

Thesis
T932b
c.2

INSTITUTO COSTARRICENSE DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS Y GANADERAS
CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACION
ESCUELA DE POSGRADUADOS

**BOSQUES, AGUA Y ELECTRICIDAD: CONSIDERACIONES PARA EL PAGO
DE SERVICIOS AMBIENTALES EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN CORDILLERA
VOLCÁNICA CENTRAL, COSTA RICA**

POR

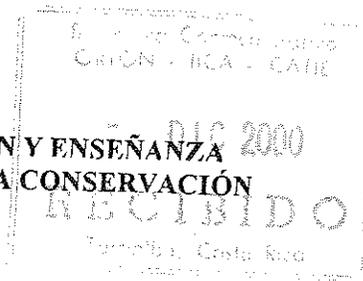
MONICA XIOMARA TURCIOS MENDOZA

CATIE

Turrialba, Costa Rica

~~2000~~
1999

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
PROGRAMA DE EDUCACIÓN PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN
ESCUELA DE POSGRADUADOS



**BOSQUES, AGUA Y ELECTRICIDAD: CONSIDERACIONES PARA EL PAGO
DE SERVICIOS AMBIENTALES EN EL ÁREA DE CONSERVACIÓN CORDILLERA
VOLCÁNICA CENTRAL, COSTA RICA**

Tesis sometida a la consideración de la Escuela de Posgraduados, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, como requisito parcial para optar por el grado de:

Magíster Scientiae

Por

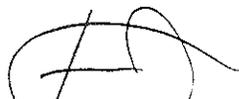
Mónica Xiomara Turcios Mendoza

Turrialba, Costa Rica
1999

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma, por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgraduados del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

FIRMANTES:



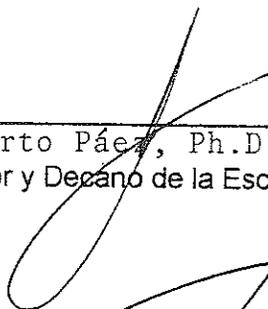
José Joaquín Campos, Ph.D.
Consejero Principal



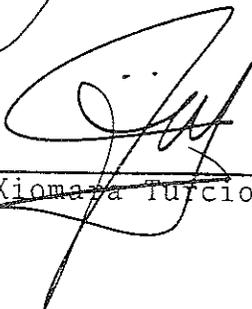
Francisco Jiménez, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Sergio Velásquez, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Gilberto Páez, Ph.D.
Director y Decano de la Escuela de Posgraduados



Mónica Xiomara Turcios Mendoza
Candidato

DEDICATORIA

A Dios nuestro Señor y a la Virgencita.

A mis queridos padres Francisco y Sonia, por su amor, apoyo y comprensión constantes además por el sacrificio que significó estar lejos.

A mis hermanos Eduardo y Javier, por apoyarme siempre.

A Mamá Amanda y Mamá Tita, porque siempre oraron por mi.

A mis tíos y tías por tenerme siempre en su mente.

A Frida, Aída y Ricardo, por estar siempre cerca aun en la distancia.

A mi esposo Henry, por su amor, paciencia y motivación en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a PROSIBONA/COSUDE y DANIDA por el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. José Joaquín Campos, Profesor Consejero por su guía, ayuda, motivación, consejos y orientación en mis estudios de Postgrado.

Al Dr. Francisco Jiménez, miembro del comité asesor por su comprensión, ayuda, valiosos aportes, cordialidad y confianza depositada.

Al MSc Sergio Velásquez, miembro del comité asesor, por siempre estar dispuesto a ayudar en la obtención de resultados y sacarme de grandes apuros.

A los MSc. Rafael Oreamuno y Rosalba Ortiz, por sus valiosas contribuciones en la elaboración del estudio.

Al Dr. Jeffy Jones, y Alexander del área de SIG, por el apoyo y al Dr Lucio Pedroni por proporcionarme las imágenes de su tesis para elaborar la mía.

A FUNDECOR, especialmente a los Ingenieros Gustavo Solano y Pedro González por proporcionarme sus conocimientos del Área de Conservación y sus proyectos.

Al Ing. José Benavides y a la Srita. Donnia Alfaro, del Proyecto Energía Global de Costa Rica por proporcionarme la información requerida.

A mis compañeros y amigos de Maestría por enseñarme tantas cosas nuevas en cada gira y sesión de estudios, especialmente a Carla, Natasha, Mario, Naikoa, Beto, Eduardo y Raúl.

A mis amigas María José, Eufemia, Glenda y Yanira por tantos y tantos momentos compartidos que hicieron este tiempo realmente inolvidable

Turcios, M.X. 1999. Bosques, agua y electricidad: consideraciones para el pago de servicios ambientales en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 65 p.

Palabras claves: cobertura boscosa, evapotranspiración, ciclo hidrológico, servicios ambientales, electricidad, escorrentía, cuencas.

RESUMEN

Los bosques tropicales brindan servicios ambientales como la fijación y almacenamiento de carbono, protección de biodiversidad, belleza escénica y protección y regulación del agua de fuentes acuíferas para el consumo humano y para la producción agrícola e hidroeléctrica. La Ley Forestal No. 7575 del Gobierno de Costa Rica, publicada en 1996, en su artículo 46 contempla el pago servicios ambientales (PSA), cuyo objetivo será financiar, para beneficio de pequeños y medianos productores, mediante créditos y otros mecanismos de fomento del manejo de bosques, intervenidos o no, los procesos de conservación, reforestación, viveros forestales, sistemas agroforestales y recuperación de áreas denudadas, así como plantaciones forestales, para lo cual el ente encargado de realizarlo es el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) que forma parte del Ministerio de Ambiente (MINAE) de Costa Rica (Ley Forestal 7575 y su Reglamento, 1996).

Este estudio tuvo como fin proveer información a las entidades responsables del pago por servicios ambientales, de tal forma que sirva como sustento y justificación para mejorar dicho mecanismo en el área de estudio y que pueda extenderse a otras que cuenten con las características de poseer un bosque que, a su vez, brinda su servicio a la humanidad.

Para esto se escogió la cuenca del Río San Fernando por considerarse de importancia para FUNDECOR y para el Proyecto Hidroeléctrico de Energía Global, que tiene situado ahí el proyecto Don Pedro. Además, alrededor de esta cuenca se encuentran fincas incorporadas en el programa de Pago por Servicios Ambientales (PSA).

Se recopiló información hidrológica, de un período de veinte años, de las estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca en estudio, la cual, por ser una cuenca recientemente utilizada para fines hidrológicos, cuenta con poca información.

Se utilizó interpolaciones con los programas de sistema de información geográfica como ArcView e Idrisi, para obtener la precipitación en la cuenca, la cual se necesitaba para poder hacer el balance hídrico de la cuenca. Este balance se obtuvo por medio de la aplicación del modelo de Precipitación-Escorrentía, el cual esta orientado a proveer los

valores de escorrentía promedio de una cuenca con datos insuficientes, tomando valores de precipitación total promedio y evapotranspiración; y su ecuación básica es: $ESC = PPT - EVT_R - (S1 - S2)$.

Luego se crearon cinco escenarios de cobertura boscosa (que varían de 0 - 100 % de deforestación) para tratar de establecer el efecto de la deforestación en el comportamiento de la escorrentía.

Para poder ayudar al Sistema de PSA, se estableció la relación beneficio/costo del Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro si se redujera la escorrentía en la cuenca debido a la deforestación.

El valor interpolado de la precipitación anual en la cuenca fue de 4312 mm. La escorrentía promedio fue de 3581 mm año⁻¹, que aumentó directamente proporcional al porcentaje de deforestación en la cuenca en el modelo.

Con respecto a los beneficios del proyecto hidroeléctrico, al modificar la producción real para el año 1999 del proyecto hidroeléctrico Don Pedro, creando tres diferentes escenarios que abarcaban situaciones extremas y medias, con los cuales se simuló una producción menor en los meses secos, debido a la irregularidad del caudal que podría esperarse al modificar la cobertura boscosa; se obtiene como resultado una disminución en los beneficios directos actuales que va desde 0.75% hasta 23% aproximadamente.

Los cinco escenarios analizados de deforestación con el método de Precipitación-Escorrentía, muestran que la disminución del bosque favorecería un aumento en la escorrentía.

Además, de acuerdo al modelo utilizado; la cuenca, posiblemente no llegue a tener un déficit hídrico, debido a que la relación de evapotranspiración/precipitación obtenida a partir de la interpolación mantuvo valores entre 0.06 y 0.45.

Se recomienda realizar mediciones por tiempos mayores a un año para obtener datos más precisos generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía.

Turcios, M.X. 1999. Forests, water and electricity: considerations for the payment of environmental services in the Central Volcanic Mountain Range Conservation Area, Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 65 p.

Key words: electricity, environmental services, evapotranspiration, forest cover, hydrological cycle, runoff, watersheds.

ABSTRACT

Tropical forests offer environmental services such as the fixation and storage of carbon, protection of biodiversity, scenic beauty and protection and regulation of aquifer water sources for human consumption and for agricultural and hydroelectric production. Article 46 of Forest Law No. 7575 of the Government of Costa Rica, published in 1996, contemplates the payment for environmental services (PES). The objective will be to finance, for the benefit of small and medium scale producers, through credits and other mechanisms, forest management with or without interventions, the conservation processes, reforestation, forest nurseries, agroforestry systems and recovery of denuded areas, as well as forest plantations, for which the entity in charge is the National Fund for Forest Financing (FONAFIFO) that forms part of the Ministry of Environment (MINAE) of Costa Rica (Forest Law 7575 and its Regulation, 1996).

This objective of the study was to provide information to the entities responsible for the payment for environmental services, in a manner that serves to sustain and justify the improvement of this mechanism in the study area, and which could be extended to other areas that have the characteristics to support a forest that, in turn, offers its service to humanity.

To realize this goal, the watershed of the San Fernando River was chosen for its importance to FUNDECOR and to the Hydroelectric Global Energy Project in which is located the Don Pedro project. Also, around this watershed, are properties incorporated in the Payment for Environmental Services (PSA) program.

Hydrological information was gathered, for a twenty year period, from the meteorological stations around the watershed under study, which, being a watershed recently used for hydrology, has little information.

Interpolations with geographical information system programs such as ArcView and Idrisi, were utilized to obtain precipitation in the watershed, which was needed to determine the water balance of the watershed.

This balance was obtained by means of the application of the pattern of precipitation-runoff, which was oriented to provide the values of average runoff from a watershed with insufficient data taking values of total average precipitation and evapotranspiration. The basic equation is: $ESC = PPT - EVT_R - (S1 - S2)$.

Then, five scenarios of forest cover were created (that vary from 0 - 100% deforestation) to try to establish the effect of deforestation on the behavior of the runoff.

To be able to support the PES System, the cost/benefit ratio of the Don Pedro Hydroelectric Project was determined if it decreased the runoff in the watershed due to deforestation.

The interpolated value of the annual precipitation in the watershed was 4312 mm. The runoff average was $3581 \text{ mm year}^{-1}$ that increased in direct proportion to the deforestation percentage in the watershed.

With respect to the benefits of the hydroelectric project, the real production of the Don Pedro hydroelectric project for 1999 was modified by creating three different scenarios that embraced extreme and average situations. A smaller production was simulated in the dry months, due to the irregularity of the flow that could be expected when modifying the forest cover. A decrease in the current direct benefits that from approximately 0.75% to 23% was obtained.

The five analyzed scenarios of deforestation with the precipitation-runoff method showed that the decrease of the forest would favor an increase in runoff.

Also, according to the method used; the watershed probably would not end up having a water deficit, because the evapotranspiration/precipitation ratio obtained through interpolation maintained values between 0.06 and 0.45.

It is recommended to carry out measurements for periods longer than one year to obtain more precise data generated by the precipitation-runoff model.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	ix
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
I. Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo General	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Hipótesis	3
II. Revisión de Literatura	4
2.1 Ciclo hidrológico	4
2.1.1 Precipitación	4
2.1.2 Intercepción	5
2.1.3 Evaporación	5
2.1.4 Transpiración	5
2.1.5 Evapotranspiración	6
2.2 Importancia de los bosques naturales tropicales en la hidrología	7
2.2.1 Influencia del bosque húmedo tropical en la hidrología	9
2.3 Un acercamiento a las cuencas hidrográficas	9
2.3.1 Factores distintivos de una cuenca	10
2.3.2 Parámetros físicos de la forma de una cuenca	11
2.4 Calidad y cantidad del agua en cuencas	11
2.5 Modelación hidrológica	12
2.5.1 Clasificación de los modelos	13
2.5.2 Modelo de Precipitación-Escorrentia	13
2.6 Hidroelectricidad	15
2.7 Valoración económica de recursos naturales	15
2.7.1 Valoración económica del bosque	16
2.7.2 Valoración económica e importancia del agua	17
2.8 Sistema de Pago por Servicios Ambientales	19
2.8.1 Sistema integral de servicios ambientales	20
2.8.1.1 Protección de los recursos hídricos	20
2.8.2 Convenio Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro-FUNDECOR	21
III. Materiales y métodos	23
3.1 Descripción geográfica y física de la zona de estudio	23
3.1.1 Características de la cuenca	23
3.1.2 Morfología de la cuenca	23

3.2	Clima del ACCVC	23
3.3	Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro	25
3.3.1	Ubicación	25
3.3.2	Entorno del Proyecto	25
3.3.3	Clima del ambiente terrestre de la cuenca	25
3.4	Métodos	26
3.4.1	Modelo hidrológico	26
3.4.1.1	Obtención de la información	26
3.4.1.2	Aplicación del modelo de Precipitación-Escorrentía	27
3.4.2	Método para la valoración económica	33
3.4.2.1	Obtención de la información	33
3.4.2.2	Aplicación del método de Beneficio-Costo Extendido	35
IV.	Resultados y discusiones	36
V.	Conclusiones y recomendaciones	44
5.1	Conclusiones	44
5.2	Recomendaciones	46
VI.	Bibliografía citada	47
VII.	Comunicaciones personales	51
ANEXOS		52

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.	Distribución del uso actual de las tierras de la cuenca del Río San Fernando.	24
Cuadro 2.	Temperatura promedio (°C), humedad relativa (%), brillo solar (h) y precipitación (mm), para el área alrededor de la cuenca San Fernando.	24
Cuadro 3.	Estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca de los ríos Sarapiquí y San Fernando.	27
Cuadro 4.	Escorrentía promedio mensual como porcentaje de la escorrentía promedio anual.	32
Cuadro 5.	Valores de escorrentía obtenidos de aplicar el modelo Precipitación-Escorrentía para diferentes escenarios de cobertura boscosa en la cuenca del Río San Fernando.	37
Cuadro 6.	Valores de escorrentía mensual para los diferentes escenarios de deforestación generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía.	39
Cuadro 7.	Cálculo de la Escorrentía mensual de la cuenca del Río San Fernando, utilizando la EVTp calculada con el método de Thornwaite.	40
Cuadro 8.	Pérdidas en la producción, comparadas con la producción real y la producción máxima de los diferentes escenarios financieros.	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Producción hipotética de electricidad durante un año	34
Figura 2.	Efecto de la deforestación en la cuenca sobre la escorrentía.	38
Figura 3.	Tendencia de la distribución de los valores de escorrentía mensual en un año promedio, generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía.	39
Figura 4.	Tendencia de los valores de escorrentía mensual utilizando la EVTp calculada con el método de Thornwaite.	40
Figura 5.	Comparación de los ingresos netos de los diferentes escenarios creados con la producción máximo y con el ingreso neto actual.	42

I. Introducción

La cobertura boscosa juega un papel importante en la protección de cuencas, ya que estabiliza el suelo, y es bien conocido que ayuda a prevenir la erosión y la sedimentación en los ríos, lagos y océanos. El bosque es el principal recurso mediante el cual, el agua puede mantenerse en su ciclo natural con pocas alteraciones, lo que es muy importante en términos de su calidad y cantidad (Cubero, 1994).

