

- Más del 70% fueron de tipo rotacional.
- Las longitudes varían de 6 a 120 m y los anchos entre 10 y 800 m.
- El espesor varía entre 0.5 y 6 m.
- El ángulo de reposo entre 50° y 90°.

Los parámetros de la USLE por utilizar son los siguientes:

- Los factores R=450 y K=0.15 son los mismos que los utilizados para la cuenca.
- La longitud del terreno L y la pendiente S fueron medidos directamente en el terreno.
- El factor C se obtuvo de las tablas de Gray y Laser. C = 0.45 para derrumbes sin tratar (sin ningún tipo de cobertura).
- Para los derrumbes se consideró que inicialmente se encuentran en peores condiciones que la práctica de referencia y por lo tanto el valor de P usado fue de 1.2.

Los resultados que se obtuvieron fue de un volumen de 34.500 m³/año.

Se aplicó nuevamente la USLE a los derrumbes tratados. A éstos se les cambiaron los parámetros C y P. Para C se usó un valor de 0.013 (suponiendo que el pasto sembrado cubrirá el 80% del área del derrumbe). Cuando los derrumbes han sido tratados, el valor de P mejora pero no queda mejor que el considerado para la cuenca (por su alta pendiente), y por esa razón se le asignó un valor de 0.9. El resultado obtenido es de $780 \text{ m}^3/\text{año}$.

Un manejo adecuado de los derrumbes rebajaría la erosión laminar en ellos en un 98%; reduciendo la producción en $34.000 \text{ m}^3/\text{año}$. Por tanto se debe priorizar la acción de manejo de la cuenca a tratar los derrumbes, porque además de que reduce la erosión laminar de sobre los derrumbes en un 98%, disminuye más del doble la erosión, que si se tratara toda la cuenca.

Por el cambio de uso del suelo en la cuenca, se rebaja la producción de sedimentos por erosión laminar en un 70%; es decir que se reduce la producción en $16.000 \text{ m}^3/\text{año}$.

5.3.5 Erosión Total

Con el fin de comprobar las hipótesis de producción, se realizó un balance comparando los volúmenes aportados por la cuenca y los volúmenes depositados.

Los sedimentos depositados en las cuñas de la quebrada Santa Bárbara, sus afluentes y en el embalse de Troneras, se estimó la producción total de sedimento en la cuenca en las batimetrías, las cuales cuantificaron la carga de fondo, igual a $89.019 \text{ m}^3/\text{año}$; y para el cálculo de sedimentos en el embalse de Troneras se utilizaron las batimetrías disponibles en E.P.M., dando un volumen igual a $29.447 \text{ m}^3/\text{año}$.

La producción total de sedimentos de la cuenca de la quebrada Santa Bárbara es el volumen de las cuñas mas el volumen correspondiente del embalse, o sea que $89.019 + 29.447 \text{ m}^3/\text{año} = 118.466 \text{ m}^3/\text{año}$, redondeándolo a $120.000 \text{ m}^3/\text{año}$.

5.4. Aplicación de los métodos de Análisis Multiobjetivo

En el municipio de Carolina se han venido presentado una serie de problemas (enunciados en el numeral 5.1). Estas condiciones determinan los objetivos que se van a considerar en el manejo de la cuenca, los cuales incluyen: objetivos técnicos, ambientales, económicos y sociales. Para representar tales objetivos se definieron 5 criterios:

Recreación: Objetivo social

Producción de sedimentos: Objetivo ambiental

Desplazamiento de la población: Objetivo socio-económico

Costo de la reforestación: Objetivo económico

Explotación de maderas: Objetivo económico

Una vez identificados los criterios a utilizar, se usan los métodos de análisis multiobjetivo con dos finalidades:

- Identificar la primera sub-cuenca a intervenir y
- De un conjunto de alternativas, seleccionar el plan de manejo a implementar en la cuenca de la quebrada Santa Bárbara.

