

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA DE MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL

**VALORACIÓN DE IMPACTOS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA DE
PROYECTOS DE REHABILITACIÓN DE CUENCAS**

**Requisito par optar al Título de Magíster en Ingeniería Civil en el Área de Ingeniería
Ambiental**



ALVARO MARTÍN GUTIÉRREZ MALAXECHEBARRÍA

ASESOR: MARIO DIAZ-GRANADOS

Bogotá, 2004

INTRODUCCIÓN

Actualmente existen diversos métodos de evaluación económica y de valoración de impactos de las actividades que repercuten sobre las condiciones del medio ambiente. Sin embargo, las metodologías propuestas no relacionan estos aspectos de forma clara ni frecuente, en especial cuando se trata de proyectos de rehabilitación de cuencas.

Para casos de proyectos de rehabilitación de cuencas se debe tener en cuenta que los recursos técnicos, humanos y en especial los económicos son limitados. Por lo tanto, es necesario analizar diferentes escenarios para obtener el programa de acciones que ofrezca alcanzar el objetivo deseado. Para realizar este análisis se deben interrelacionar la evaluación económica y la valoración de impactos sobre un modelo hidrológico. Este documento pretende establecer una metodología general que interrelacione los análisis anteriormente comentados.

El trabajo se llevó a cabo realizando una completa revisión bibliográfica para dar sustento teórico a los pasos a seguir, explicando alternativas de rehabilitación de cuencas, seguida de una breve explicación de métodos de valoración de impactos.

Para cuantificar los impactos se utilizó el modelo SWAT, que es un modelo hidrológico distribuido que permite interrelacionar las características geomorfológicas y de cobertura de la cuenca con cálculos de caudales producidos de forma continua en el tiempo. A través de la ecuación universal de pérdidas del suelo (USLE) se evaluaron las tasas de erosión en la cuenca. Lo anterior se aplicó a un caso de estudio del que se tenía suficiente información para comparar los resultados obtenidos con datos reales.

Para el análisis se tomó la Cuenca del Río Tona por estar suficientemente estudiada, especialmente en el Plan de Ordenamiento Territorial Microcuenca Río Tona, realizado por GRADEX Ingeniería para la CDMB.

Utilizando los modelos anteriormente mencionados se cuantificaron los impactos para el caso de estudio. Se variaron las condiciones actuales de la cuenca considerando escenarios de cambio de uso del suelo. En el primer caso se mantuvieron las condiciones actuales. Para el segundo caso se simuló la reforestación de la totalidad de la cuenca y por último se consideró reforestar áreas seleccionadas por la CDMB correspondientes al 34% de la cuenca. Cuantificados los impactos se procedió a realizar la evaluación económica de los cambios en las condiciones de uso actual.

La metodología establecida en este trabajo relaciona evaluaciones económicas y valoración de impactos para proyectos de rehabilitación de cuencas bajo diferentes escenarios. No obstante, se deben tener en cuenta las condiciones propias de cada caso para definir un plan de acción óptimo.

1. DETERIORO Y REHABILITACIÓN DE CUENCAS

Las cuencas hidrográficas son unidades del territorio donde funciona la combinación de un subsistema hídrico que produce agua, junto con un subsistema económico y social, activado por el hombre, el capital, el trabajo y la tecnología. En ellas se producen bienes y servicios agrícolas, pecuarios, forestales y recreativos que son demandados principalmente por las poblaciones localizadas aguas abajo. Su comercialización produce ingresos y contribuye al desarrollo. Sin embargo, en ese proceso productivo se genera un conjunto de subproductos de efectos indeseables, como la erosión, la disminución de la productividad agrícola, los flujos de retorno contaminados, la disminución de la biodiversidad y de los caudales de estiaje, etc. (Hernández, 1999). La magnitud de esos efectos indeseables es mínima y tolerable siempre que el aprovechamiento de los recursos y el uso de las tecnologías de producción tengan una filosofía de acuerdo a los principios ecológicos del desarrollo sostenible.

Sin embargo, cuando la población y la sociedad se apartan de principios del desarrollo sostenible, entonces la cantidad de subproductos indeseables generados adquiere niveles que degradan el sistema, su producción y su población. Se disminuye progresivamente la capacidad productiva empobreciendo la población localizada dentro del área, eliminando posibilidades de desarrollo y creando riesgos

a la salud de la población ubicada aguas abajo, que dependen del agua que proviene de las cuencas montañosas.

Se puede considerar que una cuenca se encuentra en proceso de deterioro cuando en las cuencas ocurre un proceso activo de deforestación del bosque, con pérdida de la biodiversidad vegetal y animal, un aprovechamiento agrícola inadecuado de las tierras, presencia creciente de plagas en los cultivos agrícolas, cacería excesiva de especies de la fauna silvestre, contaminación de las aguas por exceso de agroquímicos, deterioro de las fuentes de agua, aparición de conflictos entre pobladores por demanda insatisfecha de agua, empobrecimiento de la población y éxodo rural. En algunos casos la minería ilegal es otro problema creciente de contaminación de ríos importantes.

Existe entonces un círculo de degradación de las cuencas altas que atenta contra la promoción del desarrollo aguas abajo y éste sobre el desarrollo regional. El deterioro de las cuencas, aguas arriba, crea déficit en la disponibilidad de agua en las fuentes para cubrir la demanda, poniendo en dificultades las opciones del desarrollo regional por falta de fuentes de agua.

A los problemas anteriores se unen el deterioro de la calidad de la esorrentía que surte acueductos, por uso excesivo de agroquímicos que produce efectos preocupantes sobre la salud de la población.

Una gran variedad de estudios ha diagnosticado las causas del deterioro de las cuencas hidrográficas de montaña en América Latina. Se pueden clasificar en 3 grandes grupos (Sheng T. C. 1986):

- 1) Las vinculadas al medio físico natural que se relacionan con la fragilidad propia de los ecosistemas de montañas jóvenes.
- 2) Las condiciones de la población, entre ellas el aumento explosivo, la búsqueda de su sobrevivencia y la pérdida de la autoestima a medida que se empobrece.
- 3) El “estilo de gobierno y de desarrollo” caracterizado por enfoques muy segmentados junto con excesivos celos interinstitucionales, lo que dificulta la acción coordinada. A esto se agrega actitudes de paternalismo y clientelismo. No se brinda suficiente importancia a la actividad de asistencia técnica y de extensión agroecológica, debido la escasez de recursos financieros, que en buena parte son absorbidos para el pago de la deuda externa o se dilapidan en una mala gerencia o en comportamientos contrarios a la ética del manejo de los dineros públicos. A veces se aplican paquetes tecnológicos importados sin la adecuada validación local.

Cada etapa está integrada por una serie de factores. La primera serie se denomina (1) impacto socioeconómico que se considera el activador u originador de otras dos etapas consecutivas. Los factores sociales y económicos, explosión de masas sin educación o poco educadas y emigración asociada con la pobreza, son las

principales razones inherentes al comportamiento humano y a la dinámica de población de las comunidades locales. El rápido incremento de la población altera el equilibrio sostenido entre los recursos de la cuenca y la demanda lo que se traduce en un fuerte impacto sobre el medio ambiente. La desesperación socioeconómica fuerza a la población a destruir bosques y pastizales, y recursos hídricos.

De este modo la segunda etapa del círculo vicioso (2) Abuso de los recursos de tierras, comienza con a) la transformación de bosques y pastizales para otros usos inadecuados, b) la utilización residencial e industrial de tierras de cultivo y c) abusos en la agricultura y la silvicultura.

Todas estas actividades y abusos precursores activan el (3), problemas reales concretos como (a) erosión, torrentes, deslizamientos de tierras, (b) inundaciones, (c) contaminación ambiental, (d) degradación del régimen hidrológico de una cuenca (e) escasez de agua y alimentos. La tercera serie de estos problemas concretos, al igual que las otras etapas de estas reacciones consecutivas en cadena, completa el ciclo de este círculo vicioso y acelera sumamente las magnitudes del impacto socioeconómico en la primera etapa.

En La figura 1.1 pueden observarse la interrelación entre las etapas mencionadas anteriormente

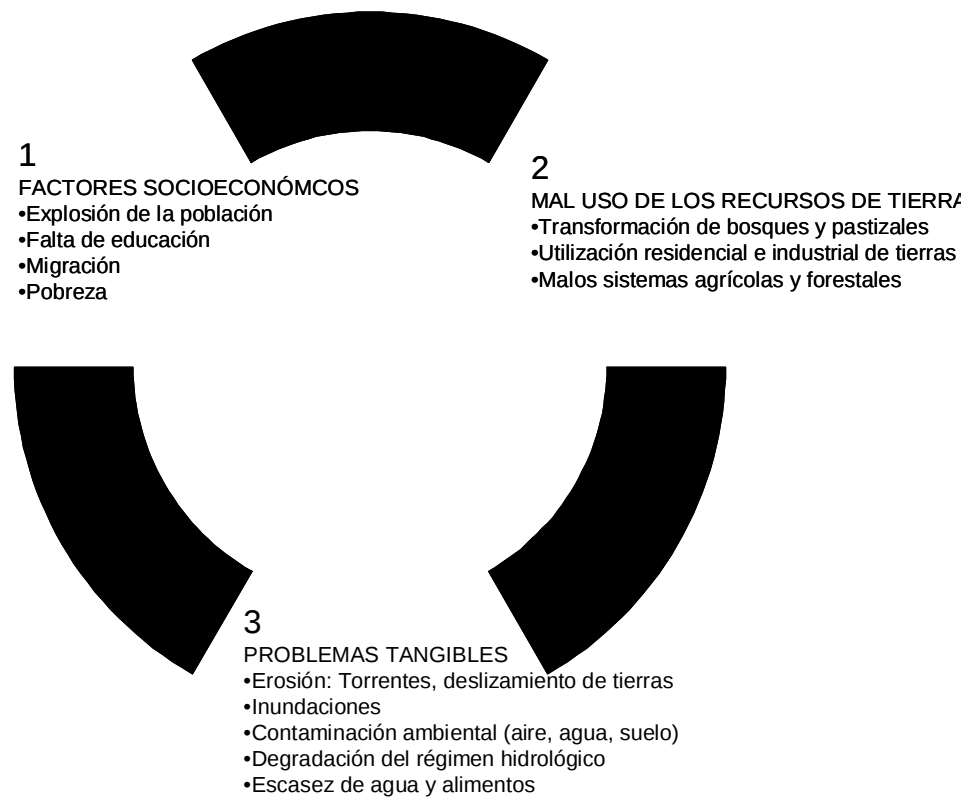


Figura 1.1 Círculo vicioso de la degradación de los recursos de una cuenca.

(Özyuvac et al. 1999)

1.1 REHABILITACIÓN

La rehabilitación consiste en aplicar procedimientos destinados a reparar las cuencas degradadas por prácticas nocivas, accidentales o intencionales, tales como incendios repetidos, pastoreo excesivo, la corta abusiva de madera, empleo de malas prácticas y en general, el uso de la tierra para fines que estén en desacuerdo con sus aptitudes.

Las acciones y actividades de la ordenación integrada de cuencas puede emplearse a través de dos métodos principales: (1) el método preventivo y (2) el método de rehabilitación. Las actividades y las medidas administrativas y técnicas pueden emplearse en un orden consecutivo o en algunos casos pueden tener lugar simultáneamente al mismo tiempo en una cuenca determinada. Por ejemplo, la conservación de los recursos de suelos y aguas se puede lograr mediante normas legales y el uso apropiado de las tierras de acuerdo con las clases de capacidad (método preventivo). Análogamente, en algunos casos graves, pueden mencionarse medidas técnicas como reforestación, estructuras de control de torrentes, trabajos de estabilización de cauces, aterrazado, empalizadas, fajinadas, diques de contención y obras de dispersión de las aguas (método de rehabilitación).

La ordenación y manejo de cuencas significa la decisión política de actuar decididamente con una fuerte coordinación interinstitucional en todo el sistema-cuenca, agua arriba y aguas abajo, para promover la aplicación de políticas de desarrollo sostenible, privilegiando el valor estratégico del recurso hídrico, insertada en políticas de desarrollo regional, con enfoques de cogestión y autogestión y en función de las potencialidades y limitaciones del ecosistema.

Para enfrentar la compleja situación de la conservación y desarrollo de las cuencas de montaña los gobiernos, sus técnicos y las universidades han ensayado diferentes estrategias con éxito variable, una de ellas la ordenación y manejo integral de cuencas hidrográficas. Esta ha sido una estrategia de trabajo para la conservación de las zonas montañosas, aplicada desde principio de siglo en los Alpes, en las montañas rocosas, en los Apalaches, en los Andes, en Asia y en Japón, por inspiración y motivación de los forestales, quienes desde un principio han estado conscientes de la necesidad de mantener interrelaciones óptimas entre los bosques, las aguas, la fauna y los suelos dentro de los ecosistemas montañosos. En su devenir se han desarrollado seis grandes variantes: el control de torrentes, el manejo hidrológico forestal de vertientes, el manejo hidrológico, el manejo integral de cuencas y la más reciente de recuperación de ecosistemas hídricos.

El manejo integral de cuencas se puede concebir, siguiendo la definición presentada en el trabajo sobre terminología de la FAO, como “la formulación y aplicación en toda la cuenca hidrográfica, tanto aguas abajo como aguas arriba, de un conjunto integrado de acciones en la búsqueda del desarrollo sostenible, minimizando los efectos ambientales negativos sobre el recurso hídrico que la población utiliza aguas abajo”.

Los mayores problemas que afrontan las cuencas hidrográficas se deben al mal uso dado por el hombre a los suelos, permitiendo la desprotección de estos ante la acción negativa del agua, que genera problemas erosivos, colmataciones, derrumbes y empobrecimiento paulatino de tierra laborable, para controlar estos factores es necesario el establecimiento de prácticas de conservación y rehabilitación que permitan conservar y restaurar los suelos y las aguas de tal manera que produzcan los máximos beneficios por el mayor tiempo.

Las prácticas utilizadas en rehabilitación de cuencas se pueden clasificar en medidas vegetativas y estructurales.

1.1.1 Medidas vegetativas

La cubierta vegetal ofrece importantes beneficios: protege los suelos de la erosión amortiguando el choque de las gotas de agua con el suelo, ofrece resistencia al movimiento y disminuye la velocidad de escurrimiento, las raíces contribuyen a

amarrar el suelo y las raíces y los residuos vegetales mejoran la estructura del suelo. Las prácticas de conservación más utilizadas mediante el control de vegetación son:

Ordenación de cultivos: Consiste en hacer una ordenación territorial de los recursos, con el fin de que cada uno produzca los mayores beneficios a costa del menor daño posible.