Durante el ciclo hidrológico: del océano a la atmósfera, a la tierra y de vuelta al océano, el agua se almacena temporalmente en ríos, lagos, suelos y acuíferos, por lo que queda disponible para múltiples usos (Oreamuno, 1991).

La disponibilidad del agua, su calidad, manejo y la demanda que esta tiene, merecen especial atención en la región centroamericana, por cuanto constituyen elementos claves en el desarrollo de muchas actividades de beneficio para el ser humano. Debido a esto, se ha considerado prioritario y de interés mundial, la protección de los recursos hídricos (Faustino, 1997).

La comunidad internacional ha entrado en un proceso de concientización con respecto a la responsabilidad que deben compartir el sector público y el privado en la conservación y manejo sostenible de los recursos naturales y el ambiente, así como una serie de servicios que brinda el bosque y las plantaciones forestales a la sociedad. Como consecuencia, es necesario distribuir adecuadamente los esfuerzos que se realizan para conservarlos, y de esta manera, se amplíen y fortalezcan las acciones con este fin por medio de la creación de mecanismos para retribuir a los propietarios y poseedores de bosques y plantaciones forestales por estos servicios (Vega *et al.*, 1998).

En América Central, Costa Rica es pionero en establecer el pago por servicios ambientales, en el que organizaciones como FUNDECOR, se preocupan por mantener los acuíferos; y lo hacen por medio de incentivos para la conservación, el manejo de bosques y la reforestación, tales como: deducción de impuestos sobre la renta, certificado de abono forestal, certificado de abono forestal para pequeños reforestadores, créditos blandos, y otros (Fundación Neotrópica, 1991).

La Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR), es un organismo no gubernamental, sin fines de lucro, cuya misión es la conservación, desarrollo y uso sostenible del patrimonio natural y cultural del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC). Este organismo junto con Energía Global de Costa Rica han firmado un acuerdo para promover la conservación del bosque en las cuencas del río San Fernando y río Volcán, con sus funciones hidroeléctricas.

Bajo este acuerdo, la compañía contribuirá con el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) con US\$10.00 por hectárea por año, en las tierras dentro de sus cuencas, donde los propietarios estén de acuerdo con mantener un aprovechamiento forestal de bajo impacto, y también promueven la reforestación y la conservación del bosque. Con esto el FONAFIFO, complementa el pago por servicios ambientales a los propietarios a aproximadamente US\$40.00 con fondos provenientes de contribuciones gubernamentales, para que este uso de la tierra pueda ser competitivo con otros usos como cultivos o pastos.

Sin embargo, el bosque sigue siendo amenazado para darle a la tierra otros usos, por lo que se considera necesario hacer investigaciones que lleven a estructurar mejor el pago por servicios ambientales en Costa Rica y se valore adecuadamente la presencia de bosque alrededor de las cuencas y en otras zonas prioritarias.

Los resultados de este estudio tienen importantes aportes e implicaciones para la toma de decisiones que pueden ayudar a otros estudios futuros, para determinar el valor económico potencial de los recursos hídricos de una cuenca con potencial Hidroeléctrico, que a su vez contribuye al rescate ambiental de países en vías de desarrollo que tienen la característica de un clima tropical con recursos hídricos relativamente abundantes como Costa Rica.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General:

- Evaluar el efecto del bosque en la regularidad del caudal y sus implicaciones en el valor económico de este servicio ambiental en microcuencas con potencial de uso hidroeléctrico del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central de Costa Rica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar indicadores que permitan medir la regularidad del agua en cuencas hidrográficas con potencial para uso hidroeléctrico.
- Evaluar el efecto del uso de la tierra sobre la regularidad del caudal del Río San Fernando en el ACCVC.
- Evaluar, en términos financieros, el efecto de pérdida de la vegetación boscosa en la regularidad de sus caudales, en una microcuenca con potencial hidroeléctrico.
- Contribuir al diseño del pago del servicio ambiental en bosques por el servicio de mantener la regularidad del caudal en la cuenca del Río San Fernando en el ACCVC.

1.2 Hipótesis

La presencia del bosque en las cuencas influye positivamente en la recarga hídrica (regularidad de los procesos del ciclo hidrológico) de cuencas con potencial para uso hidroeléctrico.

II. Revisión de Literatura

Este documento presenta una breve revisión bibliográfica sobre el ciclo hidrológico y el balance hídrico. También agrupa los principales conceptos que van enfocados a la recarga hídrica. Se considera de importancia establecer los parámetros de calidad de agua para uso hidroeléctrico en las cuencas hidrográficas, tales como producción de agua, erosión y sedimentación, por lo que también se incluyen. Además presenta información sobre diferentes tipos de modelos hidrológicos de predicción, que pueden ser utilizados según los diferentes intereses de investigación.

2.1. Ciclo hidrológico

El concepto de ciclo hidrológico, a pesar de ser muy académico es muy útil en la comprensión de la secuencia de los procesos que determinan la disponibilidad de agua en una cuenca y sus interrelaciones (Gutiérrez, 1988a). Durante esta interminable circulación, el agua es almacenada temporalmente en ríos, lagos, en el suelo y fuentes subterráneas, y luego regresa a ser disponible para su uso (Dunne y Leopold, 1978). En el ciclo, la energía solar evapora el agua desde los océanos, el vapor resultante es transportado por las masas móviles de aire. Bajo condiciones adecuadas el vapor se condensa para formar las nubes, las cuales a su vez pueden transformarse en precipitación.

El ciclo hidrológico consta de los siguientes componentes:

2.1.1 Precipitación

Para explicar el ciclo hidrológico se debe partir explicando alguna de sus partes, pero este no tiene ni un principio ni un final. Es un ciclo, un movimiento sin fin, cuyas actividades se extienden en la atmósfera, la hidrosfera y la litosfera (Gutiérrez, 1988a).

En muchos documentos se toma la precipitación como el componente inicial del ciclo hidrológico, junto con la nieve. Del cual, una porción es interceptada por las copas de los árboles del bosque y luego evaporada en la atmósfera, otra parte es retenida temporalmente por el suelo en las cercanías del lugar donde cae, evaporada por el mismo, lo que produce humedad en el suelo, ésta es llevada desde las raíces hasta las copas donde es transpirada. Otro tipo de precipitación es la que no es interceptada, y que se escurre a través de las copas y luego por el fuste (Easter *et al*, 1986; Murraille *et al.*, 1995). Existen diferentes tipos de precipitación:

a) Precipitación bruta o incidente

La precipitación bruta es definida como precipitación que llega a la parte superior de la vegetación, esta no depende de la cobertura vegetal, lo que implica que una determinada superficie de bosque no influye en la ocurrencia, cantidad y duración de eventos de precipitación a los cuales está expuesta.

b) Precipitación neta

Es la cantidad de precipitación que llega al suelo por goteo de la vegetación, de manera directa y por escorrentía de los tallos (Stadtmüller, 1994).

2.1.2 Intercepción

Otro componente importante es la intercepción, que se define como la cantidad de agua proveniente de la precipitación retenida por la vegetación y luego evaporada.

La intercepción es un proceso dinámico de pérdida de agua en movimiento desde la atmósfera inferior hasta el suelo por interferencia de la cubierta vegetal.

Hay dos formas de expresar la intercepción (Stadtmüller, 1994):

a) Interceptación absoluta

Es la cantidad de agua interceptada por una cobertura vegetal y que depende de la capacidad de almacenamiento de la cobertura, se expresa como una lámina de agua (mm).

b) Intercepción relativa

Que depende de las características de la precipitación, tales como cantidad, duración, etc., y se expresa en porcentaje.

Generalmente los bosques, son capaces de interceptar más agua que otras coberturas vegetales, aún más los bosques tropicales debido a las especies que tienen hojas anchas, altas densidades de población y estratos, así como también los bosques primarios no intervenidos (Stadtmüller, 1994; Easter *et al*, 1986).

2.1.3 Evaporación

Se refiere a la evaporación de agua desde el suelo, la cual, en los suelos forestales es muy baja por las condiciones microclimáticas que predominan en los bosques (Stadtmüller, 1994).

2.1.4 Transpiración

Es la pérdida de agua, principalmente por los estomas, relacionados con los procesos productivos de las plantas (Baumgartner, 1970; citado por Stadtmüller, 1994). La tasa de esta puede variar de acuerdo a la zona que se evalúe, pero en los bosques se tienen las tasas más altas que en otras coberturas vegetales, lo que se ha podido comprobar aún en regiones donde se tiene una estación seca muy marcada (Easter *et al*, 1986).

2.1.5 Evapotranspiración

Se puede definir como el conjunto de los fenómenos que transforman el agua en vapor mediante un proceso específicamente físico, también es mayor en los bosques, por su alta capacidad de almacenamiento y transpiración, por sus sistemas radicales extensos (Stadtmüller, 1994).

La infiltración es otro proceso importante en el ciclo hidrológico como un proceso natural de movilización del agua a través de los horizontes del suelo por gravedad, y que se ve afectada, no sólo por la cobertura vegetal sino también, por las características físicas de los suelos que los sustentan y por el manejo que se le dé para conservar las propiedades que permiten que el agua se infiltre.

Cuando el agua residual llega al suelo, después de haber ocurrido los procesos de evapotranspiración e intercepción, pasa a las capas más profundas con facilidad, y es retenida por las fuerzas capilares, a lo que se le denomina humedad de un suelo. La cual al aumentar y satisfacer la capacidad de almacenamiento el agua se desplaza, y, entonces, se mueve lateralmente como flujo subsuperficial o percolar hacia zonas más profundas hasta llegar a las aguas subterráneas, de donde se mueve lentamente hacia ríos, lagos y pantanos (Stadtmüller, 1994; Oreamuno, 1991).

La parte de la precipitación que no es absorbida por el suelo, llena las depresiones del terreno y, eventualmente, cuando éstas se llenan, se inicia el proceso de flujo superficial (Oreamuno, 1991).

Todos estos parámetros se consideran importantes para una cuenca hidrográfica y su régimen de caudales, ya que todo el flujo residual del ciclo después de las pérdidas por evaporación, va a parar a una cuenca (Easter *et al*, 1986).

El bosque natural es el mejor conjunto vegetal para mantener las propiedades infiltrantes del suelo, debido a que la presencia de bosque suele favorecer la creación de un buen sistema de movilización del agua en el suelo. El mayor riesgo que se corre al cambiar el uso de la tierra (por ejemplo a pasturas, específicamente porque el sobrepastoreo genera compactación) es la modificación de las propiedades infiltrantes de los suelos. Sin embargo, se considera que un pasto mejorado y manejado sosteniblemente, puede mantener estas propiedades (Gutiérrez, 1988b).

Todos estos elementos contribuyen a mantener el balance hídrico. Este término se refiere al balance entre las entradas de agua de la precipitación y el derretimiento de la nieve, y las salidas por evaporación, transpiración, recarga de agua subterránea y corrientes de agua. El balance hídrico ha sido utilizado para simular modelos de demanda de irrigación estacionales y geográficos. Un método para calcularlo se describe en Thornthwaite y Mather (1957), y ha sido modificado a través del tiempo (Dunne y Leopold, 1978).

En un período dado (anual, mensual) la producción de agua se puede expresar como la cantidad que escurre después de restar la evapotranspiración (considerada como pérdida) a la precipitación sobre la cuenca, más o menos un cambio en la cantidad de agua almacenada en la cuenca durante el período en estudio, y que puede presentarse como almacenamiento de agua superficial, subterránea, o como humedad en el suelo (Gutiérrez, 1988a):

Finalmente, el ciclo hidrológico es un marco apropiado para analizar las modificaciones a los recursos hídricos por causa de las modificaciones que el hombre hace a la tierra.

El uso de la tierra determina factores del ciclo, como la evapotranspiración y recarga hídrica. Los cambios más importantes con respecto a su impacto en el manejo del agua, han sido la intensificación en la agricultura, la deforestación, y el incremento en las áreas urbanas e industriales (Hoeks, 1996).

2.2 Importancia de los bosques naturales tropicales en la hidrología

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se puede concluir que para un nivel de precipitación dado, la magnitud de las pérdidas es lo que determina la producción de agua en una cuenca. Por lo tanto, interesa analizar como el uso de la tierra afecta la magnitud de las pérdidas y los procesos del ciclo hidrológico.

Tomando la cobertura boscosa densa como uso de la tierra, se puede decir que la presencia del recurso forestal en la corteza terrestre influye en muchos procesos ecológicos y biológicos, de los que el agua es un componente vital (Novelo, 1985).

Para toda utilización del agua en las actividades humanas o naturales, es esencial su calidad. Esto es válido, trátase de agua para uso doméstico, para la irrigación, producción de energía o recreación. Los beneficios serán tanto mayores cuanto más conserve el agua sus condiciones originales, esto es, cuanto menos alterada se encuentre en sus características físicas, químicas, biológicas y su correspondiente régimen hidrológico (Rodríguez, 1996).

El agua es un recurso natural renovable que beneficia al hombre, y como ya se ha mencionado, los recursos forestales ayudan a la captación de agua y a la regulación del ciclo hidrológico. El movimiento del agua de las partes montañosas hacia las partes bajas también es afectado por la presencia de vegetación forestal. Su presencia controlaría que en las superficies bajas se presenten inundaciones; las cuales deterioran las tierras agrícolas y causan disturbios en zonas urbanas (Novelo, 1985; Rodríguez, 1996).

Rodríguez (1996) afirma que la conservación de los bosques, el manejo apropiado de las cuencas y su relación con el aprovechamiento hidráulico tiene un carácter simbiótico ya que se favorecen mutuamente en su sustentabilidad.