El procedimiento llevado a cabo para la determinación de la sub-cuenca se resume en los siguientes pasos:

- a. La cuenca se divide en 11 subcuencas, las mismas utilizadas en el estudio del Postgrado de Recursos Hidráulicos en la aplicación de la USLE. Las 11 subcuencas son:

No.	Cuenca	Area (ha)
1	Q. Los pinos	253
2	Q. La Teresita	440
3	Q. El Tachuelo	149
4	Q. La Hermosa	98
5	Q. Santa Bárbara alta	467
6	Q. Santa Bárbara, parte media	143
7	Q. La Paz, parte alta	370
8	Q. N.N.	126
9	Q. La Paz, parte media	83
10	Q. El Carmelo	558
11	Q. Santa Bárbara, parta baja	320

Tabla 5.2
Matriz de Valores

Alter nati va	Criterio				
	1	2	3	4	5
Q1	41,29	30,36	8,16	88,55	5,87
Q2	71,93	52,80	14,19	154,00	10,21
Q3	24,32	17,88	4,80	52,15	3,46
Q4	15,99	11,76	3,16	34,30	2,27
Q5	76,22	56,04	15,06	163,45	10,84
Q6	23,34	17,16	4,61	50,05	3,32
Q7	60,39	44,40	11,93	129,50	8,59
Q8	20,56	15,12	4,06	44,10	2,92
Q9	13,54	9,96	2,67	29,05	1,92
Q10	91,08	66,96	18,00	195,30	12,96
Q11	52,23	38,40	10,32	112,00	7,43

Tabla 5.3
Ordenamiento de Alternativas

Alter	Método Utilizado			
	Electre II	Electre IV	Promed Ponder	FUM
Q1	10	11	7	7
Q2	5	7	11	9
Q3	2	8	9	11
Q4	7	6	4	10
Q5	11	5	8	6
Q6	3	4	6	3
Q7	6	10	10	8
Q8	8	9	2	1
Q9	4	3	5	4
Q10	9	2	1	5
Q11	1	1	3	2

- b. Cada una de las subcuencas en las que se dividió la cuenca, se considera como una alternativa.
- c. Se procede a evaluar cada alternativa con respecto a cada criterio, para con esto conformar la matriz de valores, tabla 5.2.
- d. Mediante el uso de los métodos Electre II y IV, promedios ponderados y FUM, se obtuvo el ordenamiento de las alternativas, tabla 5.3. Según los resultados, las primeras cuencas a tratar son la cuenca Q11 (Quebrada Santa Bárbara, parte baja) y Q10 (Quebrada El Carmelo).
- e. Como complemento y con el fin de comparar los resultados, se utiliza la metodología de la Corporación del Valle del Cauca para la priorización de cuencas.

En el ejercicio se consideraron igualmente las 11 subcuencas y los 5 criterios indicados: Desplazamiento de la población (C1), aumento de beneficios por explotación de maderas (C2), recreación (C3), costo de la reforestación (C4), y producción de sedimentos (C5).

En la tabla 5.4 se pueden apreciar los valores de los criterios utilizados para cada cuenca.

Tabla 5.4
Matriz de Valores

Cuenca	Area	C1	C2	C3	C4	C5
Q1	253	41	30,36	8,16	88,55	5,87
Q2	440	71	52,80	14,19	154,00	10,21
Q3	149	24	17,88	4,80	52,15	3,46
Q4	98	15	11,76	3,16	34,30	2,27
Q5	467	76	56,04	15,06	163,45	10,84
Q6	143	23	17,16	4,61	50,05	3,32
Q7	370	60	44,40	11,93	129,50	8,59
Q8	126	20	15,12	4,06	44,10	2,92
Q9	83	13	9,96	2,67	29,05	1,92
Q10	558	91	66,96	18,00	195,30	12,96
Q11	320	52	38,40	10,32	112,00	7,43

Los valores de ponderación para cada criterio son:

C1=18; C2=35; C3=30; C4=10; y C5=7

Utilizando los criterios y valores de ponderación indicados, se obtuvo la clasificación de subcuencas para su priorización, mostrada en la tabla 5.5.

Tabla 5.5
Priorización de Subcuencas
Metodología de la C.V.C.

Cuenca	C1= 18	C2 = 35	C3 = 30	C4 = 10	C5 = 7	Valor Ponderado	Orden
Q1	54	70	90	30	21	265	5
Q2	72	105	120	40	28	365	3
Q3	36	35	60	20	14	165	7
Q4	18	35	30	10	7	100	8
Q5	54	105	120	40	28	347	4
Q6	36	35	60	20	14	165	7
Q7	54	105	120	40	28	347	4
Q8	36	35	60	20	14	165	7
Q9	18	35	150	10	7	220	6
Q10	90	140	120	40	35	425	1
Q11	54	140	120	40	21	375	2

Ordenando las subcuencas de mayor a menor valor ponderado se tiene que la subcuenca Q10 seguida de la subcuenca Q11 son las que inicialmente deben ser intervenidas. Como se puede apreciar los resultados son semejantes a los obtenidos con la aplicación de los métodos de análisis multiobjetivo.