Siembra de bosques: Los bosques constituyen una herramienta esencial para luchar contra la erosión hídrica, la protección ofrecida es mayor en cuanto es más racionalmente mantenido y explotado. Las cubiertas de las copas de los árboles interceptan la mayor cantidad de lluvia que cualquier otra vegetación reduciendo su energía erosiva, las gotas de agua lluvia son absorbidas rápidamente por la hojarasca de donde pasa a una superficie muy porosa del suelo.

Utilización de praderas: Una alfombra espesa de gramíneas o de gramíneas y leguminosas disipa la energía de las gotas de lluvia, impidiendo casi completamente la apertura de la superficie del terreno. Asimismo el avance del agua de escurrimiento se hace más lento, haciendo que el agua casi no transporte tierra.

Siembras en contorno: Consiste en colocar las plantas en hileras a través de la pendiente siguiendo las curvas de nivel, permitiendo que las plantas formen barreras donde choca el agua que corre sobre el terreno, disminuyendo la velocidad e interceptando parte del suelo transportado

Coberturas vegetales: Consiste en mantener una cubierta densa y permanente de plantas que tengan sistemas radiculares superficiales y de poca competencia en el cultivo o raíces profundas no fasciculadas. Estas coberturas amortiguan el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y forman una superficie rugosa que disminuye la velocidad del agua de escorrentía.

Barreras vivas: Son hileras permanentes y de crecimiento tupido, sembradas a través de la pendiente, el objeto de estas es disminuir la velocidad del agua que corre sobre el terreno para disminuir su capacidad de arrastre. Un esquema de este sistema se ve en la figura 1.2

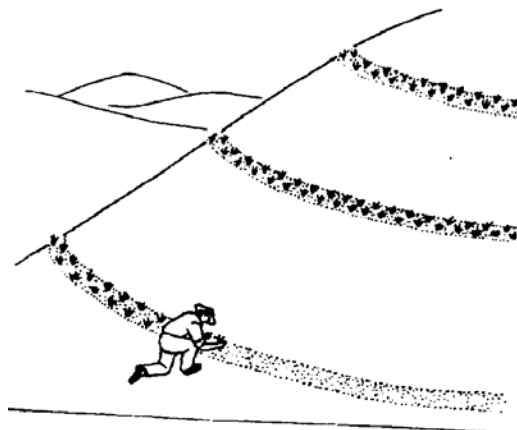


Figura 1.2 Sembrado de barreras vivas

Cultivos en fajas: Consiste en sembrar plantas que requieren desyerbas periódicas y otras labores de remoción del suelo, en fajas transversales, alternándolas con calles formadas por vegetación densa. Este sistema además de disminuir la velocidad del agua de escorrentía, aumenta la infiltración del agua en el suelo cubierto con cultivo denso.

Sombrío: Este sistema produce hojarasca complementada con una buena cobertura vegetal que impide el arrastre de estos residuos por el agua de escorrentía.

1.1.1 Medidas estructurales

Las medidas estructurales están orientadas a actuar sobre la escorrentía y a ofrecer refuerzo sobre las condiciones geotécnicas del terreno. En esta clase se sitúan la mayoría de los medios mecánicos de lucha contra la erosión hídrica. Estas prácticas, generalmente son las más costosas y se recomienda su uso cuando otras prácticas sean insuficientes.

Dentro de las medidas estructurales más comunes se mencionan las siguientes:

Protección y adecuación de desagües naturales: Se trata de evitar la formación de cárcavas y derrumbas mediante la adecuación de los cauces,

mediante el establecimiento de plantas protectoras, en caídas fuertes se recomienda hacer escalones de piedra, fajas de pasto, y en general la colocación de todo tipo de obstáculos para disminuir la velocidad del agua, un esquema del sistema se muestra en la figura 1.3

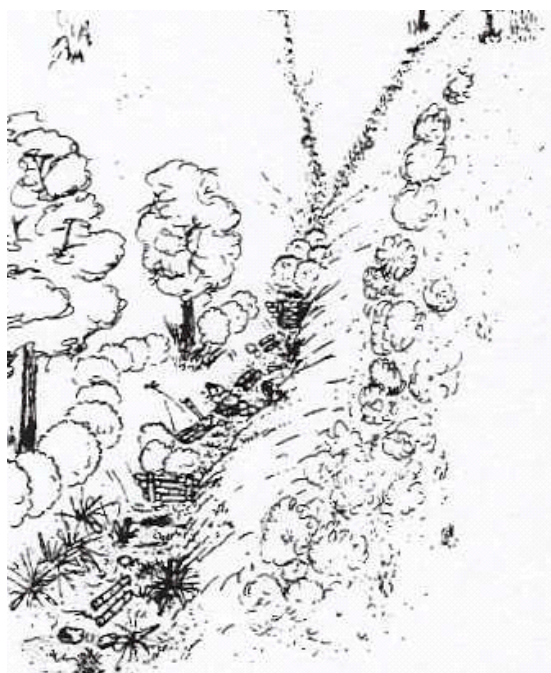


Figura 1.3 Adecuación de desagües naturales

Zanjillas de desagüe: Similares a las anteriores pero su objetivo es el de evacuar las aguas a intervalos cortos, se utilizan en zonas lluviosas con pendientes fuertes.

Canales de drenaje o desviación: Plantea la necesidad de aislar una zona, de tal manera que sobre este suelo solo tenga influencia el agua lluvia que le cae directamente.

Acequias de ladera: Son pequeños canales contruidos a través de la pendiente a intervalos, las acequias dividen la longitud de la falda disminuyendo así el volumen y la velocidad de las aguas de escorrentía. Su finalidad principal es la de sacar lentamente el sobrante de aguas lluvias a lugares protegidos.

Terrazas: Es la construcción de partes planas o de suave pendiente, formando una especie de escalones continuos, un tipo de estas se muestra en la figura 1.4

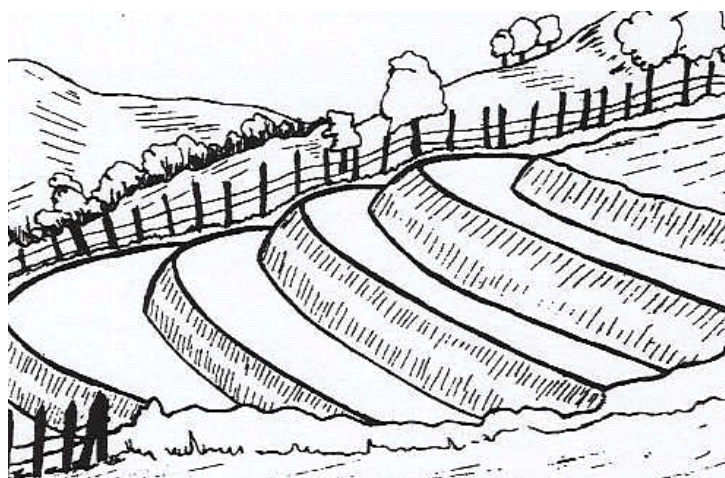


Figura 1.4 Terrazas de banco

Gaviones: Son cajas rectangulares de alambre galvanizado que se rellenan de piedra y se colocan a la orilla de los ríos o en taludes de carreteras, tienen el efecto de un muro de sostenimiento debido a su propio peso, con la ventaja de que por su flexibilidad pueden variar su forma sin perjuicio de su estabilidad, adicionalmente sirven de filtro, adicionalmente sirven como espolones con el fin de encauzar la corriente.

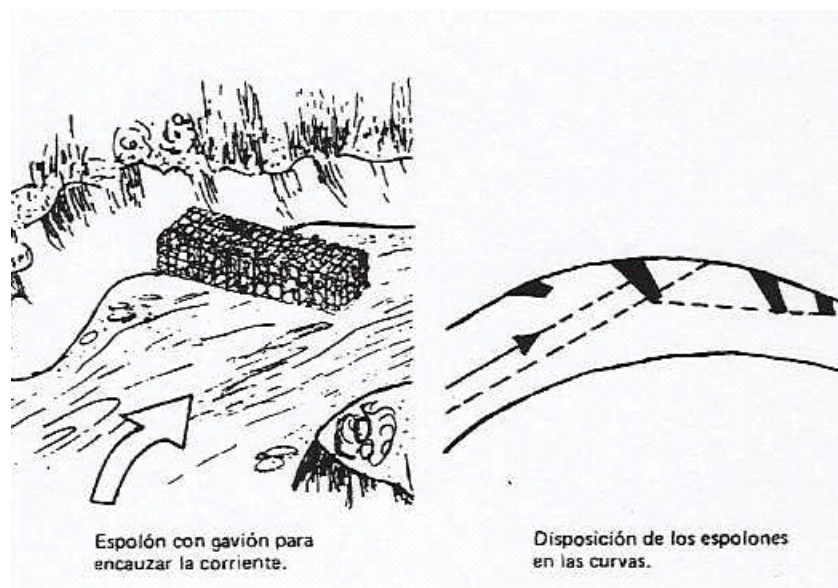


Figura 1.5 Utilización de gaviones para encauzar la corriente

Muros de contención: También llamados diques, son construidos para almacenar agua. Se construyen en concreto o mampostería, su estabilidad esta asociada a su propio peso y a su base para evitar el volcamiento.

A continuación en la tabla 1.1 se muestran las ventajas y desventajas de la rehabilitación de cuencas a través de medidas de vegetación y de medidas estructurales.

Tabla 1.1 Comparación de beneficios ofrecidos por medidas de vegetación y medidas estructurales en proyectos de rehabilitación de cuencas (adaptado de Kozarik, 1999)

MEDIDAS DE VEGETACIÓN	MEDIDAS ESTRUCTURALES
Por lo general menos costosas y pueden proporcionar subproductos (madera, combustibles, provisión de alimentos y fibras, etc.), además de cumplir con el objetivo de conservación.	Costosas y no brindan subproductos
La eficiencia puede variar con las condiciones climáticas	Proporcionan efectividad positiva y rara vez son afectadas por las variaciones estacionales
El grado de control es difícil de calcular debido a los numerosos factores sobre los que es imposible conseguir datos básicos	Pueden diseñarse para un grado preciso de control o efectividad
Requieren mayor tiempo, antes de que el control máximo sea eficiente	Se consigue un control máximo en tanto son completadas
Pueden instalarse en gran variedad de lugares	Solamente pueden instalarse donde la topografía ofrece lugares apropiados
Requieren un plan de manejo	El mantenimiento puede ser oneroso

En el presente trabajo se escogió como medida de rehabilitación la reforestación con bosque plantado debido a sus ventajas, ya estudiadas, y teniendo en cuenta el programa establecido por la Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga de establecer cultivos productivos de árboles, como estrategia de conservación productiva.

2. VALORACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

A pesar de que los recursos naturales pueden considerarse activos que generan retornos al prestar flujos de servicios a la sociedad, las fuerzas del mercado fallan en revelar los precios que reflejen sus verdaderos valores sociales. Por lo general se caracterizan por poseer externalidades y propiedades de bienes públicos. Esta "economía" del medio ambiente se entiende como un sistema complejo que ofrece un amplio rango de bienes y servicios, involucrando criterios de escasez, trade-offs entre ellos y presencia de costos de oportunidad.

La economía del bienestar provee criterios para tomar decisiones de inversión donde el mercado falla y se requiere de la inversión o supervisión estatal. La presencia de externalidades es considerada por la teoría económica como una de las principales fuentes de falla del mercado.

Al alterarse las condiciones naturales de una cuenca, se pone en riesgo el recurso y por lo tanto este servicio tiene un valor para la sociedad, de acuerdo con Canessa, 2000, las funciones que cumple la naturaleza se pueden definir en cuatro tipos:

- Las que regulan procesos ecológicos y dan sustento a la vida, contribuyendo al mantenimiento de un ambiente sano (radiaciones atmosféricas, clima local y global, acumulación y recarga de acuíferos)
- Las que proveen el espacio para el sustento y desarrollo de las actividades humanas (habitación humana y asentamientos, protección de la naturaleza, recreación y turismo).
- Las referentes a producción de bienes, desde comida hasta materias primas (oxígeno, agua, recursos genéticos).
- Las que ofrecen educación y oportunidades de investigación, reflexión y/o serenidad (información estética, espiritual y religiosa).

De acuerdo con los beneficios directos e indirectos recibidos por los seres humanos, las funciones producen un valor ecológico, social y/o económico. La economía del bienestar asienta que los valores económicos se expresan en términos de disposición a pagar por los individuos y la disposición a aceptar compensaciones. Pearce y Turner, 1995, citados por Canessa, 2000 establecen tres relaciones básicas de valores:

- Valor de preferencia pública (normas sociales).
- Valores expresados a través de preferencias individuales.
- Valor físico del ecosistema.

Los mismos autores mencionan que los ecólogos ponen mayor énfasis entre el valor instrumental (valores humanos) y un valor intrínseco o inherente de un bien ambiental que existe independientemente de la presencia o no de los seres humanos. Los economistas utilizan el término valor de existencia para incorporar el valor intrínseco, "el cual identifica un valor ambiental que no está relacionado con ningún uso, ni actual ni potencial del bien", motivados por las funciones de legado hacia las futuras generaciones. Además el valor ambiental obedece a un sinnúmero de posibilidades definidos en un extremo por las posturas derivadas de la ética antropocéntrica en donde lo que le concede valor a las cosas, incluido el medio ambiente, es su relación con el ser humano. El análisis económico mira a la naturaleza desde una óptica de valor instrumental para el ser humano.

2.1 USOS DEL VALOR ECONÓMICO

La mayoría de los recursos se valoran por sus usos. El valor de existencia ocurre como una noción paralela al legado o altruismo. El valor total refleja la disponibilidad de un individuo a pagar para preservar o mantener un recurso en su estado presente. Si el valor total excede el valor de uso, la diferencia es un valor de no uso, o, un valor de existencia, valor intrínseco, o valor de preservación.

Barbier, 1997, propone dos categorías base para determinar el valor económico total: valor de uso y de no uso. Pero a diferencia de la descripción anterior, divide

el valor de uso en tres sub-categorías: valor de uso directo (consumo humano, agricultura, recreación, etc.), valor de uso indirecto (control de inundaciones, retención de sedimentos, etc.) y valor de opción (demanda futura de agua, usos futuros del agua deferentes a los actuales, etc.). Por otra parte el valor de no uso lo divide en valor de existencia (científico, religioso, cultural) y valor de herencia (legado del conocimiento sobre usos de agua, usos sostenible de cuencas para futuras generaciones).

2.2. LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN INDIRECTOS

Los métodos indirectos de valoración están basados en observaciones del comportamiento. Si se considera q como un parámetro ambiental o de calidad del recurso natural, el problema consiste en estimar en términos monetarios el cambio en el bienestar para un individuo asociado a un cambio en q estos incrementos se determinan a partir de observaciones donde:

- q es un factor o insumo en la producción de un bien mercadeable que genera utilidad.
- q es un factor de insumo en la función de producción de hogares que produce utilidad resultante de los bienes producidos
- q puede producir utilidad directamente en la función de utilidad de los individuos.