Todavía se tiene controversia con respecto a las funciones y beneficios de los bosques, ya que se cree que con todos los procesos internos del bosque y su mayor intercepción de agua proveniente de la precipitación, se tiene mayor pérdida de flujo hacia ríos y afluentes. Los bosques interceptan montos considerables de la precipitación bruta lo que causa que la precipitación neta sea menor que en otras coberturas vegetales; también muestran altas tasas de evapotranspiración. Sin embargo, se debe reconocer que el bosque provee de agua de mayor calidad (tanto química como física). Además, el bosque usa mucha de esta agua en producir una amplia cantidad de productos. En general, los suelos forestales en el trópico húmedo, muestran altas tasas de infiltración y son muy eficientes en proteger el suelo contra erosión superficial a pesar del alto potencial erosivo de la lluvia. Con esto se puede ver que el bosque provee de servicios ambientales. Por último, otro uso de la tierra puede no ser sostenible en muchas áreas donde el bosque está presente ahora (Easter *et al*, 1986; Stadtmüller, 1994).

Por otro lado, en regiones con una estación seca bien marcada, el caudal de las corrientes durante la estación seca, depende prácticamente del flujo base proveniente de los acuíferos. Por lo tanto es importante mantener tasas de infiltración en la cuenca que aseguren el aporte a las aguas subterráneas. En este sentido, un buen uso de la tierra, que evite en lo posible la compactación del suelo, contribuirá al sostenimiento del flujo base. Es altamente deseable mantener buenos niveles de infiltración para sostener el flujo base y regular la distribución temporal del flujo (Gutiérrez, 1988b)

2.2.1. Influencia del bosque húmedo tropical en la hidrología.

El bosque natural o plantado, en su carácter de vegetación masiva o dispersa, ejerce efectos multifuncionales en el régimen hidrológico natural; principalmente a partir de los parámetros: intercepción, evaporación, transpiración e infiltración, descritos anteriormente. Todas estas funciones están interrelacionadas entre sí y actúan conjuntamente frente a las condiciones climáticas, que son determinantes en los cambios que se puedan originar en un régimen de caudales

Según Stadtmüller (1994), los bosques, por su estructura (altura, estratos diferentes) y su elevado índice de área foliar (IAF), tienen un contacto muy intensivo con la atmósfera, por lo que es la cobertura más activa en la modificación de procesos meteorológicos e influyen sobre los elementos hidrometeorológicos a escala microclimática.

Es por eso que, cuando la mayor parte del uso de la tierra es diferente al bosque, se tiene problemas de erosión, ya que las copas de los árboles amortiguan la fuerza de las lluvias torrenciales y los sistemas de raíces de los árboles mantienen el suelo y el agua en su lugar (Zúñiga, 1998); al deforestar este problema puede ser muy drástico y varía su intensidad dependiendo del uso que tenga la tierra.

2.3 Un acercamiento a las cuencas hidrográficas

Un servicio importante de los bosques es la captura y retención del agua de lluvia, que luego es recargada en las cuencas, donde es utilizada por el hombre para muchas actividades, ya sean agrícolas o industriales.

Todos los sistemas o ecosistemas de agua dulce, disponible para abastecer las diferentes necesidades humanas, están organizados en cuencas hidrográficas. Muchos de los impactos en las cuencas están relacionados con las actividades del hombre, lo que provoca cambios en procesos hidrológicos, (Easter *et al*, 1986; Zúñiga, 1998). Por esto se considera importante introducir el concepto de cuenca.

Estas son superficies de tierra que drenan el agua de la lluvia hacia un cauce principal (río) que los conduce, directa o indirectamente, al mar o a un lago interior. Por lo que, ecológicamente, la cuenca se constituye así en la unidad natural para monitorear los cambios ambientales y para controlar el uso del agua y de la tierra de manera equilibrada (Zúñiga, 1998).

Una cuenca puede definirse como el área de alimentación de una red natural de drenaje cuyas aguas son recogidas por un colector común. Además de área tiene una tercera dimensión; profundidad, entendiéndose como tal aquella comprendida entre el dosel de la cobertura vegetal, exteriormente y los estratos geológicos que limitan la cuenca hacia abajo (Faustino, 1988).

Ramakrishna (1997) define una cuenca como un área natural en la que el agua proveniente de la precipitación forma un curso principal de agua. La cuenca hidrográfica es la unidad fisiográfica conformada por el conjunto de los sistemas de cursos de agua definidos por el relieve. Los límites de la cuenca o "divisoria de aguas" se definen naturalmente y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río.

Campos (1987), define la cuenca hidrográfica como una unidad territorial formada por un río principal con sus afluentes y por un área colectora de las aguas, donde están contenidos los recursos naturales básicos para las múltiples actividades humanas, donde todos estos recursos mantienen una continua y particular interacción con el aprovechamiento y desarrollo productivo del hombre.

Una cuenca está conformada por componentes físicos, biológicos y antropocéntricos que interactúan entre sí, cuyos recursos naturales son renovables.

2.3.1 Factores distintivos de una cuenca

Algunos aspectos relevantes a tomar en cuenta en una cuenca para su manejo y desarrollo son las siguientes:

La fragilidad que presentan debido a su vulnerabilidad causada por la degradación o por la intensidad de uso; el relativo aislamiento físico lo que causa un difícil acceso; poseen una población y oportunidades marginales; es un complejo de factores y oportunidades con variada escala lo que le da diversidad como fuente para la sostenibilidad; tiene oportunidades especiales que implican condiciones ventajosas para el desarrollo de ciertas actividades; los habitantes del área de una cuenca tienen la capacidad de adaptarse a las nuevas actividades o proyectos (Ramakrishna, 1997).

2.3.2 Parámetros físicos de la forma de una cuenca

Dentro del análisis hidrológico se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca hidrográfica. A continuación se describirán algunas formas relevantes:

a) Número de orden de un cauce: Horton, (citado por Linsley *et al.*, 1986), sugirió la clasificación de cauces de acuerdo al número de orden de un río, como una medida de la ramificación del cauce principal en una cuenca hidrográfica. Un río de primer orden es un tributario pequeño sin ramificaciones. Un río de segundo orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primer orden. Un río de tercer orden es uno que posee únicamente ramificaciones de primero y segundo orden. El orden de una cuenca hidrográfica está dado por el número de orden del cauce principal.

b) Densidad de drenaje: definida por la relación entre la longitud total de los cauces dentro de una cuenca y el total de drenaje, llamada también longitud de canales por unidad de área. Una densidad alta refleja una cuenca muy bien drenada que debería responder relativamente rápido al influjo de la precipitación; una cuenca con baja densidad refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica muy lenta.

Con el fin de disponer de agua de una manera fácil, el hombre se ha concentrado en la zona cercana a los ríos, lo cual causa preocupaciones ya sea por excesos o por deficiencia de agua. Esto ha obligado al hombre últimamente a preocuparse más por el aspecto de calidad del agua (Beitia, 1989; citado por Villegas 1995).

Otro concepto importante para este servicio es el de caudal y se define, en una estación de un río, como la elevación del agua medida por encima de un cero arbitrario de referencia. Algunas veces, la referencia utilizada es el nivel medio del mar, pero más a menudo, se toma como referencia un punto ligeramente por debajo del nivel para el cual la descarga es cero.

El uso de la tierra alrededor de las cuencas puede tener diferentes efectos como cambios en la distribución del agua en los afluentes de la cuenca, cambios en la producción de agua o en la recarga de los afluentes, disminución en los flujos y caudales entre otros (Easter *et al.*, 1986).

2.4 Calidad y cantidad del agua en cuencas

Aunque el interés principal de esta investigación es la regularidad del ciclo hidrológico, es decir la cantidad de agua en una cuenca, es importante establecer algunos conceptos y parámetros relacionados con la calidad de ésta.

La calidad del agua puede definirse según Villegas (1995) como la suma de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas superficiales (quebradas, ríos y lagos) y aguas subterráneas (acuíferos).

La capacidad de recarga y el escurrimiento superficial en una cuenca es variable, dependiendo de la cobertura vegetal que presente; ya que, a más cubierta vegetal, mayor es la cantidad retenida, manteniendo los caudales de aguas superficiales en épocas secas, así como la capacidad de recarga de los reservorios (Odum, 1986; citado por Castro y Barrantes, 1998).

Las cuencas cubiertas por bosques producen aguas de muy buena calidad por la alta capacidad de infiltración de los suelos forestales, las bajas tasas de escorrentía superficial y baja erosión. El agua proveniente de cuencas cubiertas por bosques vírgenes tiene la mejor calidad disponible.

Debido a esto, el agua proveniente de cuencas forestales se caracteriza por el bajo contenido de sedimentos, baja turbidez, bajo contenido de organismos infecciosos, baja temperatura, así como un alto contenido de oxígeno disuelto (Stadtmüller, 1994).

2.5 Modelación hidrológica

Para realizar el planeamiento de los recursos hidráulicos, es necesario contar con muy buena información sobre los principales elementos climáticos, pero rara vez se encuentra un caso en que los datos básicos son suficientemente abundantes y de adecuada seguridad, para realizar el más acertado diseño de las obras que conduzcan al aprovechamiento óptimo del recurso hidráulico. El caso más generalizado que se presenta en la evaluación de los recursos hidráulicos, especialmente en cuencas pequeñas o localizadas en áreas apartadas de los centros más poblados y con mejores recursos de información es que los registros son muy cortos o discontinuos, o bien, no existen del todo; lo que obliga al hidrólogo a aplicar métodos de transferencia de datos que como tales siempre representan sólo una aproximación de la realidad (Saborío, 1983).

Entre los datos más importantes que se busca obtener está el valor de caudal de un río, por lo que su estimación es requerida para una gran variedad de propósitos. Razón por la cual se ha llevado a cabo un profundo estudio de los procesos que componen el ciclo hidrológico para poder modelarlo.

Un modelo se puede definir como una representación simplificada de un sistema complejo (Oreamuno, 1991).

Argüello (1992) define un modelo como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social real, al que es análogo en determinado sentido.

En hidrología, el uso de modelos ofrece la posibilidad de comprender o explicar en mejor forma los fenómenos naturales, ya sea, bajo el enfoque determinístico o probabilístico, puesto que las predicciones pueden asemejarse bastante a la realidad (Villalta, 1996).

Los modelos hidrológicos pretenden representar el sistema definido por el ciclo hidrológico. El objetivo de estos es obtener los valores de escurrimiento en función de los valores de precipitación (Oreamuno, 1991).

Los modelos de simulación pueden ser tan realistas como lo permita el conocimiento del sistema por parte del planificador y también que se comuniquen con relativa facilidad. La selección del modelo estará determinada primero, por los objetivos perseguidos y, segundo, por las características de los procesos bajo estudio (Goitia, 1995).

2.5.1 Clasificación de los modelos

Los modelos se clasifican si dependen o no del tiempo (dinámicos o estáticos) y si incorporan o no elementos probabilísticos (probabilísticos o determinísticos) (Goitia, 1995).

Los modelos determinísticos son generalmente usados en la evaluación del recurso hídrico en función de una cantidad y distribución de precipitación proporcionada, para proveer más información cuantitativa sobre la magnitud, calidad y distribución de agua disponible. También sirven para extender esta información en la predicción de efectos directos e indirectos, causados por el hombre sobre el recurso agua existente (Goitia, 1995).

2.5.2 Modelo de Precipitación - Escorrentía.

Esta metodología está orientada a proveer los valores de escurrimiento promedio de una cuenca con datos insuficientes (Saborío, 1983).

El modelo es una combinación del método del balance hídrico, con el método de la red o cuadrícula, para obtener una amplia información del potencial, tanto hidrológico como hidroeléctrico de una cuenca. Este consiste en trazar una cuadrícula sobre los mapas topográficos y de isoyetas de la cuenca, de manera tal que se obtengan N intersecciones, se enumeran las líneas de la cuadrícula y se procede a leer la precipitación y la elevación en cada

punto de intersección y a una longitud constante de la cuadrícula y que depende del tamaño de la cuenca. Con estos datos se aplican las fórmulas del balance hídrico y se determina la escurrimiento (Rodríguez y Saborío, 1987).

En la primera parte resulta, por lo general, más fácil obtener datos de lluvia que de evapotranspiración; puesto que la primera puede medirse directamente, mientras que la segunda solo puede determinarse a partir de métodos indirectos que se basan en datos climáticos.

Holdridge propone el uso de un nomograma para calcular el balance hídrico, a partir de la precipitación promedio (PPT) en la cuenca y de la biotemperatura (T_b ; definida como la temperatura media anual y calculada de manera que todos los valores horarios de temperatura por debajo de 0°C o mayores de 30°C se consideran como cero) (Holdridge, 1996; Saborío, 1983, Tosi *et al.*, 1992), ya que todas las plantas tropicales y algunos animales son fisiológicamente inactivos fuera de ese rango, pues no son capaces de sobrevivir con el correspondiente estrés por calor o frío que eso provoca (Tosi *et al.*, 1992).

Independientemente de las características de los parámetros principales en la determinación de la escurrimiento, como lo son: la precipitación y la evapotranspiración, el escurrimiento de una cuenca depende de las siguientes características fisiográficas: área de drenaje, la pendiente, la elevación; y de características físicas como la cubierta, su uso, el tipo, las condiciones de permeabilidad y la capacidad de almacenamiento superficial del suelo (Rodríguez y Saborío, 1987).

Este modelo se ha probado en la cuenca superior y media del río Reventazón, donde más del 50% de la superficie ha sido alterada o intervenida por el hombre. Esta metodología resultó muy conveniente en los estudios preliminares de aprovechamiento hidráulico, especialmente en regiones carentes de información hidrológica completa; el error que se cometió al calcular el escurrimiento de esta cuenca fue menor del 10%, lo que representa un grado de exactitud aceptable (Rodríguez y Saborío, 1987).

Como puede observarse, los modelos son muy útiles para predecir regularidad en el ciclo hidrológico y calidad del agua en las cuencas, lo que es muy importante para la generación de energía en plantas hidroeléctricas.

2.6 Hidroelectricidad

Energía hidroeléctrica es la energía producida por una turbina hidráulica usando el agua que fluye desde una alta o baja elevación. La energía se mide usualmente en múltiplos de vatios-horas. Se pueden definir tres clases de energía (Villalta, 1996):

- a) Promedio anual de energía: es la estimación de la energía que se puede generar en un año por el proyecto.
- b) Energía secundaria: es aquella que existe en exceso de la energía firme.
- c) Potencial eléctrico.

Las plantas hidroeléctricas se dividen generalmente en plantas de carga baja, carga media y carga alta.