Por tanto, la primera subcuenca a intervenir es la Q11 (Quebrada Santa Bárbara parte baja).

Para la selección del plan de manejo a implementar en la cuenca entre las alternativas consideradas, se siguen los siguientes pasos:

- a. Formulación de cinco alternativas para el análisis global de la cuenca. A continuación se hace una descripción breve de cada una de ellas.

A1: Práctica de manejo actual: No se realiza ningún proyecto para modificar las condiciones actuales del uso del suelo en la cuenca.

A2: Cobertura del área total de la cuenca en bosques. La erosión se disminuye al mínimo, permitiendo además un ingreso alterno para los pobladores de la zona.

A3: Aumento en un 22.6% del área de la cuenca en bosques: se busca cambiar zonas cubiertas con pastos por bosques y así disminuir la torrencialidad que se produce en la zona. Se cambian 660 ha de pastos por bosques.

A4: Aumento en un 39% del área en bosques (parte alta e intermedia). Tiene los mismos objetivos que la alternativa A3 pero para un área de 1130 ha.

A5: Revegetalización de las orillas de las quebradas y de los derrumbes: permite disminuir la erosión lineal y amortigua la escorrentía superficial (190 ha) al cubrir las orillas y los derrumbes con pastos.

Las alternativas A2, A3 y A4 se pueden considerar que actúan sobre la superficie de la cuenca al modificar los usos y manejos del suelo para reducir la escorrentía superficial y proteger los suelos de la erosión laminar. Mientras que la alternativa A5 actúa principalmente sobre el cauce al controlar la socavación de las vertientes evitando así parte de la erosión lineal y la posible desestabilización de las laderas que ocasionarían los movimientos en masa.

- b. Definición de criterios. Se utilizaron los cinco criterios empleados en la selección de la cuenca a priorizar.
- c. Evaluación de cada objetivo con respecto a cada alternativa, se muestra en la tabla 5.6

Tabla 5.6
Matriz de Valores

ALT	CRITERIO				
	1	2	3	4	5
1	25	25	100	75	25
2	100	0	25	25	100
3	75	50	75	50	50
4	75	75	50	75	75
5	25	75	20	50	50

- d. Definición del juego de pesos a utilizar. Cada método es aplicado para tres juegos de pesos diferentes.
- e. Clasificación de las alternativas utilizando los métodos de análisis multiobjetivo (Tabla 5.7).

Tabla 5.7
Priorización de Acciones

Primer Juego de Pesos				
Métodos Utilizados				
	FUM	ELECTRE II	ELECTRE IV	PROMEDIOS PONDERADOS
Ord. 1	2	4	2	4
Ord. 2	1	2	4	2
Ord. 3	3	3	3	3
Ord. 4	4	1	5	1
Ord. 5	5	5	1	1
Segundo Juego de Pesos				
Métodos Utilizados				
	FUM	ELECTRE II	ELECTRE IV	PROMEDIOS PONDERADOS
Ord. 1	2	4	2	2
Ord. 2	1	2	4	4
Ord. 3	3	3	3	3
Ord. 4	4	1	5	5
Ord. 5	5	5	1	1
Tercer Juego de Pesos				
Métodos Utilizados				
	FUM	ELECTRE II	ELECTRE IV	PROMEDIOS PONDERADOS
Ord. 1	2	4	2	2
Ord. 2	1	2	1	4
Ord. 3	3	3	3	3
Ord. 4	4	1	4	5
Ord. 5	5	5	5	1

Entre las cinco alternativas consideradas, la que prevalece para los diferentes métodos y juegos de pesos es la alternativa 2 (reforestar toda la cuenca), seguida de la alternativa 4 (aumento de un 39% del área en bosque).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los elementos analizados se pueden hacer las siguientes observaciones acerca del diagnóstico de la erosión y deposición:

- La planificación del manejo de una cuenca busca principalmente frenar la aceleración de la erosión, lo cual se puede lograr al aumentar la capacidad de infiltración de la cuenca, disminuir la carga de sedimentos y estabilizar los cauces. Todo esto favorecerá el establecimiento de la vegetación, la que a través de un adecuado manejo, puede equilibrar el sistema.
- Del presente estudio se puede concluir que las principales causas del aumento de producción y transporte de sedimentos en la cuenca de la quebrada Santa Bárbara se debe a:
 - Alta torrencialidad de la cuenca producida por:

Uso del suelo: 80% pastoreo
Manejo del suelo: Sobrepastoreo
Altas precipitaciones: 3200 mm
Altas pendientes: Mayores del 30%
 - Material geológico erosionable en contacto con el agua.
 - Ausencia de cobertura vegetal en orillas de las quebradas.
- Las metodologías USLE, MUSLE, ANSWERS, y SWRRB sólo tienen en cuenta la erosión laminar presente en la cuenca y dejan de lado los movimientos en masa.
- La calibración de los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), de la MUSLE, y del ANSWERS, puede ser realizada mediante la comparación de los resultados obtenidos al aplicar los modelos con unos estimativos iniciales, con valores reales medidos en la cuenca, mejorando la confiabilidad de los resultados obtenidos finalmente.
- Mediante la aplicación del modelo ANSWERS, se pueden obtener las respuestas de los sistemas de la cuenca ante manejos futuros de la misma, permitiendo obtener una cuantificación de los cambios que se generarían varios años después de ser implementados, facilitándose de esta manera la escogencia de la solución más adecuada al problema en estudio.
- Las investigaciones indican que los distintos suelos pueden perder de 0.4 a 1.8 ton/ha/año sin producir daños significativos. Si se aplica esta relación a la situación actual de la cuenca analizada, se tiene una tasa de erosión representativa de 0.5 ton/ha/año para aproximadamente 50 % de la cuenca. La situación debe ser controlada con el fin de que no se acelere. Si a una parte de la cuenca se le cambia el tipo de cobertura (reforestar 33% área) la mayor parte de la cuenca presenta una tasa entre 0.1 y 0.5 ton/ha/año. Esto demuestra la sensibilidad de la respuesta ante diferentes valores de C, convirtiéndose prioritario su correcta calibración, la cual se puede lograr a través de la obtención de la información de parcelas de medición de erosión.
- Según los resultados obtenidos con los diferentes métodos para la estimación de la erosión laminar, la determinación correcta del factor C es muy importante, ya que al disminuir éste se puede reducir el potencial erosivo en más del 80% para la cuenca. En consecuencia, el control de la erosión de los suelos puede hacerse en la medida en que se implementen prácticas de manejo y control de ella que conlleven a una dis-

minución o mantenimiento no sólo del factor C, sino de los demás factores y por ende del potencial erosivo que estos puedan causar.

- Las metodologías de la Corporación del Valle del Cauca y de la Unidad de Recursos Naturales de E.P.M para la priorización de cuencas, deben considerarse como parte de todo un proceso, cuya función es detectar el área o las áreas en que inicialmente debe formularse algún plan de mejoramiento.
- Los métodos de Análisis Multiobjetivo aparecen como una herramienta eficaz que permiten la evaluación de diferentes planes de manejo bajo objetivos múltiples y en forma explícita, es decir, permiten estudiar la contribución de cada plan alternativo a cada uno de los objetivos para los cuales se planifica de manera que al final se escoja el plan más óptimo para su implementación.
- El orden de las acciones a realizar en la cuenca son: en primer lugar introducir modificaciones en el uso del suelo de la cuenca, luego realizar el tratamiento de los derrumbes y en tercer lugar la protección de orillas mediante reforestación y construcción de obras civiles en algunos lugares. Sin embargo la consideración de otros objetivos (social, económicos e institucionales) pueden alterar la secuencia de la priorización.
- No existe una solución única del problema de las cuencas hidrográficas, pues la solución óptima depende de las condiciones existentes (biofísico, económicos, sociales) de la cuenca, así como de los objetivos que se busquen y de las funciones de utilidad que se fijen.
- Las metodologías de priorización de cuencas no deben desecharse, más bien, deben combinarse con las metodologías de análisis multiobjetivo. Con la primera metodología se busca determinar la región donde se puede lograr un gran avance o mejora y con las segundas metodologías implantar o desarrollar la acción o las acciones que permitan obtener un mayor porcentaje de los objetivos propuestos.
- Los SIG representan una poderosa herramienta de análisis y modelamiento de diferentes problemas que tienen en común el manifestarse espacialmente. El fin principal de un SIG es contribuir a la toma de decisiones, con base en el análisis de los datos que ingresan en el mismo. La posibilidad del análisis y modelamiento es lo que diferencia un SIG de un sistema de cartografía computarizado.
- Gracias a la utilización de un SIG, en este caso el ARC/INFO, en la aplicación de este estudio, se pudo observar los cambios que sufre la cuenca cuando se aplica un plan de manejo especial, o se produce un cambio de cobertura notable.
- En general, la estimación de la erosión de suelos se obtuvo aplicando el modelo ANSWERS. Mediante la aplicación del SIG ARC-INFO se pudo construir parte del archivo de datos requerido por el modelo, a partir de una digitación de los mapas requeridos.
- El sistema de apoyo implementado tiene como base una serie de metodologías recomendadas. A medida que se desarrollen nuevas técnicas y con mayor aplicabilidad a nuestro medio, éstas

pueden ser incorporadas a este sistema de apoyo a la toma de decisiones.