Para implementar estas medidas de beneficio indirecto, se deben conocer los efectos del cambio en q en los costos de producción, las condiciones de oferta del producto, la curva de demanda por el producto y la oferta de factores.

2.3 LA FUNCIÓN DE DAÑO

De acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación, 1998, a manera de resumen, la función de daño incluye los siguientes pasos:

- Obtención de una función de daño: Determina una función donde la variable dependiente es el daño físico causado, en función de una variable que representa la causa del daño.
- Planteamiento del cambio actual en la contaminación dado el cambio en la política ambiental: relaciona los cambios en la contaminación del ambiente o degradación de un recurso natural, producto de emprender una acción política.
- Calcular el daño evitado o los beneficios en términos monetarios: se estima el producto entre el cambio actual en la contaminación y el valor monetario por unidad de daño físico.

De acuerdo con Canossa, 2000, este método ha sido muy utilizado en trabajos que relacionan los efectos de cambios en el medio ambiente con los impactos o

cambios en los niveles de producción de empresas y sirve como una aproximación al cálculo del daño causado por la contaminación.

Para el caso de cuencas, que es el estudiado en este documento, el mayor impacto que puede presentar el recurso hídrico es causado por el uso inadecuado del suelo, cuyos efectos serían un incremento en los sedimentos u una disminución en los caudales, por lo que se hace necesario evaluar estas variables físicas.

2.4 EXTERNALIDADES

De acuerdo con Baumol y Oates (1989) las externalidades cumplen dos condiciones:

1. Se presenta una externalidad cuando las relaciones de utilidad o producción de un individuo incluyen variables reales cuyos valores son escogidos por otros sin tener en cuenta los efectos que están produciendo en el bienestar del primero.
2. El que toma la decisión, cuya actividad está afectando los niveles de utilidad de otros o entrando en su función de producción no recibe compensación por sus actividades una cantidad igual en valor a los beneficios resultantes.

El bienestar de los individuos que conforman la sociedad depende, además de su consumo de bienes y servicios privados y gubernamentales, de aquellos originados por la interacción con el sistema ambiente-recursos.

Con respecto a los anterior Freeman (1993) citado por García en 1996 establece que los individuos tienen preferencias definidas entre canastas de bienes que se componen tanto de bienes de mercado como de bienes de no mercado. Adicionalmente las personas conocen sus preferencias permitiendo hacer sustituciones entre los bienes de mercado y no mercado que componen la canasta, lo que se constituye en el fundamento de la valoración económica, pues la sustitubilidad establece las relaciones de intercambio entre pares de bienes, revelando, en alguna medida, el valor que el individuo asigna a cada uno.

Las preferencias de los individuos reflejan de manera indirecta un posible cambio en el bienestar, representado en como el parámetro ambiental q se incorpora en la función de utilidad, este parámetro puede afectar la función de utilidad produciendo utilidad indirectamente como factor en la producción de bienes de mercado que dan utilidad, como insumo en la producción de hogares de bienes que dan utilidad y como argumento de la función de utilidad.

Para los dos primeros casos si se puede inferir la interacción entre q y los bienes privados, se puede derivar el valor de q a partir de las observaciones individuales de las escogencias de bienes de mercado relacionados.

Cuando la calidad ambiental se considera un factor de producción, los beneficios del cambio en q pueden ser deducidos a través de los cambios en mercados observables, esto puede ser a través de un cambio en el precio del producto para los consumidores, o a través de un cambio en el ingreso recibido por los productores o dueños de los factores.

Para establecer con claridad las variaciones en q se necesita conocer el efecto del cambio de q en los costos de producción, las condiciones de oferta del producto, la curva de demanda por el producto y la oferta de factores.

Este tipo de análisis requiere que se presente una complementariedad débil entre un bien relacionado y el bien ambiental. Esta condición tiene implícita la posibilidad de estimar los beneficios de una mejora en la calidad ambiental por medio de la demanda de un bien débilmente complementario. Así se puede comparar un cambio de la calidad ambiental con su efecto sobre el bienestar.

Por su claridad de análisis el enfoque de la función de daños fue uno de los primeros en ser utilizados en el análisis de proyectos ambientales. Una de sus

técnicas principales es la conocida como “costos de reemplazo” en el que se supone que se puede medir el costo de reemplazar activos productivos que se han dañado por un manejo inadecuado. Estos costos se evalúan como el mínimo estimador del valor de las medidas que mejoran las prácticas de manejo, previniendo los daños.

De acuerdo con Azqueta (1994) “La propuesta, en términos generales, consiste en tratar de estimar una función de producción de la explotación o actividad afectada, en la que el bien ambiental se combina con el resto de factores de producción. Analizando el comportamiento maximizador de beneficios del productor en cuestión, sería posible estimar las elasticidades de respuesta, tanto de la composición de los cultivos, como de la combinación de insumos utilizada, ante un cambio en la calidad ambiental y, a partir de ahí, tratar de monetizar el valor de los cambios en el bienestar producidos.”

En particular para el tema que se trata en este documento, vale la pena aclarar que el cálculo del cambio en bienestar en servicios públicos puede ser diferente al cálculo convencional, debido a las distorsiones existentes por tratarse de un mercado regulado y por lo general monopolístico. La provisión de agua se cita como un ejemplo de monopolio natural, esto se entiende cuando una sola firma puede producir un producto de manera más eficiente que cualquier número de firmas pequeñas.

3. CASO DE ESTUDIO

La Cuenca escogida corresponde a la del Río Tona, se encuentra ubicada en el Departamento de Santander y sobre ella tienen jurisdicción los municipios de Tona y Bucaramanga. Tiene un área de 193.6 Km² se encuentran alturas desde los 800 msnm, cota que tiene en el punto de entrega de la cuenca, hasta los 4000 msnm.

El uso de suelo predominante es el agropecuario, caracterizado por la presencia de cultivos permanentes de café en la parte baja, cultivos limpios y semilimpios de hortalizas en la parte media y pastos de explotación lechera en la parte alta. Un uso de especial importancia actual, con gran proyección hacia el futuro, es el de bosques primarios, secundarios y plantados, promovidos en particular por la Compañía del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Escenarios que se analizarán en este estudio.

Por los considerables caudales transportados por el Río Tona y por su cercanía con la ciudad de Bucaramanga, existen dos plantas de potabilización de sus aguas, La Flora y Morrónico.

3.1 MORFOMETRIA

Los parámetros morfométricos son utilizados para relacionar las características de la cuenca con otras de valores similares, de manera que se pueda realizar una clasificación con cuencas de características similares. El análisis cuantitativo de estos parámetros se realizó en la cartografía 1:25.000, que corresponde a la utilizada para el estudio realizado por Gradex Ingeniería S.A.

La caracterización de la cuenca por su morfología, permite dar una idea sobre la influencia en la transformación de la precipitación, la escorrentía y en el efecto que esta tenga sobre las pérdidas de suelo. A continuación en la Tabla 2.1 se presenta un resumen de los parámetros morfométricos obtenidos por Gradex Ingenieros S.A. para el estudio citado.

Tabla 3.1 Parámetros Morfométricos Cuenca Río Tona

TIPO DE PARAMETRO	PARAMETRO	VALOR
Parámetros generales y de forma	Área	193.77 Km ² .
	Perímetro	74.96 Km.
	Longitud axial	23.8Km
	Ancho promedio	8.2 Km.
	Forma de la cuenca (índice de Gravelius)	Oblonga y tipo embudo
Parámetros de relieve	Altura media de la Cuenca	2273m
	Coeficiente de masividad	11.73
	Coeficiente orográfico (F. Fournier)	26,652 (Relieve Accidentado.)
Parámetros relativos a la red hidrográfica	Densidad de Drenaje	2.1 Km./Km ²
	Longitud del cauce principal	27.92 Km.
	Pendiente media del cauce principal	10.9%.
	Tiempo de concentración (Kirpich)	2.02 horas

3.2 CLIMATOLOGÍA

El análisis climatológico corresponde al realizado por Gradex Ingeniería S.A en su estudio para la CDMB en 2001.

Precipitación

La zona de estudio presenta un régimen bimodal, cuyos periodos de alta precipitación se ubican entre abril-mayo y septiembre-noviembre con valores que varían entre los 130 y 300 mm mensuales. Los meses de menor precipitación se presentan en el periodo diciembre-febrero con valores entre los 30 y 100 mm mensuales.

En promedio se presentan entre 9 y 16 días con precipitación al mes, y precipitaciones máximas diarias entre 20 y 50 mm.

Las zonas de mayor precipitación de la Cuenca del río Tona se presentan en los costados norte y sur central, en los cuales la precipitación promedio anual alcanza valores entre los 1900 y 2000 mm. La zona de menor precipitación se ubica en el costado este, con una precipitación promedio anual de 900 mm, costado sobre el cual se ubica la zona de subpáramo de la Cuenca. En el costado oeste se presenta una zona de precipitación media, con valores anuales cercanos a los 1300 mm. La precipitación media anual estimada es de 1396 mm.

Temperatura

Los valores más altos de temperatura se presentan durante los meses de marzo a mayo, y el menor en noviembre. Las temperaturas pueden variar entre valores muy cercanos a cero y 35°C. Las menores temperaturas medias se presentan en la parte alta, ubicada sobre el costado este, con valores cercanos a los 6°C. Los valores medios máximos de temperatura en la Cuenca oscilan entre los 22 y 23 °C, y se presenta en el costado oeste.

Humedad

De acuerdo a los registros existentes se estimó la humedad relativa media multianual en 81%

Brillo solar

El brillo solar anual varía entre 1472 y 1913 horas/año. El mayor brillo solar se presenta en los meses de diciembre y enero (aproximadamente 200 horas/mes) y el menor en los meses de octubre o junio (entre 90 y 130 horas/mes).

Velocidad del viento

Los valores medios multianuales en la zona se encuentran entre 1 y 2.8 m/s. Los meses con mayor velocidad del viento son febrero y marzo, y noviembre y diciembre. Los meses que presentan menores valores son junio, julio y noviembre.

Evapotranspiración

Se estimaron valores medios anuales entre 910 y 1400 mm. Los meses de mayor evapotranspiración son enero o marzo con valores entre 86 y 125 mm, y el de menor es noviembre con valores entre 72 y 108 mm.

3.3 MARCO GEOLÓGICO GENERAL

La Cuenca del río Tona es una cuenca intermontana localizada entre las cuencas sedimentarias de Maracaibo y del Valle Medio del Magdalena Medio, que tienen como basamento el denominado Macizo de Santander localizado al oriente de la falla de Bucaramanga y al occidente del sistema de fallas de Servita y Chitagá, en la Cordillera Oriental de Colombia.

La Cuenca del río Tona se localiza en la Provincia Fisiográfica Cordillera Oriental y se distribuye en los pisos térmicos extremadamente frío, muy frío, frío y medio. En el área de estudio se encuentran las siguientes Unidades Genéticas de Relieve:

- Relieve Montañoso Glacifluvial
- Relieve Montañoso Fluvioerosional
- Relieve Montañoso Estructural Denudativo
- Piedemonte Coluvial

- Valle aluvial

Procesos de erosión y pérdida del suelo

La erosión acelerada o provocada que se presenta en la Cuenca del Río Tona, corresponde a las áreas que por la intervención humana han sido deterioradas, como los cultivos limpios y la actividad agropecuaria y en menor escala se debe a procesos de erosión natural en zonas aisladas, localizados en áreas con deslizamientos causados por las fuertes pendientes y el tipo de material existente. Estas zonas impiden el crecimiento de la vegetación y aportan cantidades considerables de sedimentos a las quebradas.

3.4 CALIDAD DE AGUAS

En el estudio realizado por Gradex Ingeniería S.A en 2001 y a través de reconocimientos visuales a las fuentes identificaron aguas de muy buena calidad óptica, físico química y biológica durante todo el año, con aumentos leves de turbiedad y sólidos durante los periodos de mayores caudales. De igual manera a continuación, en la Tabla 2.2, se muestran los valores de parámetros de calidad del agua a la altura de la Estación Puente Tona (2319762), para los años 1998 y 1999

Tabla 3.2 Calidad de Agua en el Río Tona, (fuente, Gradex Ingeniería S.A, 2001)

CORRIENTE	RIO TONA										
ESTACIÓN	Puente Tona – Confluencia del Río Tona al Río Surata										
PARÁMETRO	Fechas de Muestreo										
AÑO	1998								1999		
MES	F	M	A	J	J	A	S	N	F	M	A
Oxígeno Disuelto (ppm)	6.4	7.1	7.4	7.8	7.2	7.1	8	7.6	7.9	7.6	7.6
DBO5 (mg/l)	1.2	3.2	1.1	0.4	0.6	7.6	1.4	1.1	0.5	0.4	1
Nitrógeno Total (mg/l)	1.01	0.68	1.04	0.99	1.16	0.45	1	0.77	0.52	0.69	0.87
Fósforo total (mg/l)	0.37	0.13	0.06	0.09	0.007	0.09	0.1	0.04	0.05	0.05	0.05
Sólidos Totales (mg/l)	852	204	192	230	232	210	206	120	180	188	152
Turbiedad (UT)	380	8	13	18	17	12	23	6	18	18	5
Colifecales (NMP/100ml)	2400	430	4600	2400	930	1500	4600	430	930	750	430
pH	8.3	8.1	8	7.8	8.1	8.2	7.5	7.5	8.2	8.2	8.1
Temperatura (°C)	27	27	24	20	24	23	20	22	20	14	20
Caudal (m ³ /s)	0.056	0.092	1.77	1.54	0.209	0.17	1.47	0.80	1.54	3.41	1.56

Los valores muestran que el agua es de excelente calidad. Bajos valores de turbiedad y sólidos, valores de oxígeno disuelto cercanos a la saturación que garantizan el desarrollo de ictiofauna, y valores de nutrientes representativos de aguas sin contaminación de origen orgánico. Por la excelente calidad del agua no se justifica realizar modelación de contaminantes.

3.5 USO DEL SUELO

En la Cuenca del río Tona el uso de suelo predominante es el agropecuario, caracterizado por la presencia de cultivos permanentes de café en la parte baja, cultivos limpios y semilimpios de hortalizas en la parte media y pastos de

explotación lechera en la parte alta, usos que por su naturaleza facilitan los procesos de erosión laminar y erosión en surcos.

Se localizaron áreas con un uso pecuario extensivo que corresponden al 8% del área total de la Cuenca, distribuidos en toda el área y con presencia en algunos sectores de pastos poco densos, especialmente en zonas de laderas de pendientes onduladas a fuerte, favoreciendo los procesos de Terracetas y patas de vaca, apareciendo microdeslizamientos múltiples de tipo laminar.