Es importante que se resalte la importancia de la cobertura vegetal alrededor de una cuenca, sobre todo si en ella existen proyectos hidroeléctricos, lo que puede contribuir a disminuir algunos costos con respecto a los embalses. Debido a esto se considera relevante mencionar algunas formas de valorar económicamente los beneficios que el bosque provee.

2.7 Valoración económica de recursos naturales

Valorar económicamente significa poder contar con un indicador de la importancia que tiene un recurso en el bienestar de la sociedad, que permita compararlo con otros componentes del mismo. Para ello se utiliza un denominador común, el dinero. Para la valoración ambiental es necesario hacer una pregunta: ¿qué tipo de valor debe dársele?. La respuesta puede obtenerse separando los valores de uso, de los valores de no-uso. Los valores de uso se refieren a que las personas utilizan el bien y son afectadas por cualquier cambio que ocurra con respecto al mismo. Los valores de no-uso entre los mencionados más comúnmente se tiene: valor de opción y de existencia (Azqueta, 1994).

Un número preciso, es difícil de predecir, y no pueden ser tomados de datos existentes, lo que limita cualquier estudio sobre esto (Tosi *et al.*, 1992).

Se necesita establecer la importancia de los beneficios que puedan prestar los recursos naturales para que estos puedan ser valorados. El bosque, como recurso natural, representa generación de beneficios directos e indirectos, que contribuye a determinar su importancia.

Para un mejor entendimiento de lo anterior, es necesario exponer algunos conceptos que más adelante serán de mucha utilidad, tales como

- a) Análisis Beneficio Costo: es una relación que compara los beneficios descontados con los costos descontados. Si esta relación es exactamente igual a 1, el proyecto producirá cero beneficios netos a través del tiempo de vida del proyecto. Una relación beneficio/costo menor a 1, significa que el proyecto genera pérdidas desde una perspectiva económica (Dixon *et al*, 1996)
- b) Valor presente neto: descuenta los beneficios y los costos a través del tiempo en punto común en el tiempo para comparación (Hufschmidt y Hyman, 1982)
- c) Costo de oportunidad: se basa en el resultado que se obtiene cuando el capital es invertido en un proyecto que parece ser mejor que otro, o invertido en un proyecto particular del gobierno en lugar de uno del sector privado. En este sentido el costo de oportunidad esta relacionado con la productividad de capital. Si lo enfocamos hacia los recursos naturales, este concepto se basa en el uso de los recursos con propósitos de no mercado. Además puede ser visto como el costo de preservación (Barton, 1994; Dixon *et al*, 1996).

2.7.1 Valoración económica del bosque

Como se mencionó anteriormente, el bosque genera, simultáneamente, beneficios directos e indirectos, productos físicos y efectos, respectivamente. Los beneficios directos de un bosque son los productos físicos que pueden ser obtenidos y a los cuales se les atribuyen valores financieros, es decir, cuanto vale el bosque en un determinado momento (Hosokawa y López, 1995, Solórzano *et al.*, 1991).

Entre los bienes (llamados beneficios directos) se tiene productos manufacturados de madera. Además, los bosques pueden proveer cantidades substanciales de biomasa para producción de energía. También se puede convertir los restos de biomasa a metanol, lo que brinda una alternativa de combustible para el transporte público y privado (Tosi *et al.*, 1992).

Entre los servicios tenemos, en términos generales, (llamados también beneficios indirectos del bosque) control de inundaciones, suplemento estable y de alta calidad de agua, hábitats para la vida silvestre y la conservación de la biodiversidad, control de la erosión, recarga de recursos hídricos, fijación y almacenamiento de Carbono, turismo y educación. Además, efectos como la concentración de gas carbónico, lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, agotamiento de los recursos energéticos, y disminución de la biodiversidad; dependen de la presencia y actividad fisiológica del ecosistema forestal (Tosi *et al.*, 1992).

La valoración económica de los beneficios indirectos representa la verificación de cuánto valen los efectos producidos por el bosque (Hosokawa y López, 1995).

En los bosques tropicales se da una relación directa entre la cobertura boscosa y los caudales de agua: a mayor cobertura en bosque, mayores caudales. En este sentido es conveniente un proceso de conservación, protección y recuperación de cuencas. Por eso, la conservación de los ecosistemas boscosos y la recuperación de cuencas deterioradas tienen dos impactos importantes en relación con el agua. Por un lado protege los suelos de la erosión atenuando la cantidad de sedimentos que se depositaría en los estanques; y por el otro, regulando el volumen de los caudales. Con base en esto y considerando el enfoque económico, la administración sostenible de una cuenca implica incurrir en costos directos e indirectos. Los primeros abarcan la protección y vigilancia, y los costos indirectos se relacionan, principalmente, con la renuncia que se hace a aprovechar o mejorar el área boscosa con una actividad productiva que genere ingresos monetarios. Es decir, el costo de oportunidad por mantener el ecosistema protector, renunciando a los ingresos potenciales derivados del aprovechamiento forestal y de otras actividades productivas que puedan obtenerse en el área (Barrantes y Castro, 1998b).

Si se considera el supuesto de que parte del valor de la productividad de los bosques corresponde al servicio hídrico y parte a la producción de otros bienes y servicios, y a la vez se identifica que el flujo de ingresos del bosque está conformado por la cantidad y calidad del agua que genera en presencia de mercado, entonces se podría dar un "valor" a la captación del agua. El hecho de usar el bosque, se debe a su importancia económica desde el punto de vista de la utilización del agua. Suponiendo que el valor del bosque está mayormente asociado a la producción de agua, el potencial de captación y retención de agua en diversas cuencas del país, estaría determinado por la presencia de áreas boscosas (Barrantes y Castro, 1998a).

2.7.2 Valoración económica e importancia del agua

El agua es un bien limitado y cada vez más costoso de obtener. Las recientes manifestaciones climáticas extremas, ponen de manifiesto la fragilidad de las bases naturales sobre las que se sustenta la planificación hidrológica. Esto incluye el deterioro de cuencas por lo cual es necesario recurrir a la ampliación de la red de abastecimiento de agua para seguir operando en los niveles iniciales. Cada vez que hay un desplazamiento hacia otras cuencas, se incrementan las inversiones para tratar un mismo volumen de agua. Este incremento en los costos totales

implica un aumento en los costos medios de operación (para tratar el mismo volumen de agua inicial). Es decir, hay un incremento en los costos que asume la población abastecida debido a que la demanda por agua es casi fija a cualquier precio (Barrantes y Castro, 1998b).

Cuando el agua que se desea utilizar no se recibe en las condiciones adecuadas, implica un costo de transformación que puede ser estimado. El costo a la economía es el valor de la producción que no se puede llevar a cabo. Mientras más valiosa es la actividad que no se puede realizar, más valiosa es el agua en términos del valor de la producción perdida y como tal (Turcios, 1995).

El método de valoración más usado en países como Costa Rica es el método financiero, para el cálculo de tarifas de servicios públicos y específico del agua. Esta propuesta metodológica establece que la estructura tarifaria justa es aquella en la que los precios autorizados equivalen a las necesidades de ingresos que son iguales a los costos (que incluyen los gastos de operación, de mantenimiento, de depreciación, administrativos y generales y la amortización por reevaluación de activos), más la rentabilidad establecida. Lo deseable de esta metodología es que se logre incluir los costos y beneficios ambientales, teniendo como unidad de planificación o de regulación la cuenca hidrográfica (Marozzi, 1996).

El agua se ha convertido en uno de los elementos naturales de mayor importancia en las investigaciones en todos los campos. Debido a esto se dan algunos problemas relacionados con las necesidades de agua, que pueden clasificarse de un modo muy general, en tres grupos (Martín, 1973):

- 1) La escasez,
- 2) El régimen de propiedad, y
- 3) La contaminación.

Aguirre (1995, citado por Salgado, 1996), agrega además el deterioro y contaminación física en términos de su potabilidad, los cuales se ven agravados por los rápidos crecimientos poblacionales. Por tanto, conforme a lo anterior y según Serrano (1990), existe el valor económico del agua como recurso, debido a su escasez y a la disponibilidad a pagar que demuestran los usuarios.

La valoración del agua se puede enfocar, al seguir patrones en función del método de costos inducidos y el de costo de oportunidad, siempre que se pueda medir la capacidad que tiene un determinado ecosistema para generar o producir agua en términos económicos (Aguirre, 1995;

citado por Salgado, 1996). Por esto la importancia del bosque como un ecosistema regulador de agua al considerar una presa hidroeléctrica, y no debe olvidarse que una construcción de este tipo cambia el comportamiento de un ecosistema, especialmente en la cuenca del río que se utiliza. Un incremento en la erosión puede darse, por lo tanto resultará una sedimentación en la cuenca baja como un nuevo reservorio, los nutrientes son arrastrados y se reduce el oxígeno disuelto que afecta a la vida acuática (Dixon, *et al*; 1996).

Hoy se hace absolutamente imprescindible la valoración adecuada de un recurso cada vez más escaso, de cuya sostenibilidad depende la vida en el planeta. Debe realizarse una valoración integral que dé cuenta de este recurso en las cuentas de una nación como riqueza existente y real, también que tome en cuenta como unidad de regulación la cuenca hidrográfica (Marozzi, 1996)

2.8 Sistema de Pago por Servicios Ambientales.

Los servicios ambientales, en términos generales, son aquellos beneficios recibidos por los seres humanos que se derivan directa o indirectamente de diferentes elementos de la naturaleza. La compensación por estos servicios es un concepto bastante nuevo, que ha requerido del establecimiento de su valor, y que surge como un cobro por políticas de mitigación del daño ambiental causado por las actividades económicas ordinarias (Vega *et al.*, 1998).

Debe hacerse una distinción entre los conceptos de servicios ambientales y el de mitigación del daño ambiental. Los primeros son aquellos derivados naturalmente de los bosques y plantaciones forestales que inciden directamente en la protección y mejoramiento del medio ambiente, mientras que las segundas son las acciones conscientes realizadas por el ser humano tendientes a minimizar el daño al ambiente que resulta de la actividad de producción de bienes y servicios.

Se ha reconocido, (en las leyes de Costa Rica) los siguientes servicios ambientales que prestan los bosques:

- Conservación de belleza escénica.
- Fijación de carbono.
- Protección de los recursos hídricos.

- Conservación de la Biodiversidad.

2.8.1 Sistema integral de servicios ambientales

A partir de la Ley Forestal 7575 se ha iniciado en Costa Rica el desarrollo conceptual e institucional del pago de servicios ambientales. Estos, por sus características, están estrechamente vinculados que resulta imposible separarlos. En el caso del bosque, pocas veces puede referirse a un solo servicio de los mencionados anteriormente.

La Comisión de Servicios Ambientales del Proceso de Concertación Nacional de Costa Rica determinó que se requiere de un sistema de retribución o compensación por servicios ambientales que incluya cinco principales componentes (Vega *et al.*, 1998):

- 1- Se propone el diseño de un sistema que permita valorar y retribuir, en forma integral, los diferentes servicios ambientales, tanto los cuatro actualmente reconocidos como aquellos nuevos que, como consecuencia de los procesos de valoración económica y social, se vayan incorporando.
- 2- El reconocimiento y estudio constante para definir los servicios ambientales que podrían ser sujetos de pago.
- 3- El desarrollo institucional adecuado para la ejecución del programa.
- 4- La determinación de las actividades que se deben compensar o pagar por los servicios ambientales desarrollados.
- 5- El sistema debe garantizar la efectiva prestación de servicios ambientales a la sociedad. En tal sentido, parte integral del mismo debe consistir en la utilización de esquemas de certificación de carácter nacional e internacional. De esa manera, mejoraría la calidad de los servicios y la eficiencia en el control y monitoreo de los proyectos.

2.8.1.1 Protección de los recursos hídricos

Uno de los servicios ambientales que brinda el bosque, en términos de protección de los recursos hídricos, es mantener los niveles de cantidad y calidad del agua y en la reducción de sedimentos. La intervención sobre un bosque, tiene diferentes niveles de impacto sobre el ciclo hidrológico, los cuales se han expuesto extensamente con anterioridad.

En Costa Rica es especialmente trascendente este recurso por la composición de la producción energética, que en un alto porcentaje está constituida por producción hidroeléctrica (Vega *et al.*, 1998)

El precio que tradicionalmente se ha asignado al servicio de agua, siempre se ha relacionado con el costo de dar el servicio. Nunca se ha pensado en el hecho de que el agua es un recurso limitado para una población creciente. La valoración económica ecológica del agua mediante una tarifa, debe necesariamente incorporar el valor de captación del agua, los costos de conservación y protección de cuencas.

2.8.2 Convenio Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro-FUNDECOR

El proyecto Hidroeléctrico Don Pedro, pertenece a la Compañía Energía Global de Costa Rica, el cual ha hecho un acuerdo con FUNDECOR, con el fin de mantener la mayor parte del bosque presente alrededor de la cuenca del Río San Fernando (lugar de localización del proyecto). Esto se está logrando gracias a los contratos de Pago por Servicios Ambientales.

Previo a la firma de este contrato, FUNDECOR analiza las zonas prioritarias para conservación o manejo. Para esto ha levantado mapas de uso de la tierra desde 1986 hasta 1996. Con los cuales ha podido también elaborar el cambio en el uso de la tierra y la deforestación esperada para 1998 (Anexos 3-8).

Funcionarios de FUNDECOR visitan a los propietarios de las fincas e identifica interesados y potenciales convenistas (P. González. FUNDECOR, 1999. Com. Pers).

Luego debe levantarse la información legal de la propiedad, si no es propietario legal, el finquero no puede entrar al convenio. Sin embargo, se le dan las facilidades para que pueda obtener las escrituras, lo que resulta en un proceso largo.

También es importante el levantamiento del mapa topográfico de la finca, para poder incorporar el área exacta al convenio.

Al tener todos los requisitos cumplidos, el propietario establece el área y el tipo de contrato que desea, ya sea convenio por protección de bosque, convenio por manejo de bosque o convenio por reforestación de área.

Los montos a pagar en un lapso de cinco años son los siguientes:

- Convenio por Protección de bosque: 65000 colones ha⁻¹, distribuidos en pagos de 20% cada año.
- Convenio por Manejo de bosque: 94000 colones ha⁻¹, un 50% en el primer año, 20% el segundo y los siguientes tres 10% respectivamente.
- Convenio por Reforestación: 154000 colones ha⁻¹, un 50 % en el primer año, 20% el segundo año, 15% el tercero, 10% el cuarto y 5% el quinto año.

Después de la firma del convenio entre FUNDECOR y el finquero, FONAFIFO desembolsa la primera cuota. Después de este desembolso, el proyecto Energía Global retribuye a FONAFIFO US\$10.00 ha⁻¹año de cada finca que FUNDECOR incorpora definitivamente, independiente del tipo de convenio que el finquero firme. Esto con el fin de mantener al mínimo los impactos sobre el ciclo hidrológico en la cuenca del Río San Fernando.