- La sistematización de las metodologías que conforman el sistema de apoyo a la toma de decisiones, permite que cualquier usuario pueda hacer uso de ellas en forma eficiente y práctica.

REFERENCIAS

- Alvarez, H. M. e Hincapié, A. M., 1990. Modelamiento matemático de los procesos hidrogeomorfológicos en una cuenca rural. Trabajo Dirigido de Grado. Facultad de Minas. Universidad Nacional. Medellín. Colombia. p 104-155.
- AMBIENTEC LTDA. 1984. Proyecto hidroeléctrico de Cañafisto. Estudio ecológico. ISA. Bogotá, Colombia. p 126-135.
- Aronoff, S., 1989. Geographic Information Systems. A management Perspective.
- Beasley, D. B., 1977. ANSWERS: A mathematical model for simulating the effects of land use and management on water quality. Ph. D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 266.
- Beasley, D. B., L. F. Hunggins and E. J. Monke, 1980. ANSWERS: A model for watershed planning. Transactions of the ASCE. 23(4):938-944.
- Borrough, P. A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment.
- CENICAFE, 1975. Manual de Conservación de suelos de ladera. Cenicafe, Chinchiná. 267p.
- Colegio de Posgraduados, Chapingo, México, 1977. Manual de conservación del suelo y del agua. 584p.
- De la Hoz, J. E., 1990. Manejo integrado de cuencas bajo criterios multiobjetivos. Tesis de Magister en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Universidad Nacional. Medellín, Colombia. P222.
- Duque, J. D., 1988. Determinación de la susceptibilidad erosiva de la cuenca de la Quebrada Santa Isabel. Tesis de Magister en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional, Facultad de Minas.
- Empresas Públicas de Medellín, División Medio Ambiente, 1986. Estudio del problema de sedimentación en Carolina, diagnóstico y formulación de soluciones.
- ESRI PC-ARC/INFO, 1990. Understanding GIS.
- Foster, G. R., 1982. Modeling the erosion process. In: Hydrologic Modeling of small watersheds. American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, MI.
- Foster, G. R. L. D. Meyer and C. A. Onstand, 1977. An erosion equation derived from basic erosion principles. Trans. ASAE 20(4): 678-682.
- Gallopín C. G., 1977. Enfoques alternativos en la evaluación del impacto ambiental. Seminario sobre Metodologías para la evaluación del Impacto Ambiental,

- Fundación Bariloche, 28 de Nov. al 9 de Dic.
- Goicoechea, A., D.H. Hansen and L. Duckstein, 1982. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, 517 pp.
- Hermelin, S.C., 1987. Estimación de los efectos de las diferentes prácticas de conservación de suelos a nivel de cuenca. Mérida Venezuela, CIDIAT, Tesis Magister. 285pp.
- Kirkby, R. P., 1984. Erosión de Suelos. Editorial Limusa. Colombia.
- Mejia C., L., 1983. Pedalogía descriptiva. Santa Fe de Bogotá, Centro Interamericano de Fotointerpretación -CIAF-, 176p.
- Meyer, L. D. and W. H. Wischmeier., 1969. Mathematical simulation of the processes of soil erosion by water. Transactions of the ASAE. 12(6):754-758.
- Roy C, S., 1985. Hillslope stability and land use. Water resources Monograph. Washington, D. C., 140p.
- Smith R.A., Poveda G., Valencia D., Mesa O.J. y Dynner I., 1993. Decisiones e Incertidumbre en el Análisis Multiobjetivo. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado de Recursos Hidráulicos, Medellín.
- Universidad Nacional de Colombia, 1990. Evaluación de la metodología utilizada para la definición de prioridades en cuencas hidrográficas y su aplicación a la cuenca de la Quebrada Santa Bárbara. Investigación realizada para Empresas Públicas de Medellín.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. U. S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 537.