Igualmente los pastos mejorados presentes en el 8.1% del área total de la Cuenca, estos ofrecen una protección regular al suelo, ya que solo existe un porte muy bajo en el suelo y son propensas a los procesos erosivos anteriormente descritos. En la parte media y baja de la cuenca se encuentran las unidades mixtas como: rastrojos - pastos - cultivos, pastos - rastrojos y pastos – cultivos, donde se presentan en menor escala los procesos de erosión laminar y en pequeños surcos.

De acuerdo con lo expuesto con García en 1996 la cuenca presenta un conflicto de uso del suelo potencial a actual de 27% muy inadecuado, y 42% inadecuado.

3.6 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA.

La Compañía de Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, capta y potabiliza agua de tres fuentes principales, el Río Tona, Río Frío y Río Suratá. De estas fuentes capta en promedio 1300 lps, 700 lps y 86 lps, respectivamente. Siendo la cuenca del Río Tona la de mayor importancia por aportar alrededor del 60% del agua de la ciudad. Un esquema del sistema de distribución y captación se muestra en la figura 3.1. Cuando el caudal del Río Tona disminuye, se suplen las carencias de agua a través de la planta de bombeo Bosconia, que se alimenta de otra fuente. De tal manera que se mantiene una adecuada oferta de agua para la población de Bucaramanga.

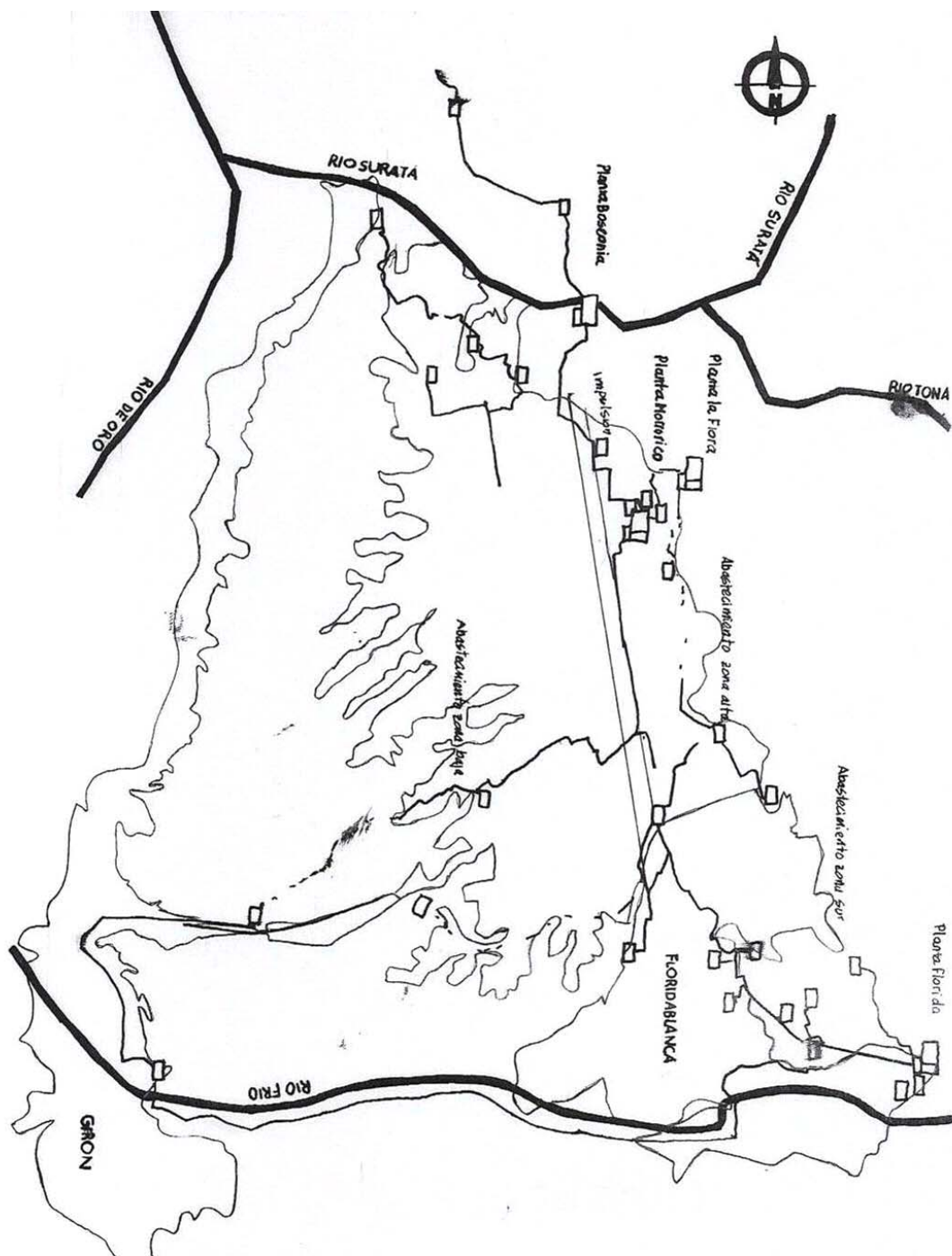


Figura 3.1 Esquema del sistema de captación y distribución del acueducto de Bucaramanga

4. CUANTIFICACIÓN DE IMPACTOS

4.1 RESPUESTA HIDROLÓGICA

La respuesta hidrológica de una cuenca corresponde a los caudales producidos como respuesta a la interacción de los siguientes factores: morfometría, clima, factores asociados al suelo y factores de cobertura vegetal (Deeb en 1992), como se describen a continuación:

Factores morfométricos

Están relacionados con las características físicas de la cuenca. Entre estos se destacan el área, índices que permitan comparar el relieve, tal como el coeficiente orográfico, parámetros de forma, tiempo de concentración y altura media de la cuenca, descritos en el capítulo de características de la cuenca.

Factores climáticos

Los factores climáticos están estrechamente relacionados entre sí y se pueden destacar la precipitación media anual, precipitaciones máximas, periodos de baja precipitación y altura media de la cuenca. Todos estos, también, descritos en el capítulo de características de la cuenca.

Factor suelo

El tipo de suelo determina la conductividad hidráulica que caracteriza la capacidad de infiltración superficial y las propiedades hidráulicas que presente a diferentes profundidades.

Factor vegetación

No resulta fácil de definir la relación de la vegetación con su influencia en la respuesta hidrológica, sin embargo, se sabe que afecta la magnitud de los caudales, razón por la que siempre se tiene en cuenta y que se considera de gran importancia.

Las formulaciones existentes para el cálculo de la esorrentía a partir de información morfométrica, física, meteorológica, climatológica, biótica o forestal (cobertura vegetal), son de tipo paramétrico y de tipo analítico. Igualmente, las formulaciones paramétricas se basan en el establecimiento de relaciones estadísticas entre algunos parámetros de la cuenca o la región y los volúmenes de esorrentía o los caudales de la cuenca, generalmente son definidos para ser aplicados en una determinada región o país. La general simplicidad de estos modelos hace que los resultados tengan más un valor orientativo para períodos de tiempo suficientemente largos, y su uso sea desaconsejable en series meteorológicas cortas; también se acepta que cuantos menos factores o parámetros intervienen en la fórmula, más sencilla resulta de aplicar, pero ofrece menos garantía.

En Colombia, con el auspicio del Banco Mundial, Deeb en 1992 formuló una metodología de tipo paramétrico para estimar caudales de diferentes duraciones en una cuenca (caudal medio y los caudales excedidos el 1, 5, 95 y 99% del tiempo) a partir de datos morfométricos, agroclimáticos y de cobertura vegetal.

El análisis y la modelación hidrológica que se desarrolla tienen por objeto identificar las características de la Cuenca y la variación en la respuesta hidrológica de la misma ante modificaciones en la cobertura vegetal y en prácticas de manejo.

Dentro de las formulaciones de tipo analítico existentes a nivel mundial se destaca la elaborada por el Soil Conservation Service (SCS) de los Estados Unidos, conocida como la metodología del número de curva, cuya facilidad de aplicación y adaptabilidad a diferentes condiciones la han convertido en una herramienta universal de análisis hidrológico. A partir de esta metodología se han venido desarrollando modelos hidrológicos más complejos que integran subrutinas para estimar los diferentes componentes del ciclo, los cuales han permitido modelaciones más acertadas con resultados más aplicables.

Tal es el caso del modelo escogido para el estudio; Soil and Water Assessment Tool (SWAT) desarrollado por Arnold, Williams, Srivasan y King (Texas A&M University). El objetivo del desarrollo del modelo consistió en predecir el impacto

de la agricultura y el uso del agua en cuencas con poca instrumentación. Los resultados acá mostrados se basan en los obtenidos por las corridas realizadas por Gradex Ingeniería S.A en 2001 para la CDMB en su estudio del Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial Microcuenca del Río Tona.

El modelo SWAT presenta las siguientes ventajas (Trujillo 1999):

- Es un modelo físicamente basado
- Utiliza entradas de fácil manejo
- Es computacionalmente eficiente para modelar cuencas de gran tamaño
- Es un modelo continuo, lo cual permite modelar el comportamiento de cuencas durante un largo periodo de tiempo
- Es un modelo de libre distribución, disponible en Internet.

Para representar las diferentes características dentro de la cuenca el modelo permite subdividir la cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Para la caracterización de dichas (URH) se utilizan los componentes de clima e hidrología.

A continuación se realiza una descripción de los componentes utilizados por Gradex Ingeniería S.A para la modelación hidrológica de la Cuenca del Río Tona. Además se hace una breve descripción del funcionamiento del modelo SWAT, sin embargo

para profundizar en el estudio de la teoría se deberá visitar la página en Internet <http://www.brc.tamus.edu/swat>.

Hidrología

La escorrentía superficial se calcula como una fracción del volumen de precipitación, utilizando una modificación de método de los número de curva, el tiempo de concentración se calcula mediante la ecuación de Manning considerando el flujo en los canales y en la superficie del suelo.

La percolación se estima con la técnica de transmisión de agua almacenada a través de las capas de suelo en la zona radicular. La tasa de flujo hacia abajo es dominada por la conductividad hidráulica y la tasa de flujo hacia arriba es regulada por los radios entre el agua en el suelo y la capacidad de campo de las capas subyacentes. Al mismo tiempo que se estima la percolación se estima el flujo lateral, para esto se tiene en cuenta la variación en la conductividad, pendiente y contenido de humedad.

Para simular la contribución de flujo subterráneo a los canales se crea un sistema de almacenamiento de acuífero superficial. El acuífero se recarga desde la zona radicular con la percolación.

Para estimar la evaporación se pueden utilizar los métodos de Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteith, el SWAT, en caso de requerirse, estima datos necesarios de radiación solar, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa a partir de las estadísticas mensuales.

En caso de requerirse se cuenta con un componente de deshielo, que utiliza la tasa de temperatura máxima diaria, la nieve derretida se maneja de la misma manera que la precipitación, pero sin potencial de erosión.

Las pérdidas por transmisión en el lecho se calculan en función del ancho y longitud del canal y del tiempo de duración de flujo.

Clima

Al modelo se deben introducir variables de precipitación y temperatura máxima y mínima a nivel diario, en caso de no contar con esta información a nivel mensual, el modelo simula los datos diarios a partir de estadísticas mensuales y valores de frecuencia. Las variables de radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa son simuladas.

Flujo en canales

El paso del agua por los canales principales es calculado utilizando el método del coeficiente de almacenamiento variable, desarrollado por Williams en 1969. Las variables de entrada incluyen la longitud del canal, pendiente media, ancho promedio aproximado y profundidad del flujo, y el n de Manning. El caudal de flujo y la velocidad media se calculan utilizando la ecuación de Manning. El caudal de salida se determina teniendo en cuenta las pérdidas de fondo y evaporación, entre otros (Gradex Ingeniería S.A, 2001)

Criterios para la Subdivisión del Área Total en Subáreas

La subdivisión de la cuenca en pequeñas áreas permite mejorar las predicciones de la simulación, mediante la agregación de caudales parciales de subáreas. Adicionalmente, la subdivisión adoptada es utilizada en el numeral de pérdidas de suelo como referencia geográfica.

Cada una de las URH se definió por presentar características físicas y climatológicas similares, las cuales influyen en la respuesta hidrológica de la cuenca. El criterio escogido por Gradex Ingeniería S.A fue el de delimitar zonas con un cauce secundario identificable a escala 1:25,000, hacia el cual drena el agua que se precipita dentro del límite de la subárea. A su vez, se buscó delimitar las subáreas de manera que la variación altitudinal fuera baja, con lo cual se

asegura una baja variación de las variables climáticas. Adicionalmente se disminuye la variedad de coberturas y suelos presentes dentro de cada subárea.

Bajo estos criterios se delimitaron dentro de la Cuenca del río Tona subáreas de tamaños inferiores a los 25 Km², con lo cual se garantiza una baja variabilidad en las condiciones climáticas, geológicas, edafológicas y topográficas que determinan la respuesta hidrológica de la cuenca.

4.1.1 Modelación hidrológica

Lo referente a modelación hidrológica corresponde al trabajo realizado por Gradex Ingeniería S.A. para la Corporación de Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) en el estudio del Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial Microcuenca Río Tona.

Con el fin de representar las diferentes condiciones climáticas y las características físicas de la zona, el área de la cuenca del Río Tona fue dividida en 14 subáreas (URH). El área media de dichas unidades es de 13.83 Km², con un área máxima de 21.51 Km² y una mínima de 3.88 Km². En la Figura 3.1 se presenta la subdivisión utilizada. La numeración se realizó en la dirección del flujo de la misma manera que el SWAT realiza el tránsito. El número indica el área de drenaje a la

cual pertenece la unidad. La numeración utilizada para este aparte será la misma que para todo el documento.