Bajo este procedimiento ya existen varias fincas incluidas en el pago por servicios ambientales en esta cuenca (Anexo 9).

III. Materiales y métodos

3.1 Descripción geográfica y física de la zona de estudio

El Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC) abarca una extensión de unas 594.500 ha, con tierras tanto en la Vertiente Pacífica como en la Caribe. El área del estudio presenta un rango altitudinal desde 20 m.s.n.m. en las llanuras, hasta mas de 2383 m en los volcanes; nueve “edificios” volcánicos que constituyen los principales rasgos fisiográficos del paisaje y una topografía abrupta y quebrada. A esta zona pertenece la cuenca del río San Fernando.

La cuenca se ubica mayoritariamente en la provincia de Heredia, con desembocadura en la provincia de Alajuela. Su ubicación geográfica esta dada por el cuadrante formado por las coordenadas Lambert Costa Rica Norte 517000, 239000 y 526000, 251000 (Oreamuno y Jaubert, 1992).

3.1.1 Características de la cuenca

La cuenca del Río San Fernando tiene forma rectangular, bastante alargada, su orientación es sureste a noroeste, de acuerdo a su eje longitudinal mayor. Su máxima elevación es 2381 m.s.n.m. que corresponde a un cerro a dos kilómetros hacia el noroeste del Cerro Gongolona, aproximadamente (Oreamuno y Jaubert, 1992).

3.1.2 Morfología de la cuenca

La cuenca tiene un área de 23.77 km² y un perímetro de 27.05 kilómetros, datos obtenidos de la hoja cartográfica Poás en escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (Oreamuno y Jaubert, 1992).

El cañón del Río San Fernando se caracteriza por pendientes fuertes en sus márgenes, que se encuentran cubiertas por bosque.

El cuadro 1 presenta la distribución del uso actual de las tierras de la cuenca del Río San Fernando.

3.2 Clima del ACCVC

Para la cuenca del Río San Fernando, se cuenta con la información de dos estaciones climatológicas tipo A: la estación de Río Los Angeles de Cariblanco y la estación Volcán Poás y dos tipo C (solo con pluviógrafo): Isla Bonita y Vara Blanca. También cuenta con

información de la estación medidora de caudales, Estación 12-02 Cariblanco, que se encuentra sobre el Río Sarapiquí.

El Cuadro 2 presenta datos obtenidos para los elementos meteorológicos tomados para poder obtener la caracterización del clima de la zona.

Cuadro 1. Distribución del uso actual de las tierras de la cuenca del Río San Fernando

Uso actual	Área (Ha)	Porcentaje
Bosque Primario	2023	85.11
Bosque Intervenido	53	2.23
Pasto con árboles	57	2.40
Cultivos y/o Pastos	161	6.77
Charral	0	0.00
Suelo Desnudo	22	0.92
Agua	5	0.21
Recuperación/Reforestación	48	2.02
Otros usos	8	0.34
Total	2377	100

Fuente: Oficina de Planificación y Evaluación, FUNDECOR, 1998.

Cuadro 2. Temperatura promedio (°C), humedad relativa (%), brillo solar (h) y precipitación (mm), para el área alrededor de la cuenca San Fernando

Temperatura promedio anual	17.5-25°C. Máx 25-30°C Mín 17-22°C
Humedad Relativa	entre 90 y 94%
Brillo Solar	3-5 horas diarias
Precipitación	promedio anual es de 4500 mm Meses más secos de enero a marzo y los más lluviosos de agosto a septiembre.

Fuente: Barrantes, J.; Liao, A.; Rosales, A. 1985. Atlas climatológico de Costa Rica. Preparado por la unidad de Estudios Especiales con el auspicio del IMN y el Proyecto MAG-CORENA. San José, Costa Rica.

3.3 Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro

3.3.1 Ubicación

Parte del proyecto se ubica en las estribaciones de la Cordillera Volcánica Central hacia el Caribe (Anexod 1), que se extienden gradualmente hasta la curva de nivel de los 500 m.s.n.m., donde precipitan con fuerte pendiente hacia las tierras bajas.

El proyecto hidroeléctrico Don Pedro 2-XI utiliza la cuenca intermedia del Río San Fernando, en San Miguel, Distrito 14, Provincias de Heredia y Alajuela.

La altura de las obras del proyecto es la siguiente (Oreamuno y Jaubert, 1992):

- a) Una represa a una elevación aproximada de 845 m.s.n.m.,
- b) Un canal de conducción
- c) Un embalse a una elevación de 831 m.s.n.m.
- d) Una tubería de presión; tiene una antecámara en su inicio.
- e) Una casa de máquinas a 408.6 m.s.n.m.
- f) Un canal de desfogue que vierte las aguas en el Río Volcán. El proyecto hidroeléctrico Don Pedro 2-XI en el Río San Fernando está asociado al proyecto hidroeléctrico Volcán 3-XI y comparte con éste la subestación
- g) Un camino de acceso al sitio de presa (660 m hacia el sur a partir del puente sobre el río) y otro camino de acceso al sitio de la casa de máquinas (800 m de longitud).
- h) Una subestación localizada a 40 m de la casa de máquinas, en donde se instalarán los transformadores y los sistemas de seguridad y control. Esta subestación sirve también a proyecto Volcán 3-XI.

3.3.2 Entorno del Proyecto

Las poblaciones más importantes localizadas alrededor del proyecto son Isla Pamilera, que es una población formada por algunas casas dispersas; Cinchona, Isla Bonita y el pueblo de Cariblanco hacia el noreste, son poblados pequeños, localizados un poco más lejos; en el área cercana se encuentra la Colonia Virgen del Socorro.

3.3.3 Clima del ambiente terrestre de la cuenca

De acuerdo con el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, la zona corresponde a Bosque Pluvial Premontano y una pequeña parte a Bosque muy Húmedo.

La precipitación promedio anual es de 5500-6000 mm (ICE) y la temperatura promedio de 22 a 24°C.

3.4 Métodos

El estudio consta de cuatro etapas:

En la primera etapa se escogió como modelo a utilizar el de Precipitación-Escorrentía que es apropiado para aplicar en cuencas con poca información disponible como es el caso de la cuenca del Río San Fernando.

Una vez escogido el modelo se calibró con datos tomados de la cuenca del río Sarapiquí, y luego extrapolados para estimar los datos de la cuenca en estudio.

Con la ayuda de mapas de uso de la tierra y cobertura del suelo, así como de pendientes se caracterizó la cuenca, usando Sistemas de Información Geográfica (específicamente los programas ArcView e Idrisi).

La segunda etapa consiste en aplicación del modelo de Precipitación-Escorrentía con diferentes escenarios en cuanto al uso de la tierra

En la tercera etapa se aplicó un análisis Beneficio Costo Extendido, que involucra los costos de mitigación (pérdida por paro de actividades por la irregularidad del ciclo hidrológico).

Una cuarta etapa condujo a señalar la necesidad del pago del servicio ambiental de mantener la recarga hídrica en la cuenca, entre el proyecto hidroeléctrico y FONAFIFO.

3.4.1 Modelo hidrológico

3.4.1.1 Obtención de información

Se requirió de información de precipitación mensual y anual en las estaciones cercanas al proyecto, así como de caudales promedios del río Sarapiquí para poder calibrar el modelo; por lo que se solicitó dicha información al Instituto Costarricense de Electricidad (Anexo 2)

En el Cuadro 3 se lista las 12 estaciones que se han utilizado para el estudio con sus respectivos períodos de registro, tomando años hidrológicos completos).

Con esta información se hizo curvas de doble masa para poder correlacionar directamente las estaciones con menos registros con la estación La Marina, que es la de mayor cantidad de años de registros, a pesar que está un poco lejos de la zona de estudio (S. Velásquez. CATIE, 1999. Com. Pers.)

Con esta estación se calibró la estación Vara Blanca, que esta más cerca, la que a su vez sirvió para calibrar las otras estaciones cercanas a la zona de interés.

Se hizo, después una regresión lineal para estimar los datos que hacia falta en las otras estaciones, para obtener un período de aproximadamente 20 años en registros (1978-1997), que se consideró adecuado de acuerdo a la cantidad de información disponible.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca de los ríos Sarapiquí y San Fernando, utilizadas en este estudio.

Estación	Período	Elevación m.s.n.m	Ubicación		Precipitación Promedio
			Latitud Norte	Longitud Oeste	
Alto Palomo	1985-1996	1980	10 11	84 19	2927.7 mm
Bajos del Toro	1985-1997	1540	10 13	84 18	3194.6 mm
Col los Angeles	1982-1997	920	10 17	84 12	5431.2 mm
Isla Bonita	1979-1997	1120	10 14	84 10	4495.0 mm
La Marina	1960-1997	380	10 22	84 23	3555.8 mm
La Montura	1984-1997	1000	10 07	83 58	7068.3 mm
Picada Palmira	1985-1997	2080	10 12	84 21	2657.0 mm
Vara Blanca	1960-1997	1804	10 10	84 09	3582.3 mm
Volcán Poás	1978-1997	2564	10 11	84 14	3644.1 mm
Zurquí	1989-1997	1500	10 04	84 01	6339.8 mm

Los valores de Caudal promedio para las estaciones Puerto Viejo y Cariblanco fueron de 115 m³ y 9.16 m³ respectivamente.

3.4.1.2 Aplicación del modelo de Precipitación-Escorrentía

Sobre este modelo ya se ha hablado anteriormente en la revisión bibliográfica. Su metodología está orientada a proveer los valores de escurrimiento promedio de una cuenca con datos insuficientes (Saborío, 1983). Se basa en las explicaciones del movimiento del agua en asociaciones climáticas. Resume el cálculo de la escorrentía con base en la precipitación y la evapotranspiración, tomando como factores fisiográficos: la elevación y factores de corrección basados en la zona de vida y por la condensación foliar que se produce en cada zona, así como al considerar la cubierta del suelo, pero tan sólo desde el punto de vista de deforestación o remoción del bosque primario en la zona (Rodríguez y Saborío, 1987).

La ecuación del balance hídrico de una cuenca, se expresa generalmente con la siguiente fórmula (Saborío, 1983):

$$ESC = PPT - EVT_R - (S1 - S2) \quad (1)$$

En donde:

ESC = volumen de escorrentía en el período

PPT = precipitación media

EVT_R = evapotranspiración real

(S1-S2) = cambio en el volumen de almacenamiento.

Cuando el período de tiempo es suficientemente largo, como para que los términos sean representativos de las condiciones promedio entonces (S1-S2) tiende a cero y la ecuación se reduce a:

$$ESC = PPT - EVT_R \quad (2)$$

Lo que permite calcular la escorrentía promedio anual en una cuenca, a partir de los valores promedio de la lluvia y evapotranspiración sobre toda el área.

Se hizo una base de datos con las coordenadas de cada estación y sus respectivos promedios de precipitación, para poder hacer una interpolación, con la ayuda de Idrisi, y obtener datos de precipitación promedio en zonas donde no hay estaciones meteorológicas, ya que es el principal problema de la zona en la que se encuentra la cuenca del Río San Fernando.

Para obtener la escorrentía se generó primero, un mapa conteniendo la elevación media de la cuenca del Río Sarapiquí, luego se colocó sobre él los puntos con las diferentes estaciones meteorológicas y sus respectivos promedios de precipitación, así como el mapa de zonas de vida del área. Con estos datos se hizo una interpolación en Idrisi, con el método del cuadrado inverso de la distancia para obtener el mapa de precipitación de la zona.

Se generó diferentes mapas de acuerdo a las necesidades del modelo para predecir escorrentía, que después de diferentes sustituciones se obtiene lo siguiente:

$$ESC = PPT - EVT_R$$

$$EVT_R = EVT_P * F \quad (3)$$

Donde F es la función de evapotranspiración de la zona.

EVT_P para bosques tropicales, se representa con los siguientes valores:

$$EVT_P = 1624.0 - 0.265 * PPT - 0.324 * E \quad (4)$$

Donde E es la elevación Media de la zona.

Pero F es función de la relación entre la evapotranspiración potencial y la precipitación.

Para mejorar la función de evapotranspiración se calcula esta como función de la relación de evapotranspiración, con lo que se tiene:

$$F = 1,097829 - 0,4031544 * RE \quad (5)$$

Donde:

$$RE = EVT_P/PPT \quad (6)$$

resultando un valor adimensional

Para una relación entre 0,45 y 1,50 y

$$F = 0.1651143 + 6.620093 * RE - 20.30583 * RE^2 + 21.36971 * RE^3 \quad (7)$$

Para una relación entre 0.0625 y 0.45

Para uniformizar el criterio, se usa una función para toda la curva, ajustada a un polinomio de grado 9, así:

$$F = 0.6014195 + (9.673252 * RE) - (51.44132 * RE^2) + (166.4399 * RE^3) - (342.0647 * RE^4) + (444.0608 * RE^5) - (360.5417 * RE^6) + (176.79 * RE^7) - (47.72739 * RE^8) + (5.433659 * RE^9) \quad (8)$$

Con el objetivo de verificar los resultados del modelo se ha escogido la cuenca del Río Sarapiquí que se encuentra adyacente a la cuenca del Río San Fernando; donde la RE se encuentra en el rango entre 0.0625 y 0.45, por lo que se usó la ecuación de F para esa zona de la curva.

De acuerdo a esto se obtiene el siguiente modelo:

$$ESC = PPT - (1624 - 0.265 * PPT - 0.324 * E) * (0.1651143 + 6.620093 * RE - 20.30583 * RE^2 + 21.36971 * RE^3) \quad (9)$$

El cual se introdujo en el calculador de imágenes de Idrisi, luego se aplicó los factores de corrección.

Factores de Corrección

Se tienen dos factores de corrección para la escorrentía:

1. Factor para la evapotranspiración real debido a la cubierta vegetal
2. Factor para la precipitación dependiendo de las zonas de vida.

Factor para la evapotranspiración real.

En vista de que a mayor vegetación hay más evapotranspiración, se puede decir que en zonas con poca cubierta vegetal primaria (deforestadas), la evapotranspiración es menor, lo que se traduce en una mayor escorrentía. De esta forma la ecuación inicial se puede expresar como:

$$ESC = PPT - FK * EVT_R \quad (10)$$

Donde:

FK = factor de corrección por vegetación, valor entre 0.80 y 1.00, aplicado sólo si la zona presenta deforestación.

Factor para la precipitación

Se tiene evidencia de que en los bosques muy húmedos y en los bosques pluviales, tanto montano bajo como premontano y tropical, el efecto de la precipitación sobre la escorrentía se ve amortiguado por la densa cubierta vegetal, además de esto, al haber más humedad el mantillo vegetal tiende a provocar mayor infiltración y una mayor capacidad de almacenamiento superficial, lo que disminuye la escorrentía superficial (Rodríguez y Saborío, 1987). Por lo que se debe aplicar el factor de corrección y la ecuación pasa a ser:

$$ESC = FP * PPT - FK * EVT_R \quad (11)$$

FP = factor de corrección para precipitación, todos los otros términos ya fueron definidos.

Curvas de Corrección.

Debido a que el cálculo de la escorrentía se hizo con base en los promedios, se debe ajustar estos valores con curvas de corrección de escorrentía tomando los factores descritos anteriormente. Estas curvas dependen del porcentaje de área intervenida o removida de bosque. Del porcentaje de área bajo zona de Bosque Pluvial y del porcentaje de área bajo zona de bosque muy húmedo). Estas curvas fueron hechas por el Ing. Saborío para el Departamento de Estudios Especiales del Instituto Costarricense de Electricidad (Anexo 10).

Así, se tiene la elevación y la precipitación media sobre la cuenca, se obtuvo la escorrentía media a través de las ecuaciones. Luego, del mapa topográfico y del mapa de zonas de vida se obtuvo una aproximación de los diferentes porcentajes de zonas deforestadas, de Bosque Pluvial y Bosque muy Húmedo. Luego, se utilizó las curvas de corrección para obtener los porcentajes de aumento de escorrentía.

Por lo que:

P1 = porcentaje de aumento debido a remoción de bosque primario.

P2 = porcentaje de aumento debido a bosque pluvial.

P3 = porcentaje de aumento debido a bosque muy húmedo.

El porcentaje total de aumento es:

$$PT = P1 + P2 + P3 \quad (12)$$

Y la escorrentía corregida se obtiene de:

$$ESC^* = (1 + PT/100) ESC. \quad (13)$$

La cuenca del Río San Fernando presenta el 10% del área deforestada, el 8% dentro de la zona de vida de Bosque muy Húmedo Tropical, y el resto dentro de la zona de vida de Bosque Pluvial Premontano.

Con estos datos se obtuvo los factores de corrección para la escorrentía en las curvas.

Se modificó el FK, para simular una deforestación en la cuenca del 25, 50 y 75% y se realizó el mismo procedimiento para los diferentes escenarios.

Distribución mensual de escorrentía

Se considera muy importante para el estudio la variación de escorrentía a lo largo del año hidrológico. Así, del análisis de los registros de escorrentía promedio mensual de varias estaciones fluviográficas del ICE, se puede estudiar su distribución. Esta escorrentía promedio mensual se ha expresado como porcentaje de la escorrentía promedio anual de los ríos escogidos y luego se gráfica con los valores, agrupando y dibujando los trazos de acuerdo a los regímenes de climáticos más sobresalientes; esto condujo a distinguir seis regiones en el país, cuyas características climáticas son similares, por lo que la distribución mensual de escorrentía en los ríos de cada región es muy parecida, lo que permitió asignar a cada región una distribución única, obtenida del promedio de todas las distribuciones de los fluvigramas dentro de la región. Los valores correspondientes a cada mes se muestran en el Cuadro 4

Cuadro 4. Escorrentía promedio mensual como porcentaje de la escorrentía promedio anual

Meses	Valle Central	Pacífico Sur (húmedo)	Pacífico medio	Pacífico norte (seco)	Vertiente Atlántica	Vertiente Norte
Enero	5.5	3.3	3.6	6.0	6.5	8.0
Febrero	4.0	2.0	2.0	3.8	4.3	5.8
Marzo	3.8	1.7	1.8	3.2	3.5	4.0
Abril	3.9	2.2	2.3	2.8	4.2	4.2
Mayo	5.2	6.2	6.1	3.8	7.8	4.9
Junio	7.6	9.2	10.3	7.8	9.6	6.9
Julio	7.8	8.0	9.0	7.0	9.7	9.6
Agosto	9.0	10.9	11.0	8.5	10.6	9.9
Septiembre	14.0	15.6	16.0	18.3	10.7	9.4
Octubre	17.9	20.7	20.3	18.7	12.0	10.2
Noviembre	12.9	14.2	12.1	11.6	11.0	13.1
Diciembre	8.4	6.0	5.5	8.5	10.1	14.0
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Ámbito de Escorrentía En mm	1300 A 2000	2200 A 2400	1600 A 4600	900 A 1900	2100 A 5300	3200 A 5300

Se utilizó esta tabla para obtener los porcentajes de escorrentía promedio mensual con los datos de la vertiente norte, zona de ubicación del proyecto.

Con el objetivo de obtener valores lo más reales posibles de Evapotranspiración potencial, se utilizó el método de Thornwaite que se basa en el conocimiento de la temperatura media del aire (F. Jiménez. CATIE, 1999. Com. Pers.). Este método utiliza la siguiente fórmula:

$$ET_n = 1.6[(10T/I)]^a \quad (14)$$

Donde ET_n es la evapotranspiración (cm mes^{-1}) sin ajustar; T es la temperatura media del aire ($^{\circ}\text{C}$); I es la sumatoria de i para los 12 meses; i es un índice mensual de calor obtenido mediante la ecuación 15.

$$I = (T/5)^{1.514} \quad (15)$$

$$a = 0.000000675 I^3 - 0.000077 I^2 + 0.0179 I + 0.49232 \quad (16)$$

Los valores ET_n así encontrados son válidos para meses de 30 días, con 12 horas de fotoperíodo cada día, por lo que es necesario corregirlos de acuerdo al número de horas de fotoperíodo de cada lugar y el número de días del mes, como se indica en la ecuación 17.

$$ET_o = ET_n(d/30)(n/12) \quad (17)$$

Donde ET_o es la evapotranspiración de referencia (mm mes^{-1}); d es la duración del mes correspondiente y n es las horas de fotoperíodo del lugar (latitud). El cálculo de esa fórmula se facilita usando tablas o monogramas especiales que han sido preparados para tal fin (Jiménez, 1999).

Al obtener la ET_n puede obtenerse la EVT_f en el modelo y así obtener la esorrentía mensual.

3.4.2 Método para la valoración económica

3.4.2.1 Obtención de la información

Se contactó con la empresa "Energía Global de Costa Rica", propietarios del proyecto hidroeléctrico Don Pedro en la cuenca del río San Fernando, para obtener los costos incurridos en la elaboración del proyecto, así como los ingresos mensuales desde 1997 a 1999 obtenidos por la venta de electricidad al ICE. Con respecto a los costos totales anuales y mensuales se pudo obtener información correspondiente solamente al año 1999. Otra información adicional se obtuvo de documentos del ICE (Anexo 11).

El proyecto labora las 24 horas del día, durante las cuales tiene que vender energía eléctrica al ICE en horas pico; consideradas estas de 10:00 a.m. - 12:30 p.m. y de 5:30 p.m. - 8:00 p.m. Durante esta jornada el proyecto labora a la máxima capacidad que el caudal del río y el almacenamiento de este le permita. El precio por kw en este tiempo es de 20.97 colones costarricenses (0.07 centavos de dólar). La otra parte del día depende solamente del caudal del río, y el kw en este tiempo tiene un precio de 10.66 colones costarricenses (aproximadamente 0.04 centavos de dólar) (D. Alfaro. Energía Global de Costa Rica, 1999. Com. Pers)

Si el caudal no es suficiente ni siquiera para generar la energía requerida por el ICE en las horas pico, este le aplicaría una penalización por incumplimiento de contrato (J. Benavides, Energía Global de Costa Rica, 1999. Com. Pers).

Por lo tanto se puede establecer que los beneficios del proyecto se ven aumentados si el río le permite trabajar a máxima potencia en la mayor cantidad de tiempo durante el año. Sin embargo esto depende del caudal del río, que a su vez depende de la recarga hídrica de este.

La producción de energía y la producción de beneficios puede explicarse con la gráfica que sigue:

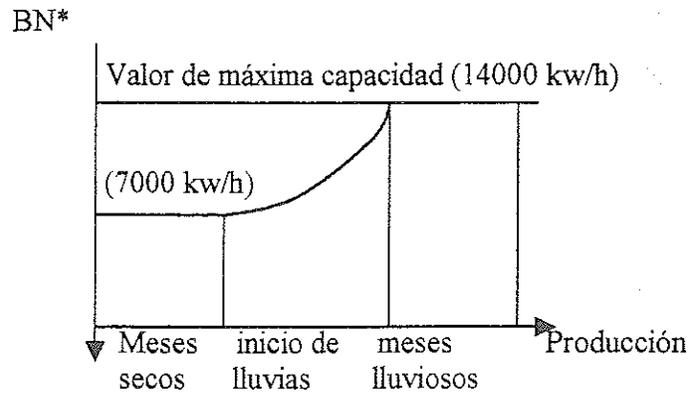


Figura 1. Producción hipotética de electricidad durante un año
 *BN = Beneficio Neto del proyecto.

Debido a los resultados de la primera parte de la investigación y al tiempo de estudio, se vio la necesidad de basarse en el comportamiento esperado en la cuenca que se encuentra en la literatura. Ya que los resultados de disminución de cobertura, se espera puedan observarse a mediano o largo plazo.

Con el fin de caracterizar el comportamiento de la relación beneficio/costo en el proyecto hidroeléctrico, se elaboraron los siguientes escenarios (basados en la producción real de energía del proyecto):

- *Escenario 1B.* Tres horas laboradas a máxima potencia con producción promedio, producción promedio también en las horas restantes durante los meses secos; cinco horas a máxima potencia con producción promedio, producción promedio en las horas restantes durante los meses lluviosos
- *Escenario 2B.* Tres horas laboradas a máxima potencia con producción mínima y producción mínima también en las horas restantes durante los meses secos. Durante los meses lluviosos, cinco horas a máxima potencia con producción promedio y producción promedio también en las horas restantes
- *Escenario 3B.* Tres horas laboradas a máxima potencia con producción mínima y producción mínima también en las horas restantes durante los meses secos. Durante los meses lluviosos, cinco horas a máxima potencia con producción mínima y producción promedio en las horas restantes (Anexos 12-14).

3.4.2.2 Aplicación del método de Beneficio-Costo Extendido.

La investigación aplicó el método de costo de oportunidad para valorar los beneficios relativos de la cobertura boscosa dentro de la cuenca. Para ello, se cuantificó el incremento en producción durante los meses de más lluvia comparados con los meses de menos lluvia.

La investigación considera que la protección de la cobertura y las condiciones climáticas de la zona permiten mantener los niveles de producción durante todo el año.

Sin embargo una reducción de la cobertura podría afectar la producción a mediano plazo o largo, por lo que se ha considerado que en meses menos lluviosos se incurre en una disminución de beneficios. Es decir lo que deja de ganar el proyecto por la disminución de la producción de energía debido a la irregularidad del caudal del Río San Fernando.

IV. Resultados y discusiones

De acuerdo al modelo Precipitación-Escorrentía, utilizado en la investigación, y a los indicadores seleccionados para medir la regularidad del agua en cuencas hidrográficas con potencial para uso hidroeléctrico como precipitación, evapotranspiración, escorrentía y cobertura boscosa; se pudo observar que son suficientes para establecer un balance hídrico anual, no así, para obtenerlo mensualmente.

La interpolación de la precipitación en las estaciones meteorológicas alrededor de la cuenca del río San Fernando, dio como resultado que la relación de evapotranspiración/precipitación nunca sobrepasa el valor de 0.45, con lo que la función de evapotranspiración se mantuvo entre los valores de 0.8 y 0.9. Lo que indica que la cuenca posiblemente no llegue a tener un déficit hídrico. Estos valores generaron una precipitación promedio anual sobre la cuenca de 4312 mm y una escorrentía promedio de 3581mm/año.

El indicador utilizado para evaluar el efecto del uso de la tierra sobre la regularidad del caudal del Río San Fernando en el ACCVC, fue la deforestación. Se realizaron cinco diferentes escenarios variando el porcentaje de cobertura boscosa; con esto se observó la variación de la escorrentía en la medida que se dan los cambios (Cuadro 5, Figura 2).

Los diferentes escenarios que varían de 0 - 100 % de deforestación muestran que la disminución del bosque aumenta la escorrentía, cuyos valores oscilan entre 3619-4130 mm año⁻¹ de acuerdo al escenario. Lo que implica un aumento de 511 mm año⁻¹ si la cuenca se deforestara en su totalidad. Simulando que la cuenca pierde un 25% (escenario 2) de su cobertura total (tomando 0% de deforestación como dato inicial), se produce un aumento en la escorrentía de 38 mm año⁻¹. Si se deforesta un 25% más, es decir llevarla a 50% de cobertura boscosa (escenario 3), la escorrentía aumenta 92 mm año⁻¹. Al deforestar un 75%, la escorrentía se incrementaría 184 mm año⁻¹. La deforestación total elevaría la escorrentía en 197 mm año⁻¹ con respecto al escenario 4 (Figura 2).

Cuadro 5. Valores de escorrentía obtenidos de aplicar el modelo Precipitación-Escorrentía para diferentes escenarios de cobertura boscosa en la cuenca del Río San Fernando.

Escenario	Porcentaje de deforestación	Factor de corrección*	de Valor promedio de escorrentía
1	0% (cobertura total de bosque)	Fk = 0.00	3619 mm
2	25% de deforestación	Fk = 1.1	3657 mm
3	50% de deforestación	Fk= 3.8	3749 mm
4	75% de deforestación	Fk = 9.2	3933 mm
5	100% (deforestación completa)	Fk= 15	4130 mm

*Fk = factor de corrección para el método de precipitación-escorrentía que indica el porcentaje de aumento en la escorrentía debido a la disminución en la cobertura boscosa.

Estos resultados coinciden con los experimentos en el Coweeta Hydrologic Laboratory, en Carolina del Norte, que fueron concluyentes en demostrar que la eliminación de la vegetación resulta en significativos incrementos de caudal (Gutiérrez, 1988).

El mismo autor, señala el importante papel regulador en la escorrentía de la cobertura vegetal, ya que esta es responsable de la disminución de la escorrentía superficial y de la protección contra la erosión. A su vez, también indica que se provoca un cambio en las propiedades de permeabilidad del suelo, lo que causa efectos tales como, mínima infiltración, menor aporte a las aguas subterráneas, una distribución muy irregular del flujo de la corriente en el tiempo, con valores máximos más altos y valores mínimos más bajos, que afectaría directamente la producción de energía eléctrica en el proyecto.