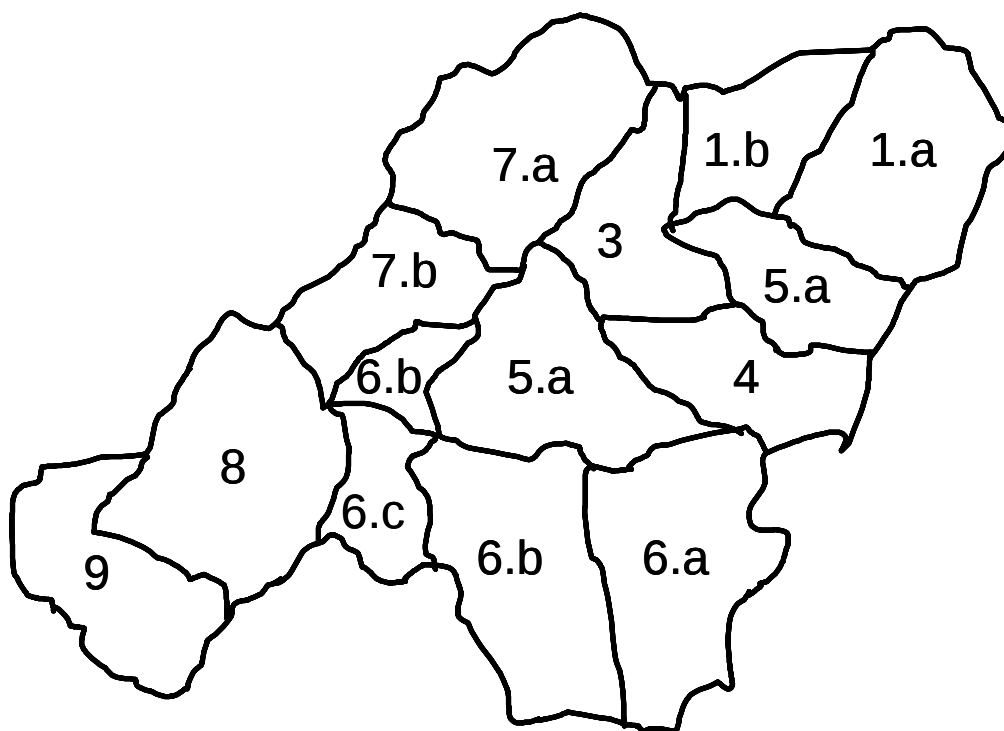


Figura 4.1 Subdivisión adoptada para la Cuenca del río Tona (fuente Gradex Ingeniería S.A, 1999)

A partir de la subdivisión mostrada se realizó la topología del modelo. Para la calibración del modelo se utilizaron los datos de caudales medios diarios de la estación limnimétrica Puente Tona (Cod. 2319762) ubicada a 785 m.s.n.m., en el punto de concentración de la Cuenca a la salida de la subárea 9.

Las estaciones escogidas y su información se presentan en la tabla 3.1 y su ubicación en la figura 3.2

Tabla 4.1 Estaciones utilizadas para la modelación

COD	TE	NOMBRE	SUBCUENCA	DPTO	MPIO	EN	REG	COORDENADAS		ALTITU D Msnm
								ESTE	NORTE	
2319516	CO	EL GRAMAL	TONA	SANT	TONA	35	11	1,125,804	1,289,891	2350
2319013	PM	TONA	TONA	SANT	TONA	1	11	1,122,762	1,288,394	1910
2319040	PM	LA GALVIA	TONA	SANT	F/BLANC A	1	11	1,115,726	1,282,249	1779
2319030	PM	EL PICACHO	TONA	SANT	TONA	1	11	1,123,101	1,278,578	3310
2319074	PM	MARIANA	LEBRIJA	SANT	TONA	35	11	1,119,418	1,278,570	2250
	PM	LA PLAZUELA	TONA	SANT	TONA	10	11	1,120,689	1,282,571	2200
	PM	MARTINGIL	TONA	SANT	TONA	10	11	1,120,797	1,292,692	2110
	PM	SANTA RITA	TONA	SANT	TONA	10	11	1,120,236	1,278,604	2930
	PM	BRASIL	TONA	SANT	TONA	10	11	1,113,129	1,281,586	1660

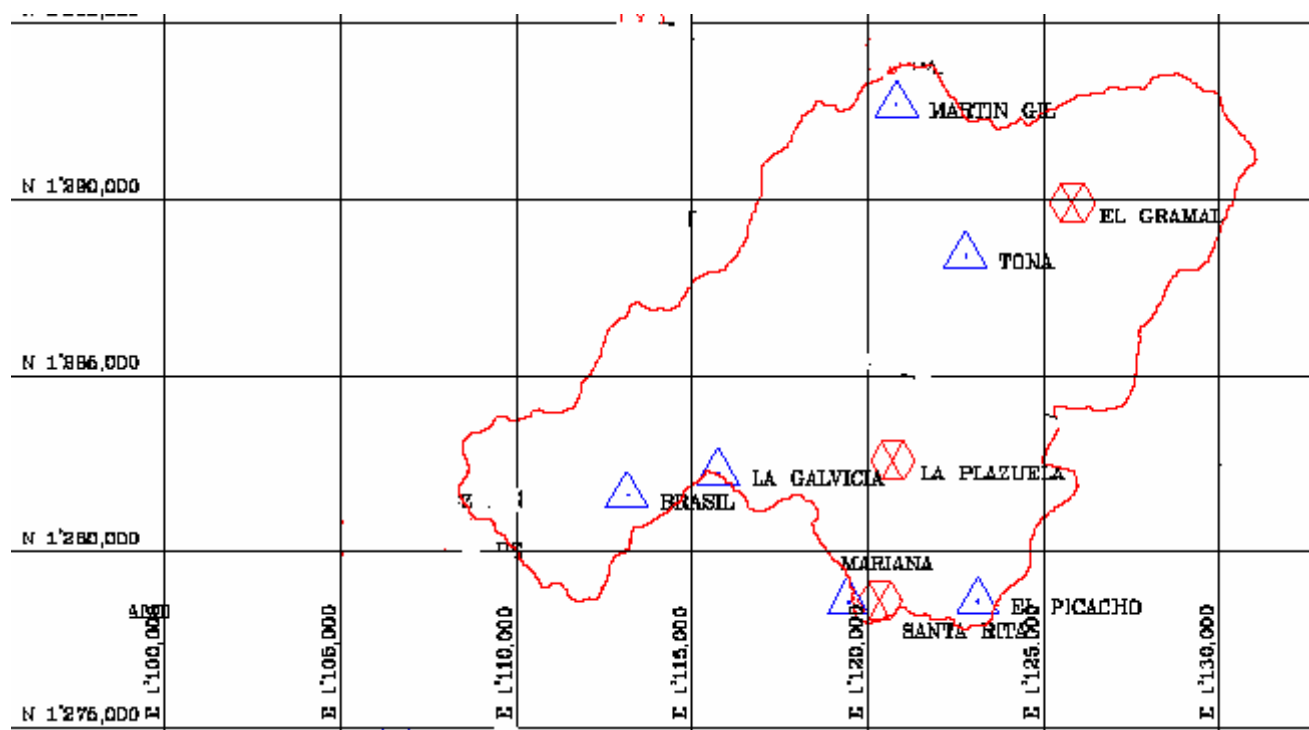


Figura 4.2 Ubicación de las estaciones utilizadas

Para cada URH se determinó la serie diaria de precipitación a partir de los registros de las estaciones más cercanas a la unidad, calculando el promedio ponderado con el área de las estaciones. El área correspondiente a cada estación dentro las URH se determinó trazando polígonos de Thiessen.

Entradas Generales de la Cuenca (*.bsn)

El modelo SWAT requiere una definición de las características generales de la cuenca, introducidas en el archivo de extensión *.bsn. A continuación se presentan los valores de los parámetros utilizados:

Área de la cuenca que se desea modelar: 193.776 Km².

Factor de Flujo Base (BFF): a partir de la Tabla III.4 del manual del SWAT se determinó un valor de 0.75, correspondiente a canales con flujo entre el 55% y 75% del tiempo.

Para cada URH el SWAT recibe una serie de archivos que representan cada una de las características necesarias en la modelación de cada componente. Para la implementación del modelo se generaron las variables de entrada de los siguientes archivos:

*.sub: Contiene las entradas generales de cada URH, tales como el área, el número de curva en la condición de humedad II, pendientes media superficial y del canal principal, entre otras.

*.rte: Contiene la información necesaria para el tránsito del agua a través del canal principal de cada URH. La información corresponde a los valores medios del ancho, longitud, pendiente y profundidad del canal principal, entre otros.

*.sol: Contiene la información de los suelos superficiales de cada subárea. Incluye parámetros como la densidad aparente, la conductividad hidráulica y profundidad efectiva de las diferentes capas de suelo dentro de cada área.

*.wgn: Contiene la información necesaria para la generación de los diferentes parámetros hidrológicos y climáticos de cada subárea a nivel diario. Dentro de los parámetros se encuentran los valores medios de precipitación, desviación estándar y coeficiente de asimetría, entre otros.

Archivos de Entrada Generales de Cada Subárea (*.sub)

Fracción de la cuenca: Es la fracción del total de la cuenca (0-1) que corresponde a cada subárea.

Número de curva para la condición de humedad II (CN II): El número de curva (CN) de una cobertura es función tanto del tipo de cobertura como del suelo sobre el cual se ubica. Dichos valores no deben ser utilizados para otras cuencas, sino

que corresponden a los valores determinados para las condiciones específicas del estudio.

Para calcular el CN II en cada subárea se utilizaron los planos de suelos y uso actual del suelo realizados en el estudio de Ordenamiento Ambiental Territorial de la Microcuenca Tona. A partir de éstos se determinó el área de cada cobertura dentro de las URH.

Características de los canales tributarios de cada subárea y características hidráulicas de la Cobertura Vegetal corresponden a la longitud, pendiente media, ancho promedio, profundidad, conductividad hidráulica del lecho y el n de Manning. La conductividad hidráulica del lecho y el n de Manning fue determinada utilizando las tablas ayuda del SWAT. El n utilizado para los canales es de 0.03, mientras que para las laderas varía entre 0.15 y 0.25.

Pendiente Media Superficial de Cada Subárea: A partir del mapa de pendientes realizado en el estudio de Gradex se determinaron las pendientes medias.

Archivo de Características del Canal Principal de Cada Subárea (*.rte)

En este archivo se incluyen los datos de la red de drenaje principal, necesarios para el tránsito de los caudales en la Cuenca. Estos datos son longitud de cauce, pendiente, conductividad media de aluvión.

Archivo de Suelos de Cada Subárea (*.sol)

La información de suelos utilizada se obtuvo del “Estudio General de Suelos, Para Fines Agrícolas, de los Municipios de Floridablanca, Tona, Matanza, California y Suratá” realizado por Estudios Industriales LTDA para el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) en 1973.

Archivo de Generación Meteorológica de Cada Subárea (*.wgn)

Este archivo incluye las estadísticas de las series de tiempo de los diferentes parámetros necesarios para la modelación meteorológica de cada subárea. Estos son estadísticas de precipitación, estadísticas de temperatura máxima y mínima diaria y radiación solar promedio mensual.

4.1.2 Descripción y Análisis de Resultados de la Modelación

El análisis de los resultados de la modelación se realiza por medio de las curvas de duración de caudales. Si el período de registro es lo suficientemente largo, la curva puede ser considerada una curva de probabilidad y utilizada para estimar el porcentaje de tiempo que un valor específico del caudal será igualado o excedido en el futuro.

Todas las corridas del modelo se realizaron a nivel diario para el periodo comprendido entre los años 1986 y 1994, debido a que en este período se encuentra el registro más completo de todas las estaciones, incluyendo la estación limnimétrica Puente Tona (2319762), utilizada para la calibración.

De correr el modelo, realizando todos los ajustes necesarios se obtuvo la curva de duración de caudales presentada en la Figura 3.3, la cual se ajusta a la curva de duración registrada con una correlación de 0.966.

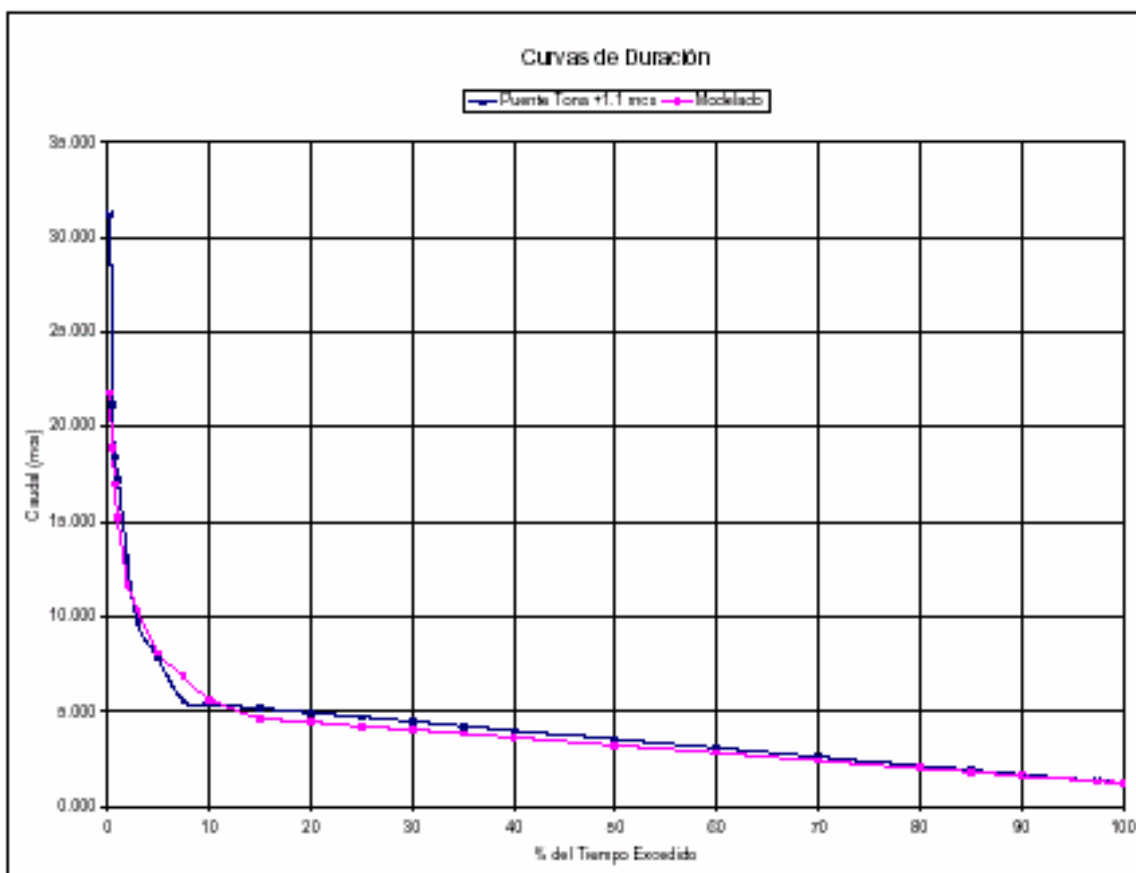


Figura 4.3 Curvas de duración de caudales registrada y modelada, fuente Gradex, 2001

A partir de esta modelación se determinaron los rendimientos hídricos promedio de la cuenca obteniendo un valor de 14.6 lps/Km², clasificado como bajo de acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

Cambios en la Respuesta Hídrica ante modificaciones en la Cobertura Vegetal

Con el fin de incrementar la oferta hídrica en épocas de baja precipitación y mejorar la regulación de los caudales pico, se utilizó el modelo modificando las variables de entrada que representan las características de la cobertura. Dichas variables corresponden al número de curva (CN II) y los parámetros de almacenamiento de agua en el suelo. Para analizar los resultados se utilizó la parte baja de la curva de duración de caudales, ubicada entre el 20% y 100% de tiempo en que el caudal es igualado o excedido.

Con el fin de verificar el cambio en la respuesta hidrológica se variaron las siguientes condiciones: reemplazo de todas las coberturas no naturales de la

Cuenca con bosque plantado y reemplazo de las coberturas no naturales de las subáreas 6.a, 6.b, 6.c y 7.a con bosque plantado.