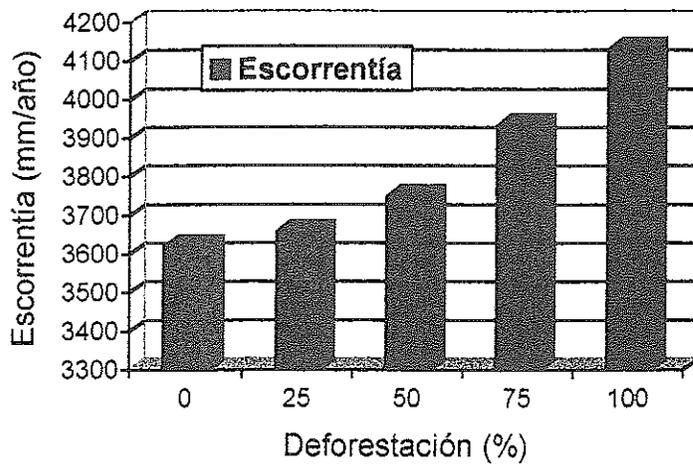


Figura 2. Efecto de la deforestación en la cuenca sobre la escorrentía.

Con la aplicación del modelo de Precipitación-Escorrentía para generar datos mensuales de escorrentía, se obtuvo relaciones de evapotranspiración/precipitación mayores de cuatro; estos resultados son superiores a los valores reales, que no deberían sobrepasar de 1.5 mm (Rodríguez y Saborío 1987). Por ende, el resto de los indicadores no podían ser utilizados por el modelo para el cálculo de la escorrentía mensual.

Sin embargo, al utilizar la tabla elaborada por el ICE para tal fin, se obtuvo resultados cercanos a los que se consideran reales, (Cuadro 6, Figura 2). Estos valores son específicos para un área cercana a la zona de estudio, por lo que se decidió tomar otro método más general. Esto se obtuvo combinando el método de Thornwaite para generar la Evapotranspiración real de la zona con el método de Precipitación-Escorrentía y así obtener la escorrentía de la cuenca con datos mensuales.

El uso del método de Thornwaite para calcular evapotranspiración mensual, a partir de datos de temperatura y brillo solar de la zona, dio como resultado valores de escorrentía mensual que podemos tomar como datos cercanos a los reales, y que muestran una vez más que durante todo el año en la cuenca no se produce un déficit hídrico. Estos valores se muestran en el cuadro 7 (Figura 3).

Cuadro 6. Valores de escorrentía mensual (mm) para los diferentes escenarios de deforestación generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía.

Meses	Porcentaje de escorrentía*	0%(cero) (Cobertura total de bosque)	25% de deforestación	50% de deforestación	75% de deforestación	100% (deforestación completa)
Enero	4,9	289	292	299	314	330
Febrero	6,9	209	212	217	228	239
Marzo	9,6	144	146	149	157	165
Abril	9,9	152	153	157	165	173
Mayo	9,4	177	179	183	192	202
Junio	10,2	249	252	258	271	284
Julio	13,1	347	351	359	377	396
Agosto	14,0	358	362	371	389	408
Setiem.	8,0	340	343	352	369	388
Octubre	5,8	369	373	382	401	421
Noviem.	4,0	474	479	491	515	541
Diciem.	4,2	506	511	524	550	578
Total	100	3619	3657	3749	3933	4130

* De acuerdo al método de precipitación-escorrentía

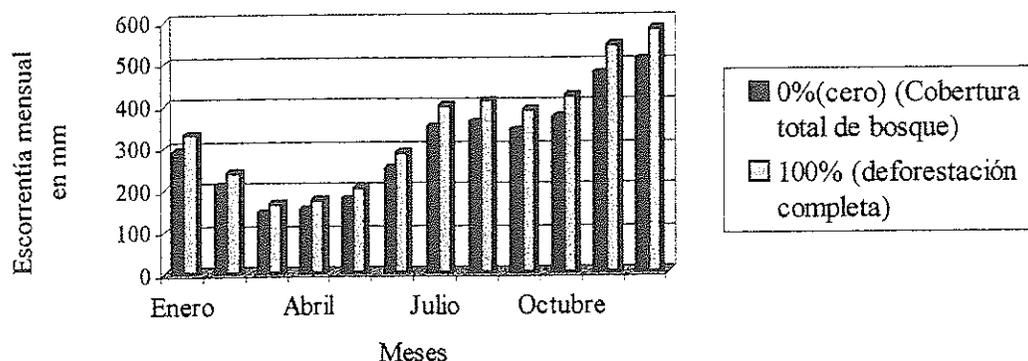


Figura 3. Tendencia de la distribución de los valores de escorrentía mensual en un año promedio, generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía.

Como puede observarse en las Figuras 2 y 3, la tendencia es casi la misma durante todo el año para los dos métodos; sin embargo, se consideró que los valores obtenidos utilizando la Evapotranspiración real de la zona, se acercan un poco más a los valores reales por incorporar una variable medida para esa zona específica.

Valoración Financiera

Con respecto a los beneficios del proyecto hidroeléctrico, al modificar la producción real para el año 1999 del proyecto hidroeléctrico Don Pedro, simulando una producción menor en los meses secos, debido a la irregularidad del caudal que podría esperarse al modificar la cobertura boscosa; se obtiene como resultado una disminución de los beneficios directos que va desde 0.75% hasta 23% aproximadamente. Los resultados de dicha escenarización se compararon con la situación real, situación máxima y con la disminución de la producción en el mismo escenario, durante los meses secos, dicha información se presenta en el Cuadro 8 (Figura 4).

Sin embargo esta modificación se hizo con base en la literatura consultada, la cual señala que una disminución en la cobertura boscosa de una cuenca influye negativamente en la regularidad y recarga hídrica de esta, ya que en nuestro estudio no se pudo determinar dicha conclusión debido a que el período analizado de un año, no fue suficiente para observar este cambio. Al contrario, se observa un aumento inmediato de la escorrentía, lo que nos lleva a pensar en otros factores que afectarían el proyecto como la erosión, que también contribuiría a aumentar los costos por mantenimiento.

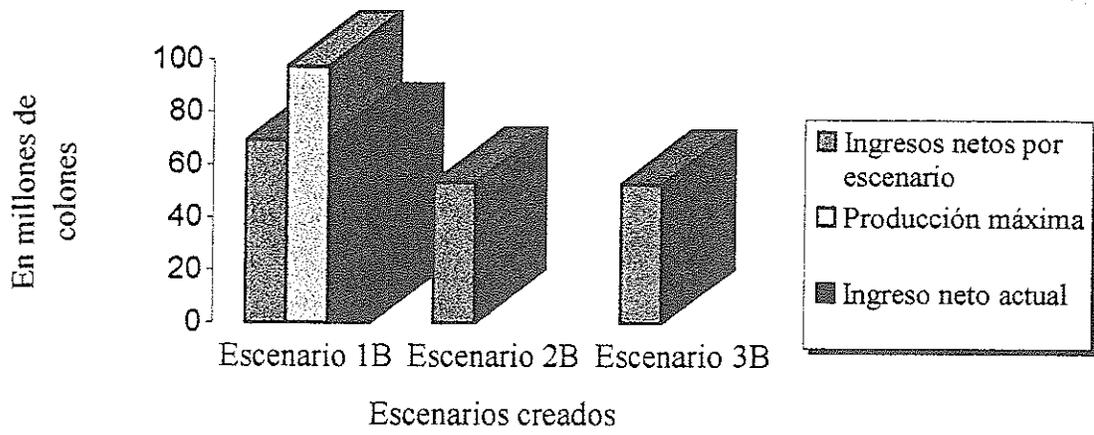


Figura 5. Comparación de los ingresos netos de los diferentes escenarios creados con la producción máximo y con el ingreso neto actual.

Cuadro 8. Pérdidas en la producción, comparadas con la producción real y la producción máxima de los diferentes escenarios financieros.

Escenarios	Producción del Escenario *	Producción Real *	Diferencia Entre Escenario y Situación Real*	% de pérdidas entre Escenario y la producción Real	Producción Máxima*	Diferencia Entre Escenario y Situación Real*	% de pérdidas entre escenario y producción máx.	% pérdida con respecto al mes mas lluvioso del mismo escenario
Escenario 1B	69,378,812	69,933,289	554,477	0,80	97,341,108	27,962,296	40	0,72
Escenario 2B	53,145,692	69,933,289	16,787,597	31,59	97,341,108	44,195,416	83	31
Escenario 3B	52,485,137	69,933,289	17,448,152	33,24	97,341,108	44,855,971	85	31

* En colones costarricenses

V. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Los indicadores: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y cobertura boscosa, son suficientes para generar un balance hídrico anual, pero no generan resultados aceptables mensualmente por estar cercanos a los reales (con respecto a los valores de las estaciones cercanas a la cuenca).

La cuenca estudiada, posiblemente no llegue a tener un déficit hídrico, según el modelo utilizado, debido a que la relación de evapotranspiración/precipitación obtenida a partir de la interpolación mantuvo valores entre 0.06 y 0.45.

De acuerdo al modelo Precipitación-Escorrentía, la precipitación y escorrentía promedio anual estimadas sobre la cuenca fueron de 4312 mm y 3581mm respectivamente, lo que se considera suficiente para mantener al proyecto generando energía sin problema durante un año promedio.

Los cinco escenarios analizados (que varían de 0 - 100 % de deforestación), muestran que la disminución del bosque favorecería un aumento en la escorrentía que oscilaría entre 3619-4130 mm año⁻¹. Esto implica un aumento de 511 mm año⁻¹ si la cuenca se deforestara en su totalidad.

El escenario 3 (50% de deforestación) podría considerarse, según el modelo, un punto crítico para el caso de la cuenca del Río San Fernando con respecto a la escorrentía, ya que se observa un aumento considerable con respecto a los otros escenarios.

La modificación del caudal del río puede ocasionar una producción irregular en el tiempo para el Proyecto Hidroeléctrico, que podría ocasionarle pérdidas considerables, y que provocaría que dicho proyecto se vuelva insostenible.

Una modificación del caudal, también podría llevar al proyecto a incurrir en gastos de mantenimiento mayores, debido a que existe la posibilidad de modificar la infraestructura del proyecto para poder producir la energía establecida en el contrato, a esto se le puede sumar el

5.2 Recomendaciones

- Para obtener datos más precisos generados por el modelo de Precipitación-Escorrentía, deben realizarse mediciones por tiempos mayores a un año.
- Deben considerarse otros indicadores como características del suelo, coberturas diferentes a la del bosque, para evitar subestimaciones y sobrevaloraciones en los valores de escorrentía arrojados por el modelo.
- Utilizar el modelo como una herramienta en cuencas en donde existan pocos datos, para generar información básica que sirva como un punto de partida para diagnósticos generales.
- Contemplar, a corto plazo, otros aspectos como incentivos en el pago por servicios ambientales en esta cuenca, ya que para determinar el impacto en el servicio de protección de acuíferos, se necesita, según el modelo, un período más largo para obtener resultados que ayuden a la toma de decisiones en el control de la deforestación.
- Utilizar la información primaria obtenida a través de esta investigación como base para aplicar otro modelo que permita obtener datos mensuales, con los que se podría valorar financieramente el impacto de la deforestación sobre la generación de energía.
- Aplicar esta metodología en cuencas que puedan presentar déficit hídrico en alguna época del año.

VI. Bibliografía citada.

- Argüello, G. 1992. Modelación hidrológica continua en tiempo real de la cuenca del río Virilla, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 128 p.
- Azqueta, D. 1994. Valoración económica de la calidad ambiental. Primera edición, Editorial McGraw Hill, España. 299 p.
- Barrantes, G; Castro, E. 1998a. Valoración económico ecológica del agua en Costa Rica. Informe final 2. MINAE. San José, Costa Rica. 51 p.
- Barrantes, G; Castro, E. 1998b. Políticas para la sostenibilidad del recurso hídrico en Costa Rica. Informe final 4. MINAE. San José, Costa Rica. 33 p.
- Barrantes, J.; Liao, A.; Rosales, A. 1985. Atlas climatológico de Costa Rica. Preparado por la unidad de Estudios Especiales con el auspicio del IMN y el Proyecto MAG-CORENA. San José, Costa Rica.
- Barton, D. 1994. Economic factors and valuation of tropical coastal resources. Universitetet 1 Bergen Senter for Miljoog Ressurstudier. SMR rapport. 128 p.
- Campos, D. 1987. Hidrología superficial aplicada vol. I, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí México 290 p.
- Castro, E; Barrantes, G. 1998. El presupuesto de aguas en Costa Rica. Informe final 1. MINAE. San José, Costa Rica. 50 p.
- Cubero, D., ed. 1994. Manual de manejo y conservación de suelos y aguas. Editorial Universidad Estatal a Distancia. MAG/FAO/UNED. San José, Costa Rica. 300 p.
- Dixon, J., Fallon, L., Carpenter, R., Sherman, P. 1996. Economic analysis of environmental impacts. Segunda edición. Publicado por la Asociación de Desarrollo del Banco de Asia y el Banco Mundial. Earthscan Publication. London. 210 p.
- Dunne, T; Leopold, L. 1978. Water in environmental planning. W.H Freeman and Company, New York. USA. 818 p.
- Easter, K; Dixon, J; Hufschmidt, M. 1986. Watershed resources management. Westview Press/ Boulder and London. 236 p.
- Faustino, J. 1988. Modelos de procesos erosivos. Proyecto Regional de Manejo de Cuencas. CATIE, AID/ROCAP. 47 p.
- Faustino, J. 1997. Agua, recurso estratégico en el futuro de América Central. Revista Forestal Centroamericana Año 6, Nº 18: 6-12.
- Fundación Neotrópica. 1991. Análisis de los incentivos y desincentivos para la reforestación y el manejo del bosque natural en Costa Rica. Centro de Estudios Ambientales y Políticas. San José, Costa Rica. 32 p.