Teniendo en cuenta estas condiciones se modelaron las nuevas curvas de duración, las que se presentan en la Figura 2.4, que representan la parte baja de la curva y se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla.

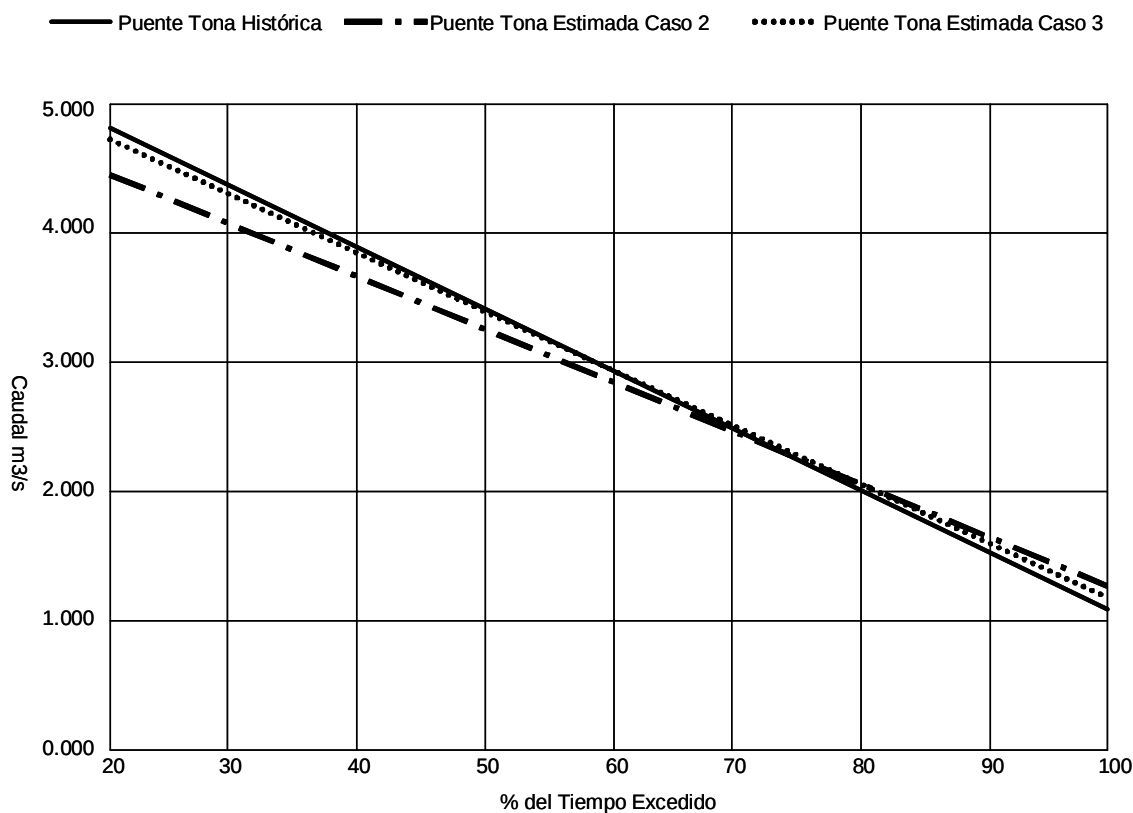


Figura 4.4 Curvas de duración estimadas para la estación Puente Tona, fuente Gradex, 2001

Tabla 4.2 Curvas de duración de caudales estimadas para la estación Puente Tona, fuente Gradex, 2001

% Tiempo	Puente Tona Histórica Caudal (m ³ s) Caso 1	Puente Tona Estimada Todo Bosques Caso 2		Puente Tona Estimada Bosques 6 a 7 a Caso 3	
		Caudal (m ³ s)	Diferencia (m ³ s)	Caudal	Diferencia (m ³ s)
20	4.833	4.478	-0.355	4.677	-0.156
25	4.600	4.276	-0.325	4.459	-0.141
30	4.368	4.074	-0.294	4.241	-0.127
35	4.135	3.872	-0.263	4.023	-0.112
40	3.903	3.671	-0.233	3.805	-0.098
50	3.438	3.267	-0.171	3.369	-0.069
60	2.973	2.864	-0.110	2.933	-0.041
70	2.509	2.460	-0.048	2.497	-0.012
80	2.044	2.057	0.013	2.061	0.017
85	1.811	1.855	0.044	1.842	0.031
90	1.579	1.653	0.074	1.624	0.045
95	1.347	1.452	0.105	1.406	0.059
97.5	1.230	1.351	0.120	1.297	0.067
99	1.161	1.290	0.129	1.232	0.071
100	1.114	1.250	0.136	1.188	0.074

El caudal del 95 % en el primer caso aumenta en un 7.8% (105 lps), mientras que para el segundo caso aumenta en 4.4% (59 lps), lo cual representa un aumento en el caudal excedido el 95% del tiempo de 3.3 y de 1.9 millones de metros cúbicos al año para el primer y segundo caso, respectivamente.

Se hace énfasis en el caudal del 95% debido a que es el caudal que sirve de referencia para el diseño de las obras de captación según el Reglamento del Sector

de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS-98) y es por la misma razón que con este valor se harán todos los cálculos y comparaciones económicas.

4.2 VOLUMENES DE SEDIMENTOS

Para las condiciones de la zona el principal agente de pérdida de suelo es el agua, erosión hídrica, que se define como la separación en partículas de la masa de suelo para ser transportadas a lo largo de una cuenca, esta se presenta cuando el agua no infiltrada en el suelo arrastra materiales de la superficie del suelo.

La erosión hídrica puede dividirse en dos tipos generales: erosión laminar, definida como la remoción del suelo de formas mas o menos uniforme sobre la superficie y erosión en canales que incluye erosión de riachuelos, cárcavas y en corriente.

La erosión causada por la lluvia es el resultado de la relación lluvia-características físicas de la zona, por lo tanto su magnitud depende de las características de ambos. Para esto se combinan dos aspectos, la erosividad y la erodabilidad, la primera consiste en la capacidad de la lluvia de producir erosión, mientras que la segunda es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado.

Uno de los métodos más utilizados a nivel mundial para calcular las perdidas de suelo por la lluvia es el conocido como USLE y es el que se va a utilizar en este trabajo.

La ecuación universal de pérdidas de suelo, USLE, por sus iniciales en inglés es un modelo diseñado para calcular las pérdidas de suelo bajo condiciones específicas, sin embargo no predice depositación ni toma en cuenta los sedimentos producidos por los canales.

En 1940 se empezó a hacer estudios para calcular las pérdidas de suelos en el "cinturón maicero" en los Estados Unidos y se llegó a un método que relacionaba la pendiente y su longitud con las prácticas agrícolas. Al año siguiente se añadieron factores de tipo de cultivo y de práctica de conservación unidos a un concepto de límite de pérdida de suelo, en 1946 se reunió un comité nacional en Ohio con el propósito de adoptar esta ecuación para otras tierras de cultivo, se evaluaron los componentes de la ecuación y se añadió un factor relacionado con la lluvia, esta ecuación se conoció como la ecuación Musgrave.

La USLE se desarrolló en una oficina estatal para estudiar las pérdidas de suelo en cooperación con la Universidad de Purdue; se trabajó en 49 localidades con lo que se aportaron 10000 datos de lluvias y pérdidas de suelo, con estos estudios se creó la que hoy conocemos como la USLE, un modelo que permite predecir con gran exactitud la erosión que se producirá en un terreno bajo unas condiciones específicas. Sin embargo las investigaciones continúan con el propósito de entender mejor los principios básicos y procesos que ocasionan la erosión hídrica.

Esta ecuación se realizó para terrenos con ciertas características en los Estados Unidos, para estos la ecuación genera muy buenos resultados, pero para otros lugares los resultados serán menos exactos, sin embargo proveerá una guía con lo cual se puede aplicar prácticas de manejo.

En este documento se calcularon todas las variables para cada URH, la sumatoria de pérdidas de suelo en cada una de estas unidades se tomó como el valor de suelo perdido en la totalidad de la cuenca. Aplicando la metodología propuesta por Deeb, que consiste en asumir la producción de sedimentos de una cuenca extensa como la sumatoria de la producción de varias microcuencas. Con el propósito de ejemplificar el procedimiento, junto con la explicación de cada variable se realizará el cálculo correspondiente para la URH 6. c.

El modelo predictivo de la pérdida de suelo por erosión laminar de la USLE tiene por forma general:

$$A = RKLSCP \quad \text{Ec 4.1}$$

Donde:

A: es la unidad calculada de pérdida de suelo por área de terreno y por año

R: Factor de potencial erosivo de la lluvia medido para los eventos significativos; los estudios demuestran que la erosión causada por la lluvia no está asociada solamente con eventos significativos o de picos de intensidad, pues todas las lluvias generan erosión de acuerdo a su intensidad, el factor R cuantifica el impacto de la gota de agua y depende de la energía cinética de las gotas. El factor EI es el producto de la energía cinética de la tormenta en pies-tonelada*acre-pulgada por la máxima intensidad en 30 minutos dada en pulgadas*hora, en la práctica indica como la separación de las partículas esta relacionada con la capacidad de transporte. En caso en que el estudio se desarrolle en una cuenca previamente estudiada, se pueden interpolar los valores recopilados de estudios regionales.

De acuerdo con Deeb, 1992, en caso de no contar con trabajos previos, se recomienda la aplicación del procedimiento simplificado de cálculo de agresividad de la lluvia, donde R se puede estimar como el producto del valor promedio de EI para una tormenta por el número promedio de tormentas en un año. Para este caso EI se estima como:

$$EI_{30} = 1.876 P_t^{0.9109} P_{30}^{1.2427} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Donde:

Pt: precipitación total de la tormenta

P30: precipitación en los 30 minutos más intensos

Para los casos en que no se cuente con información de los parámetros anteriores el factor R. se puede estimar, con pérdida de precisión, como:

$$R = 3.49N - 0.1375Hm + 0.1631Pma - 140 \quad \text{Ec. 4.3}$$

Donde:

N: número de días con lluvia, promedio anual

Hm: altura media de la cuenca en msnm

Pma: precipitación media anual en mm

Para el caso de la URH 6.c se utilizó este procedimiento donde $N=161.6$; $Hm=1775$; $Pma=1864.2$; estos valores reemplazados en la fórmula dan un valor de $R= 483.97$.

K: Es el factor de erodabilidad del suelo, hace relación solamente a las características propias del suelo y debe ser evaluado independientemente de los otros factores, se determina experimentalmente dependiendo de sus características físicas, químicas y de su textura, este se puede hallar en un nomograma. En el que se requiere la descripción granulométrica de los suelos y el contenido de materia orgánica. Está relacionado mediante la siguiente ecuación:

$$100k = 0.00021M^{1.14}(12 - a) + 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Donde:

M: Porcentaje de partículas entre 0.002 y 0.1 mm*(100-porcentaje de arcillas)

b: índice de estructura

c: índice de permeabilidad

a: contenido de materia orgánica

Para el caso de estudio la información relacionada a características de suelos se obtuvo de la información consignada en el estudio realizado por Gradex en 1999 para la CDMB, en la que se presenta información textural, contenido de materia orgánica y descripciones de drenaje. El valor estimado para cada URH es el correspondiente al promedio ponderado de los diferentes K presentes en cada subárea.

Para la URH 6.c el porcentaje de arena es de 42%, el de arcilla de 38% y el de limo de 20% y el de materia orgánica del 2%, el índice de estructura es de 1.50 y su permeabilidad de 2.50, de tal forma que M asume el valor de 2542.00 y el factor de erodabilidad k obtenido es de 0.131.

LS: conocido como factor topográfico. Es la relación entre L, que es la relación de pérdida de suelo entre el gradiente de pendiente del terreno comparado con una

parcela de idénticas condiciones pero de 12.6 pies de longitud y de S que es el factor de pendiente; a pesar de que en la ecuación estos dos factores se consideran de forma separada es conveniente considerarlos como un único factor y es la rata de pérdida de suelo esperada por unidad de área en la parcela estándar.

L se mide desde el punto en que la gota de agua empieza a caer, hasta el punto en que comienza la depositación, la influencia de la pendiente es menor en suelos secos que en los húmedos, además debe tenerse en cuenta la forma de las pendientes y las variaciones de la vegetación, en pendientes irregulares, esta se divide en diferentes segmentos de igual longitud y se suman los valores obtenidos del producto de los factores de cada segmento.

Para analizar el factor de longitud y pendiente se trazaron varias líneas en el área de estudio, tratando de abarcar las zonas en las que fue subdividida la región. Se seleccionaron estas líneas de tal modo que partieran de un punto donde se podía iniciar la concentración de la escorrentía hasta una zona plana topográficamente donde la partícula de suelo pudiese ser depositada.

De acuerdo a la magnitud de la pendiente este parámetro se calcula de la siguiente manera:

Para pendientes menores a 20%:

$$LS = \left(\frac{L}{72.6} \right)^{0.5} (65.41 \sin^2 \phi + 4.56 \sin \phi + 0.065) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Para pendientes mayores a 20% de acuerdo a Deeb y Ordoñez, 1981):

$$LS = L^{0.5} (0.02202S - 0.0684) \quad \text{Ec. 4.5}$$

Donde:

ϕ : ángulo de la pendiente

S: tangente de ϕ

Como la URH 6.c es de pendiente mayor al 20% se utiliza la ecuación 4.5 con valor de pendiente, $\phi = 19.56$, es decir $S = 35.5\%$ y longitud de pendiente 6726 pies, haciendo los reemplazos debidos, se obtiene que para la URH 6.c, LS asume el valor de 58.56.

C: Factor de manejo y cobertura, compara las pérdidas del terreno estudiado con uno de idéntica área pero arado en la dirección de la pendiente, pues las pérdidas

de suelo se ven influenciadas por los cultivos presentes, su estado y el manejo que se les dé. Por las mismas condiciones que lo afectan este factor varia todo el año según el estado del cultivo, de la altura de la protección vegetal, pues la energía cinética de las gotas de agua depende de la altura con que estas caigan, depende además del tipo de labranza, de los residuos incorporados al suelo. Todas estas variables afectan la porosidad, rugosidad y compactación del suelo entre otras. Además C varía según el tipo de clima. Estos valores se pueden obtener de tablas, como fue el caso de este trabajo, en el que se adoptó utilizar coeficientes promedios encontrados en diferentes estudios y condensados en Deeb 1992. El valor de C se ponderó para cada URH, teniendo en cuenta los diferentes usos del suelo.

La URH 6.c tiene diferentes usos del suelo. Su cobertura esta compuesta en el 50% de su superficie de vegetación mixta de clima medio ($C=0.064$), en el 25% por pastos (0.018) y en el restante 25% por bosques secundarios ($C=0.057$). Ponderando los valores de cobertura mencionados se tiene que el C ponderado de la URH es de 0.051.

P es el factor de prácticas de manejo. Mide el efecto de diferentes prácticas en el manejo agrícola sobre el control de la erosión, relaciona las pérdidas de suelo en las condiciones dadas con las de la parcela estándar. Su valor varía entre 0 y 1,

este último valor indica ausencia de prácticas conservacionistas, que es el caso de todas las URH de la cuenca de estudio.

Producción de sedimentos

La tasa de erosión mide el movimiento del suelo a nivel de una ladera, los sedimentos son aquella parte de la erosión que es transportada por la corriente de agua fuera de la Cuenca (Deeb, 1992). La relación entre la erosión y la producción de sedimentos se denomina coeficiente de producción, se estima a partir de un gráfico que relaciona área de la cuenca con este factor. Para el caso de estudio, la Cuenca del Río Tona que tiene un área de 193.77 km² la relación de producción es de 0.10, es decir que solamente el 10% de suelo perdido en la cuenca sale de esta por la corriente principal.

Con el fin de verificar el cambio en la producción de sedimentos ante modificaciones en las características de la cuenca se variaron las condiciones enumeradas en el aparte de respuesta hídrica que son las siguientes: reemplazo de todas las coberturas no naturales de la Cuenca con bosque plantado y reemplazo de las coberturas no naturales de las subáreas 6.a, 6.b, 6.c y 7.a con bosque plantado. Los cálculos y factores utilizados se presentan en el anexo.

A continuación en la Tabla 3.3 se presenta la producción de sedimentos para las tres condiciones analizadas. Procedimiento de cuantificación que se describió anteriormente.

Tabla 4.3. Pérdidas de suelo expresadas en Ton/año

URH	LINEA BASE Caso 1	TODO BOSQUE Caso 2	BOSQUE 6-7a Caso 3
1A	219792	134358	219792
1B	1178150	931718	1178150
2	1128485	1116351	1128485
3	8094138	6037789	8094138
4	8799965	5782834	8799965
5A	5130543	5048234	5130543
5B	4136234	2972918	4136234
6A	10347571	9255328	9255328
6B	15351413	11730316	11730316
6C	3073376	2785720	2785720
7A	11023389	12189324	12189324
7B	10483227	9502038	10483227
8	17304541	14740905	17304541
9	20907971	12205161	20907971
PÉRDIDA DE SUELO TOTAL (Ton/año)	117.178.795	94.432.995	113.343.733
SEDIMENTOS TRANSPORTADOS A LA SALIDA DE LA CUENCA (Ton/año)	1.171.788	944.330	1.133.437

De acuerdo con el procedimiento adoptado, el volumen anual de erosión producido en la cuenca asciende a 117.178.795 Ton/año, el que se reduciría a 113.343.733 en caso de reforestar las URH 6 a 7; incluso podría disminuirse a 94.432.995 en caso de reforestar la totalidad de la cuenca. Adicionalmente, la cantidad de

sedimentos transportados por el Río disminuiría en 3.3% y en 19.41%, para los casos 2 y 3, respectivamente.

Los programas de control de erosión tienen efectos cuantificables en la reducción esperada del empleo de floculantes para el tratamiento de aguas para el consumo doméstico. Lo anterior permite esperar que una reducción en la producción de sedimentos se convierta en una reducción de la turbiedad y consecuentemente produzca una disminución en los costos de tratamiento de las aguas domésticas (Deeb, 1992). Este tema se tratará en el siguiente capítulo.

5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE EXTERNALIDADES Y VALORACIÓN DE IMPACTOS

Las externalidades son aquellos efectos generados como consecuencia de acciones producto de la puesta en marcha de un proyecto sobre determinados sectores de la economía. Para el caso de estudio se esperan externalidades relacionadas directamente con la protección de cuencas, como la disminución en los volúmenes de sedimentos y regulación de caudales; esto es, disminución de caudales máximos, aumento de caudales mínimos y aumento de caudales medios (Jiménez, 1992).

Teniendo en cuenta las acciones propuestas para la cuenca, los beneficios de los proyectos de reforestación recaen sobre las obras afectadas por el agua y sobre los usuarios de los servicios generados por dichas obras. Para este análisis se tendrá en cuenta la afectación de externalidades al sector de los servicios públicos, particularmente el de abastecimiento de agua potable, que obtendrá ahorros en su operación y mantenimiento (Jiménez, 1992).

Los beneficios para los sistemas de agua potable se relacionan con diferentes factores:

- Disminución de costos de mantenimiento por reducción de volúmenes de sedimentos y de disminución de caudales máximos.
- Disminución de racionamientos de agua en épocas de sequía.
- Disminución en utilización de químicos utilizados para purificación de agua.
- Disminución de costos de bombeo.
- Aumento de vida útil de instalaciones.

De lo anterior se puede deducir que el cambio de cobertura en la cuenca beneficia, tanto a productores como a consumidores. Los productores se benefician por disminución de la pérdida de sus activos y por el aumento de la productividad. Los consumidores se benefician por aumentos en las cantidades demandadas de bienes y servicios o por la reducción de precios en los bienes finales.

Las situaciones de posibles beneficiarios externos de los programas de reforestación y manejo pueden analizarse por medio de los gráficos 5.1 a 5.2. En estos se presenta el análisis macroeconómico y se calculan los beneficios sociales esperados. El gráfico 5.1 esta relacionado con los beneficios para un productor individual localizado en la cuenca. El gráficos 5.2 presenta la medición de los beneficios para un usuario de los servicios de un sistema de agua potable.

Para el gráfico 5.1 se hace la suposición de que el mercado es absolutamente competitivo, o que el productor no tiene la capacidad de modificar el precio. La curva de demanda es horizontal. La curva de oferta del productor sin proyecto es O_1 y por sus características el excedente económico es $P a_1 b_1$ donde P es el precio de equilibrio.

La productividad aumenta debido a las externalidades derivadas del proyecto, generando un desplazamiento de la curva de oferta de O_1 a O_2 . esta curva le genera al productor un excedente de $P a_2 b_2$ La diferencia de beneficios entre la situación sin y con proyecto es de $a_1 b_1 a_2 b_2$, mostrada en el gráfico 5.1.

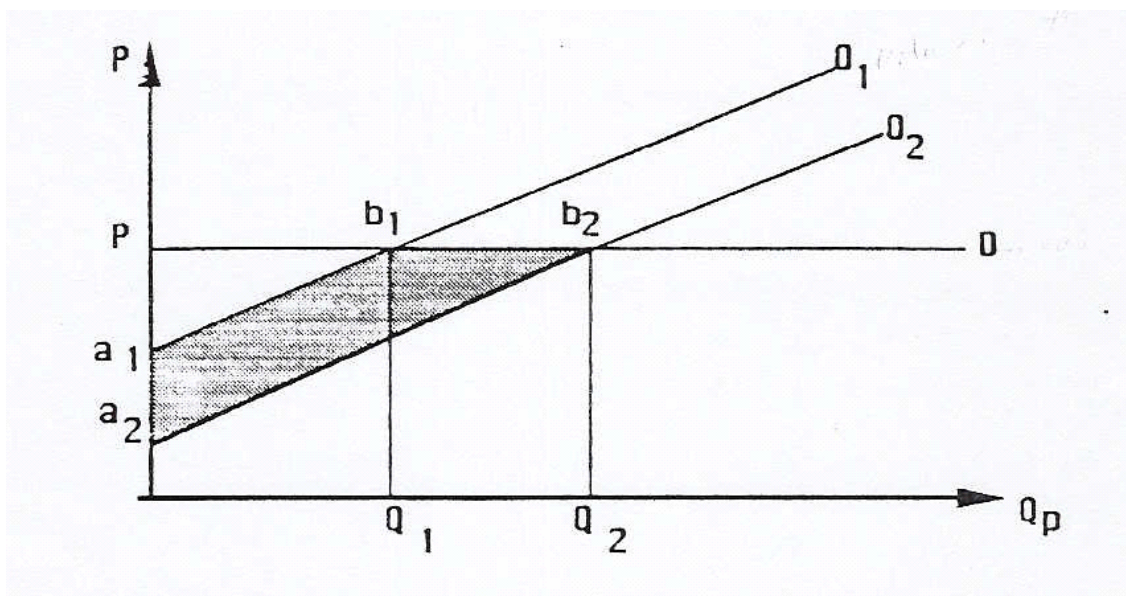


Figura 5.1 Situación para un productor individual en la cuenca (Jiménez 1992).

En la figura 5.2 se muestra como un usuario se afecta con un incremento en la disponibilidad de agua durante periodos de escasez. La curva de demanda de agua es D . para la situación sin proyecto la curva de oferta de agua O_1 es inelástica. El precio de equilibrio es P_1 y la cantidad de agua demandada en equilibrio es Q_1 .

El excedente en la situación sin proyecto es P_1b_1M . Con la implantación del proyecto la curva de oferta de agua se desplaza a O_2 y el excedente para el consumidor se aumenta a MP_2b_2 . La diferencia de beneficios o de excedentes debidas a externalidades derivadas del proyecto es $P_1P_2b_1b_2$.

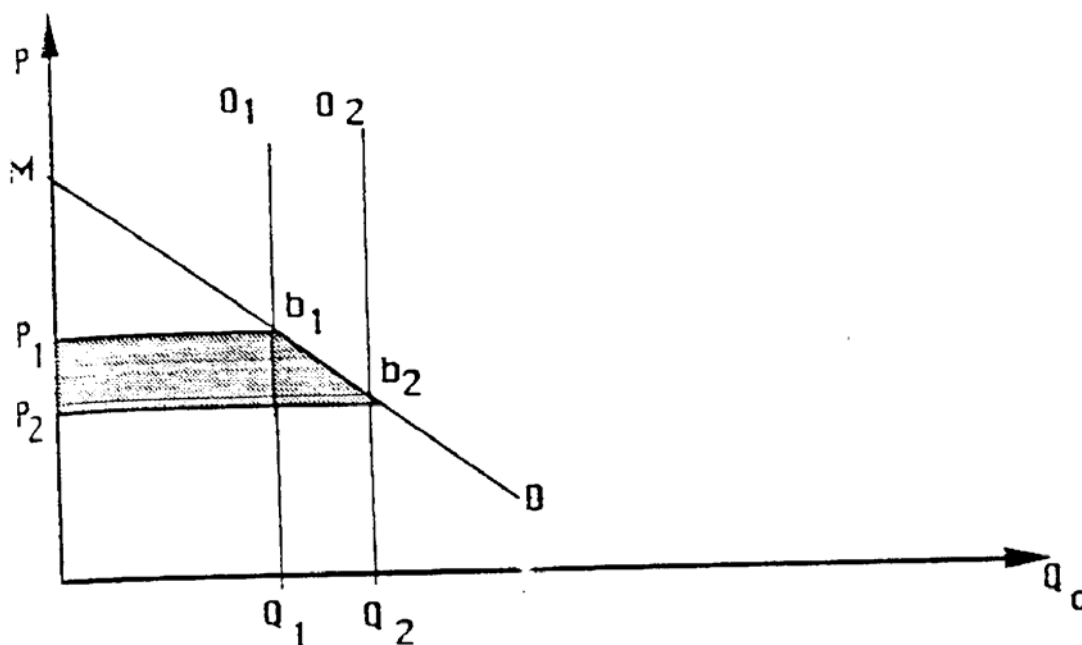


Figura 5.2 Situación para un consumidor de un bien (agua) en la cuenca (Jiménez 1992).

De lo anterior se desprende que el excedente de los consumidores de agua incremental producto de la intervención, depende en forma inversa de la elasticidad de la demanda y en forma indirecta del aumento en la cantidad consumida. Por lo tanto entre mayor sea la inelasticidad de la demanda, mayor es el excedente.

Para los consumidores de agua el excedente es alto, dada la inelasticidad de la curva de demanda.

Bajo estas condiciones y de acuerdo con Jiménez, 1992, teniendo en cuenta el "Enfoque de Beneficio" para la asignación de recursos fiscales, las externalidades deben ser pagadas por:

Productores individuales que no afectan el precio (por ejemplo usuarios de distritos de riego) o consumidores urbanos de los bienes producidos en la cuenca.

Los Valores de las variables que se estudian a continuación se obtuvieron de los trabajos realizados por García en 1996 que hace análisis en pesos de 1995 y por Jiménez en 1992 que realiza los análisis en pesos de ese mismo año, razón por la que debieron actualizarse a precios de 2003, utilizando las variaciones de precios

al consumidor que se muestran en la tabla 4.1. Los cálculos se muestran en el anexo.

Tabla 5.1. Variaciones porcentuales del índice de precios al consumidor

AÑO	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
IPC(%)	25.13	22.60	22.59	19.46	21.63	17.68	16.70	9.23	8.75	7.65	6.99

5.1 Reducción de Sedimentos

Las descargas de sedimentos hacen que las empresas de acueducto incurran en gastos relacionados con contratación de personal para limpieza de filtros y tanques sedimentadores y con la aplicación de insumos necesarios para la floculación.

Contratación de personal

Para estimar la variación de costos de personal para limpieza de sedimentadores, se debe estimar la diferencia de volumen de sedimentos con y sin proyecto. De acuerdo con Jiménez, 1992 se deben tener en cuenta las siguientes variables:

v1 (v2): Volumen de producción anual de sedimentos, sin y con proyecto respectivamente.

Z1 (Z2): Volumen anual de agua en la cuenca, sin y con proyecto respectivamente.

W1 (W2): volumen de producción anual de agua en el acueducto, sin y con proyecto respectivamente.

w1 (w2): volumen de sedimentación del acueducto, sin y con proyecto respectivamente. $= k \cdot v_1 \cdot W_1$ ($k \cdot v_2 \cdot W_2$), donde k es la eficiencia de los sedimentadores.

s/h: salario integral por horas del operario del acueducto, se asume como un salario mínimo multiplicado por un factor prestacional de 1.8.

m³/h: rendimientos de limpieza en m³ por hora.

C1 (C2): costo de mantenimiento del acueducto, sin y con proyecto respectivamente, donde $C_2 = C_1 \cdot w_2 / w_1$.

$C_3 = C_1 - C_2$: disminución de costos de limpieza

$C_1 = 1.940$ millones de pesos

De acuerdo a lo calculado en capítulo anterior el volumen de sedimentos en el acueducto actualmente es de 862641 Ton/año(w1), de implementarse la escenario 2 sería de 695192 Ton año (w2) y de implementarse el escenario 3 sería de 834408 Tona/año (w2), representado un ahorro anual de 377 y 63.5 millones de pesos para cada uno de estos casos. Los cálculos detallados se muestran en el anexo

Aplicación de químicos

Para estimar la reducción en los gastos necesarios para la compra de químicos utilizados en los procesos de floculación, se tomó la información suministrada por la Compañía de Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para García 1996, relacionada con gastos en sulfato de aluminio y cal. El rublo correspondiente a gastos en químicos se multiplicó por la relación entre los volúmenes de sedimentos con y sin proyecto.

De acuerdo con Jiménez, 1992 se deben tener en cuenta las siguientes variables:

Q1 (Q2): valor de químicos para floculación, sin y con proyecto respectivamente, valor proporcional al volumen de sedimentos captados por el acueducto, donde $Q2=Q1*w2/w1$.

$Q3 = Q1 - Q2$: disminución en costos de químicos.

De acuerdo con la información suministrada por el Acueducto de Bucaramanga el gasto anual en los químicos mencionados es de 577 millones de pesos, para el escenario 2 el ahorro se calcula haciendo $Q2 = 577 \text{ millones} * (695792/862641)$, es decir $Q2$ para este caso es de 465 millones de pesos, de igual manera se hace el calculo para el escenario 3.

De acuerdo con el procedimiento anterior las disminuciones de sedimentos para los casos 2 y 3 producirían un ahorro anual de 112 y de 19 millones de pesos, respectivamente.

5.2 Variación de caudales

Los escenarios planteados aumentan los caudales mínimos durante todas las épocas, teniendo el agua de consumo humano un valor económico superior en épocas de sequía. El costo del agua se estima de acuerdo con lo que el consumidor está dispuesto a pagar para obtener el nivel requerido.

Este tema se abordará de acuerdo con la metodología desarrollada por el Banco de Proyectos del DNP en 1992, referida por Jiménez en 1992.

El proceso se desarrolla utilizando dos conceptos básicos; la elasticidad precio de la demanda de agua y la disposición a pagar que tiene los usuarios de los sistemas de acueducto por unidad adicional de agua.

Se simulan los beneficios de las mejoras en los sistemas mediante una ecuación en la cual el valor presente de los beneficios depende de la dotación de agua sin proyecto y de la cantidad adicional de oferta de agua:

$$UPBENE = 23.23 - 0.0779DOTACION + 0.1031\sqrt{M3AD} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Donde:

UPBENE: Valor presente neto de los beneficios, expresado en millones de pesos.

DOTACION= dotación por conexión sin proyecto en l/h/d. Para este trabajo se toma como 150 l/hab-día. De acuerdo con el modelo diseñado por el Banco de Proyectos, referido por Jiménez en 1992, obtenido con experiencia de acueducto en Cundinamarca y Valle del Cauca

M3AD: m³ adicionales que ofrecerá el proyecto expresado en m³/año.

El método seguido en este trabajo, es el mismo utilizado por Jiménez en 1992, para efectuar los cálculos de la variación de caudales y es el siguiente:

Se estima el incremento porcentual del volumen de agua con proyecto.

Se toma la producción anual del acueducto en la situación sin proyecto y se estima la producción anual en la situación con proyecto (con base en los incrementos del Q_{95}).

Se estiman los m^3 adicionales de producción del acueducto.

“Como la experiencia indica que de lo captado por los sistemas de acueducto solo se utiliza un porcentaje, el resultado obtenido en el numeral anterior se ajusta para obtener los m^3 adicionales aprovechables” Jiménez, 1992.

A partir de los resultados de los numerales 2 y 4 se obtiene DOTACION Y M3AD.

Se estima que los efectos de la reforestación sobre los caudales son apreciables a partir del octavo año, por lo tanto, el Valor Presente Neto se ajusta dividiendo por 2.2107. Jiménez, 1992.

A continuación se explica el procedimiento de cálculo hecho para obtener UPBENE en el escenario 2. La producción del acueducto actualmente es de 42.478.992 m^3 /año, con una dotación estimada de 150 l/h/día, producción que de implementarse el proyecto llegaría a ser de 45.790.272 m^3 /año, es decir se producirían 3.311.280 m^3 adicionales al año, reemplazando en la ecuación 5.1 se obtiene que para pesos del año 1999 el valor presente neto de los beneficios es de 199 millones, que para ajustarlo a pesos de 2003 debe multiplicarse por 5.13, de esta forma se obtiene un valor de 1022 millones de pesos, que debe ser corregido por el factor $1/2.2107$, tal como se explicó anteriormente, de tal forma se obtiene

un Valor Presente Neto ajustado de los beneficios de 462 millones de pesos del año 2003.

Para el segundo y tercer caso, respectivamente, UPBENE toma el valor de 462 Y 353 millones de pesos.

Variación de costos de Bombeo

El sistema de acueducto de Bucaramanga suple las carencias de agua del sistema Tona, a través de la planta de bombeo Bosconia, que se alimenta de otra fuente. De tal manera que se aumenta la cantidad bombeada ante un déficit en la cantidad de agua producida en el Sistema Tona. Un déficit de agua producida en el Sistema Tona se refleja en la cantidad de agua bombeada desde Bosconia, de acuerdo a la ecuación desarrollada por García en 1996.

$$\ln \text{Bombeada} = -55.20 - 2.21 \ln \text{aguaTona} + 4.46 \ln \text{demandatotal} \quad \text{Ec. 5.2}$$

El coeficiente -2.21 es la elasticidad del bombeo al caudal del Río Tona, y significa que por un aumento del 1% en el caudal promedio mensual se bombea 2.21% menos agua del otro sistema.

De acuerdo con García, 1996 en promedio se bombean en Bosconia $12.825.732 \text{ m}^3$ con un costo de 4990 millones de pesos. El efecto de implementar los escenarios 2 y 3 reduce el caudal bombeado en 17.24% y 9.73%, es decir se dejarían de bombear, anualmente, $2.211.156 \text{ m}^3$ y $1.247.944 \text{ m}^3$. que representa un ahorro de 860 y 485 millones de pesos para los escenarios 2 y 3 respectivamente.

Del análisis anterior se observa que de implementarse la alternativa 2 se lograría un ahorro anual de 1349 millones de pesos, comparado con un ahorro de 567.5 millones para la alternativa 3. Para ambos casos el mayor impacto en el ahorro lo genera la disminución de costos de bombeo, seguido por disminución en costos de mano de obra. Por último el menor ahorro es el generado por gasto en químicos, 112 y 19 millones de pesos para los escenarios 2 y 3, respectivamente, aunque la diferencia entre ambos escenarios es considerable, difícilmente podrá minimizarse aún más, debido a que el procesos de floculación, siempre va a requerir de químicos, aún cuando el agua sea de excelente calidad.

CONCLUSIONES

La respuesta hidrológica de la cuenca se definió con base en la curva de duración de caudales, basando el análisis en el Q_{95} , por ser el caudal clave de acuerdo al RAS, este caudal representa el caudal que es igualado o excedido el 95% del tiempo.

El análisis hecho podría complementarse valorando el suelo que se pierde, a través de los procesos de erosión, para esto se puede utilizar el trabajo realizado por Sung-Hoon Kin y John A. Dixon, quienes utilizan el enfoque dual o de costos evitados para evaluar dos métodos alternativos del manejo del suelo en proyectos de agricultura en tierras altas de Corea, tomando los costos de reponer físicamente, por medio de camiones y fertilizantes, el suelo perdido y sus nutrientes como una medida de los beneficios mínimos de prevenir la erosión y pérdida de nutrientes con nuevas técnicas de manejo de suelos.

El bosque ofrece importantes servicios ambientales, como se demostró, entre ellos se destacan la regulación del ciclo hídrico, la disminución de procesos denudativos, adicionalmente otro tipo de externalidades no estudiadas en este trabajo son las relacionadas con el cambio en la calidad del aire, efectos sobre la biodiversidad, el

turismo y el almacenamiento de carbono. Sin embargo el análisis de estas últimas externalidades deberá ser evaluado en futuros trabajos. Para su valoración debe tenerse en cuenta que estos beneficios son prestados a todo el planeta, no solamente a los habitantes aledaños.

Se debe tener en cuenta que el factor de cobertura C , de la ecuación 4.1, depende además del tipo de especie sembrada, de las condiciones propias de la zona, razón por la que este solamente puede ser estimado con exactitud, cuando un ecosistema se encuentre establecido, de otra forma ofrecerá solamente una aproximación a las condiciones esperadas, que es el caso del presente trabajo.

La cuenca del Río Tona por su relieve muy accidentado corresponde a una cuenca de alta pendiente donde se generan altas velocidades del agua y una alta capacidad de erosión de la misma. Además de la alta erodabilidad del suelo hacen que la variación de la cobertura tenga un efecto menor al esperado en producción de sedimentos. Las condiciones anteriores, aunque no son imposibles de modificar, si generan altísimos costos para ser implementadas.

Para futuros trabajos se deberá analizar el efecto de implementar técnicas de labranza mínima en la cuenca, pues si bien la reforestación incide positivamente sobre la producción de agua, no lo hace sobre la producción de alimentos, por lo tanto se deben buscar alternativas de producción que permitan buscar el equilibrio

entre asegurar el agua y la alimentación de la población, porque de lo contrario, si se sigue la tendencia de proteger las cuencas productoras, a través de reforestación, llegará el momento en que se deba escoger entre hambre o sed. Las técnicas de labranza mínima por sus buenos resultados parecen ser un camino hacia la sostenibilidad.

Se esperaría una la disminución en la carga de sedimentos aumente la vida útil de las estructuras de filtrado y bombeo, por la disminución en la abrasión, sin embargo el cálculo de este efecto supera las posibilidades de este trabajo, pues se requiere información acerca del poder abrasivo sobre diferentes estructuras.

La aplicación de programas de manejo integral de cuencas en nuestro medio ha sido difícil, entre otras razones porque las instituciones no han sido diseñadas para aplicar enfoques integrales como el que requiere el manejo de cuencas sino segmentados, existiendo muchas instituciones; también por la conflictividad de los intereses entre la población y empresas ubicadas aguas arriba y aguas abajo.

BIBLIOGRAFÍA

AZQUETA, Diego. Valoración de la calidad ambiental, Ed. Mc Graw Hill, 1994

BAUMOL, William y OATES, Wallace. The theory of environmental policy. Cambridge University Press. 1988

CANESSA MORA, Rodolfo. 2000. Estimación de los beneficios económicos derivados de la política de protección del recurso hídrico en el Parque Nacional Chingaza. Tesis MSc. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes.

DEEB, Alejandro. Estimación de Cambios en la respuesta hidrológica. Bogotá, 1992.

DNP, Banco de Proyectos, División de Metodologías, UIP. Estimación de indicadores costo-eficiencia en proyectos de agua potable Bogotá, 1992.

FONTAINE, Ernesto. Evaluación social de proyectos. Editorial Alfaomega 12ª edición . 1999

FREEMAN, A.M. 1993. The measurement of environmental and resource values: Theory and methods. Resources for the future. Washington. U.S.A.

GARCÍA, M.C. 1996 Valoración económica de los servicios de protección hídrica y control de sedimentos de un bosque: el caso de Bucaramanga. Tesis M.Sc. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes.

GRADEX INGENIERÍA S.A. Plan de ordenamiento territorial Microcuenca Río Tona, 2001

GUPTA, Rajiv. 2001. River basin management: a case study of Narmada Valley development with special reference to the Sardar Sarovar Project in Gujarat, India. En Water resources developement, Vol. 17, No. 1, páginas 55 a 78.

JIMENEZ PERDOMO, Gustavo. Evaluación económica de externalidades de proyectos de reforestación en Cuencas, 1992.

KOZARIK, Juan. Corrección de torrentes y ordenación de cuencas, en bosques desarrollo, Quito 1999; p. 28-31.

PROYECTO CHECUA, Campo para el futuro. Bogotá 2001

PROYECTO CHECUA, Cultivar sin arar, labranza mínima y siembra directa en los Andes. Bogotá, 2000

ÖZYUVAC, Necdet et al 1999. La ordenación integrada de cuencas para el desarrollo sostenible de los recursos naturales renovables. Universidad de Estambul.

TRUJILLO GÓMEZ, Ernesto. 1999 Estudio de hidrología y climatología en cuencas nevadas modelación hidrológica de la cuenca del Río Nevado en la Sierra Nevada del Cocuy Tesis M.Sc. Bogotá Colombia. Universidad de los Andes.

TUCCI, Carlos. 2002. Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos. Agencia Nacional de Agua. Brasil

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. DETERIORO Y REHABILITACIÓN DE CUENCAS	4
1.1 REHABILITACIÓN	9
1.1.1 Medidas vegetativas	11
1.1.2 Medidas estructurales	14
2. VALORACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES	19
2.1 USOS DEL VALOR ECONÓMICO	21
2.2. LOS MÉTODOS DE VALORACIÓN INDIRECTOS	22
2.3 LA FUNCIÓN DE DAÑO	23
2.4 EXTERNALIDADES	24
3. CASO DE ESTUDIO	28
3.1 MORFOMETRIA	29
3.2 CLIMATOLOGÍA	30
3.3 MARCO GEOLÓGICO GENERAL	32
3.4 CALIDAD DE AGUAS	33
3.5 USO DEL SUELO	34
3.6 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO DE BUCARAMANGA.	36

4. CUANTIFICACIÓN DE IMPACTOS	38
4.1 RESPUESTA HIDROLÓGICA	38
4.1.1 Modelación hidrológica	45
4.1.2 Descripción y Análisis de Resultados de la Modelación	51
4.2 VOLUMENES DE SEDIMENTOS	56
5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE EXTERNALIDADES Y VALORACIÓN DE IMPACTOS	68
5.1 Reducción de Sedimentos	73
5.2 Variación de caudales	76
CONCLUSIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ANEXOS

SCENARIO 2: TRANSBORQUE

"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE	
W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
1.1.98	1.1.99	1.1.99	1.1.00	1.1.00	1.1.01	1.1.01	1.1.02	1.1.02	1.1.03

"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE	
W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
1.1.98	1.1.99	1.1.99	1.1.00	1.1.00	1.1.01	1.1.01	1.1.02

SCENARIO 3: TRANSBORQUE

"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE	
W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
1.1.98	1.1.99	1.1.99	1.1.00	1.1.00	1.1.01	1.1.01	1.1.02	1.1.02	1.1.03

"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE		"EX-GRATIS" TRANSBORQUE	
W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
1.1.98	1.1.99	1.1.99	1.1.00	1.1.00	1.1.01	1.1.01	1.1.02

ESCENARIO 2 TODO BOSQUE

Prod anual sin proyecto (m3/año)	Prod anual con proyecto (m3/año)	Dotacion (l/h/día)	VPN Total (\$1992)	VPN Total (\$2003)	VPN Total ajustado
42478992	45790272	150	199,155274	1022,50143	462,523832

ESCENARIO 3 BOSQUE 6-7

Prod anual sin proyecto (m3/año)	Prod anual con proyecto (m3/año)	Dotacion (l/h/día)	VPN Total (\$1992)	VPN Total (\$2003)	VPN Total ajustado
42478992	44339616	150	152,178237	80,9180838	36,6029239