- Goitia, J. 1995. Modelación de la operación de un sistema hidroeléctrico en serie, caso del embalse Arenal, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. 151 p.
- Gutiérrez, C. 1988a. Fundamentos de hidrología aplicada al manejo de cuencas. *In* Memoria del curso corto "Fundamentos del manejo de cuencas". Olancho, Honduras. CATIE, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas. p 31-54.
- Gutiérrez, C. 1988b. Planificación de los recursos hídricos en el manejo de cuencas. *In* Memoria del curso corto "Fundamentos del manejo de cuencas". Olancho, Honduras. CATIE, Proyecto Regional de Manejo de Cuencas. 75-93.
- Hoeks, J. 1996. Development of decision support tools for water management. *In* Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos. Jenny Vargas Ed. Editorial Fundación UNA. Heredia, Costa Rica. 256 p.
- Holdridge, L. 1996. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 216 p.
- Hosokawa, R, Lopez, M. 1995. Valoración económica del ecosistema bosque. Yvyrareta. Revista de difusión científica y tecnología de la Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Misiones. Año 6 No 6: 77-80.
- Hufschmidt, M; Hyman, E. 1982. Economic approaches to natural resource and environmental quality analysis. Tycooly International Publishing Limited, Dublin. Vol, 5. Ireland. 333 p.
- Linsley, R.; Kohler, M.; Paulhus, J. 1977. Hidrología para ingenieros. Editorial McGraw-Hill. México, D.F. 386 p.
- Marozzi, M. 1996. Métodos de valoración económica del servicio de agua potable: Ajustes para la sostenibilidad del recurso. *In* Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos. Jenny Vargas Ed. Editorial Fundación UNA. Heredia, Costa Rica. 256 p.
- Martín M. 1973. El agua, factor importante en el desarrollo económico y social. Agua, Revista del Centro de Estudios, Investigación y Aplicaciones del Agua. Septiembre/Octubre, p 10-21.
- Mourraille, C., Porras, I., Aylward, B. 1995. La protección de cuencas hidrográficas: una bibliografía anotada de Hidrología, valorización económica e incentivos económicos.
- Novelo, G. 1985. Beneficios derivados del recurso forestal. *In* I Foro Internacional de la Juventud Forestal. FAO. Actas. p 19-28.
- Oreamuno, R., Jaubert, M. 1992. Informe hidrológico, proyecto hidroeléctrico Don Pedro, Río San Fernando. Energía Global de Costa Rica. C.L.C. Ingenieros Asociados y Cía. Ltda.

- Oreamuno, R. 1991. Modelación Hidrológica. In Modelación Hidrológica e Hidráulica usando HEC 1 y HEC 2. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Ortiz, R. 1999. Aplicación de experimentos de escogencia múltiple en la distribución del pago por servicios ambientales en bosques de Costa Rica. IV Semana Científica, Logros de la investigación para el nuevo milenio. Actas. CATIE. Turrialba, Costa Rica. p 375-378.
- Ramakrishna, B. 1997. Estrategia de extensión para el manejo integrado de Cuencas Hidrográficas: Conceptos y experiencias. IICA/GTZ. San José, Costa Rica. 338 p.
- Rodríguez, A. 1996. La utilización de los recursos hídricos de Costa Rica. In Utilización y manejo sostenible de los recursos hídricos. Jenny Vargas Ed. Editorial Fundación UNA. Heredia, Costa Rica. 256 p.
- Rodríguez, A., Saborío, J. 1987. Evaluación preliminar indirecta del potencial hídrico e hidroeléctrico de una cuenca (Aplicación del método de Holdridge a la cuenca del R. Reventazón). In Curso Bases Hidrológicas para el Manejo de Cuencas (1987, Turrialba, Costa Rica) Notas. ed. C. Gutiérrez. Turrialba, costa Rica, CATIE, vol. 2
- Saborío, L.J. 1983. Evaluación Indirecta de los recursos hídricos de una cuenca (Modelo de precipitación - escorrentía). In Curso Bases Hidrológicas para el Manejo de Cuencas (1987, Turrialba, Costa Rica) Notas. ed. C. Gutiérrez. Turrialba, costa Rica, CATIE, vol. 2
- Salgado, L. 1996. Valoración económica del agua para uso urbano, proveniente del parque nacional La Tigra, Tegucigalpa, Honduras. Tesis Mag. Sci., Turrialba, Costa Rica. CATIE. 85 p.
- Serrano, E. 1990. La producción y valoración del agua: un marco conceptual y metodológico. In Pimentel, L. (Ed). Memorias del primer simposio nacional sobre el agua en el manejo forestal. México.
- Solórzano, R.; de Camino, R.; Woodward, R.; Tosi, J.; Watson, V.; Vásquez, A.; Villalobos, C.; Jiménez, J.; Repetto, R.; Cruz, W. 1991. La depreciación de los recursos naturales en Costa Rica y su relación con el sistema de cuentas nacionales. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica. 160 p.
- Stadtmüller, T. 1994. Impacto hidrológico del manejo forestal de bosques naturales tropicales, medidas para mitigarlo. Serie Técnica, Informe técnico No 246. Colección Silvicultura y Manejo de Bosques Tropicales No 10. CATIE/COSUDE. Turrialba, Costa Rica. 61 p.
- Tosi, J.; Watson, V.; Echeverría, J. 1992. Potential impacts of climatic change on the productive capacity of Costa Rican forests: a case of study. Tropical Science Center, San José, Costa Rica. 82 p.



VII. Comunicaciones personales

Alfaro, Donnia, Energía Global de Costa Rica, 1999.

Benavides, José, Gerente General, Energía Global de Costa Rica. 1999.

González, Pedro. Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central 1999.

Jiménez, Francisco. Departamento de Cuencas Hidrográficas, CATIE. 1999

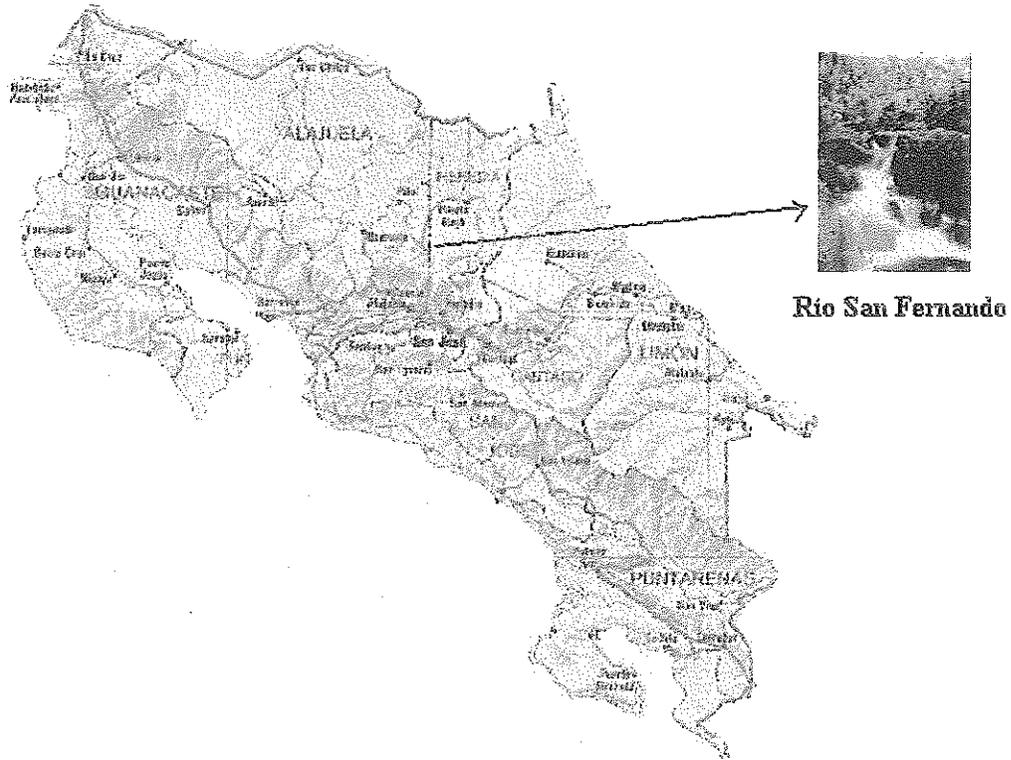
Saborío, Javier, Colaborador del Departamento de SIG, CATIE. 1999

Solano, Gustavo. Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central 1999.

Velásquez, Sergio, Departamento de SIG, CATIE. 1999

Anexos

Anexo 1. Ubicación del Río San Fernando y proyecto hidroeléctrico Don Pedro

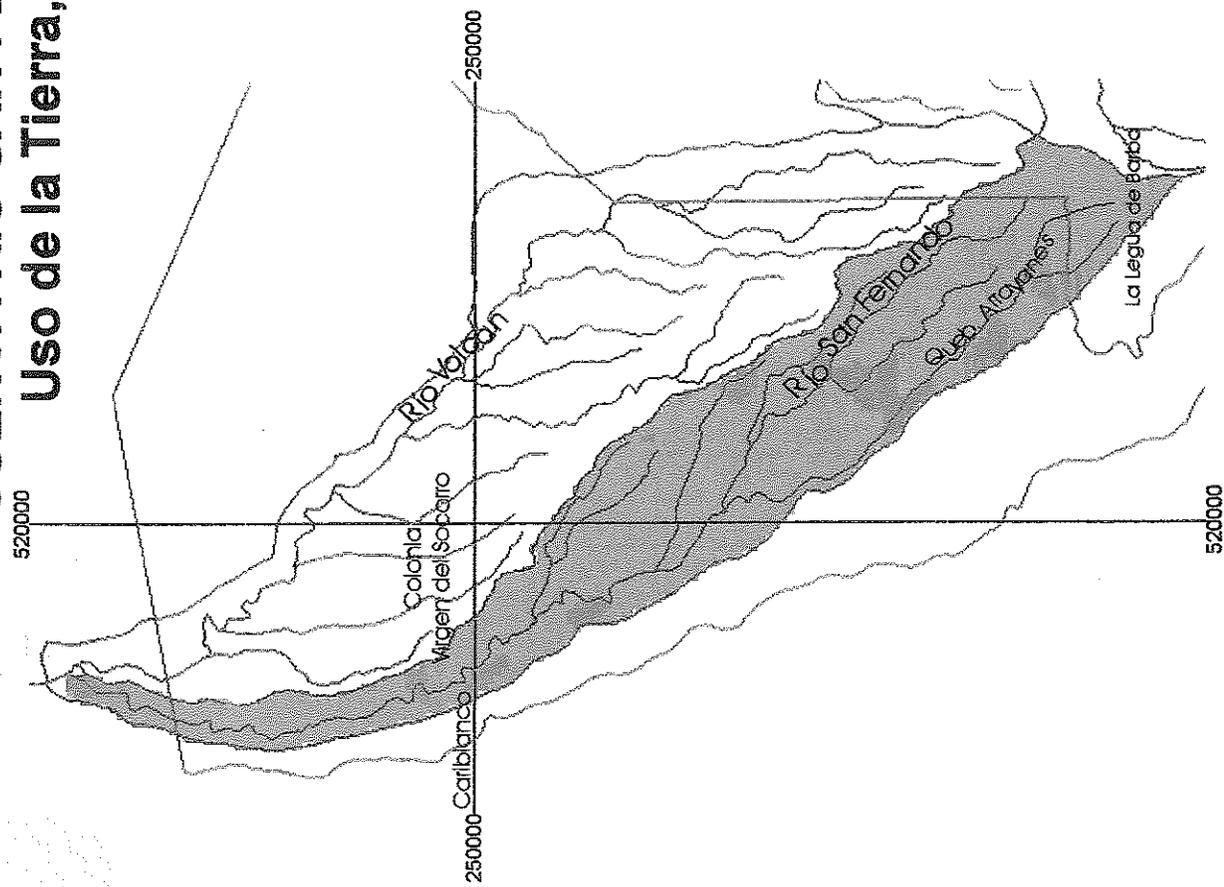


Anexo 2. Datos de precipitación de las Estaciones Meteorológicas alrededor de la cuenca del Río Sarapiquí desde el año 1978 hasta 1997 utilizadas en el estudio

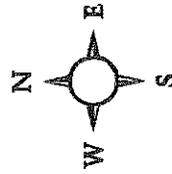
Año de observación	Vara Blanca	La Marina	Los Angeles	Isla Bonita	Zurquí	La Montura	Alto palomo	Bajos del toro	Picada Palmira	Volcán Poás
1978	3234.3	3518.0	4519.0	2404.6	3919.8	4129.5	2490.3	2442.3	2100.2	2838.6
1979	3704.9	4115.3	5261.4	4139.1	4753.3	5092.0	2889.3	2878.9	2462.0	3333.0
1980	4132.1	4013.4	5935.3	4668.8	5510.0	5965.8	3251.5	3275.2	2790.3	3781.8
1981	4991.8	5738.6	7291.6	5944.9	7032.7	7724.1	3980.3	4072.7	3451.2	4685.0
1982	3992.0	4589.7	5635.7	4432.8	5261.8	5679.2	3132.7	3145.2	2682.7	3634.6
1983	3121.6	3589.5	5115.1	3772.7	3720.2	3899.0	2394.8	2337.8	2013.6	2720.2
1984	4059.1	4666.8	6308.8	5011.3	5380.7	4981.7	3189.6	3207.5	2734.2	4447.1
1985	2822.4	3075.8	4281.9	3480.7	3190.2	6363.3	2801.4	2393.5	1907.8	2534.9
1986	3059.7	3803.7	5233.6	3966.2	3610.5	7360.3	2278.5	2658.6	2287.3	3013.3
1987	3458.9	3938.2	5555.2	4334.8	4317.6	7418.5	2555.8	3110.2	2913.6	3428.6
1988	4217.7	4526.3	5919.3	4660.2	5661.6	6670.9	3368.3	3806.1	3324.1	4696.5
1989	3629.6	3902.5	5653.1	4775.9	5317.2	7785.4	3041.0	3307.8	2900.3	3278.3
1990	3498.8	4121.1	5611.9	4599.4	6293.8	7131.8	2935.3	3135.7	2038.3	3050.5
1991	3200.7	3644.5	5183.6	4136.9	3924.2	6738.4	2492.1	2872.9	1460.4	3650.7
1992	2708.7	3514.1	5008.0	3899.8	5586.2	6463.4	2622.1	2986.3	2567.4	3208.1
1993	3588.6	4023.2	5660.9	4422.1	6015.8	7101.3	2880.0	2966.0	2983.2	3827.1
1994	3095.2	3568.6	4703.4	3962.0	5517.7	6300.6	2431.8	2694.9	2418.3	3442.5
1995	2926.7	3138.3	4462.2	3628.2	5410.8	5474.5	3596.5	2792.4	2942.2	3661.4
1996	4259.7	4789.1	6169.2	5288.5	7498.7	8132.3	3990.0	4633.7	3541.3	4645.4
1997	3938.3	4359.3	6396.5	5756.2	8376.4	8680.8	3087.2	3792.5	2974.5	3836.1
Promedio	3582.0	4031.8	5495.3	4364.3	5315.0	6454.6	2970.4	3125.5	2624.6	3585.7
Desv est	583.7	626.2	737.7	803.7	1337.4	1291.7	496.3	582.6	543.6	642.8

Anexo 3. CUENCA RIO SAN FERNANDO

Uso de la Tierra, 1986



SIMBOLOGIA	(Ha)
Bosque Primario	2107
Bosque Intervenido	192
Pasto con Arboles	24
Cultivos y/o Pastos	53
Charral	1
Suelo Desnudo	0
Agua	0
Recuper./Reforest.	0
Nubes y/o No datos	0
Areas Protegidas	



Fuente:
Elaborado a partir de imágenes de Satélite, 1986
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1996

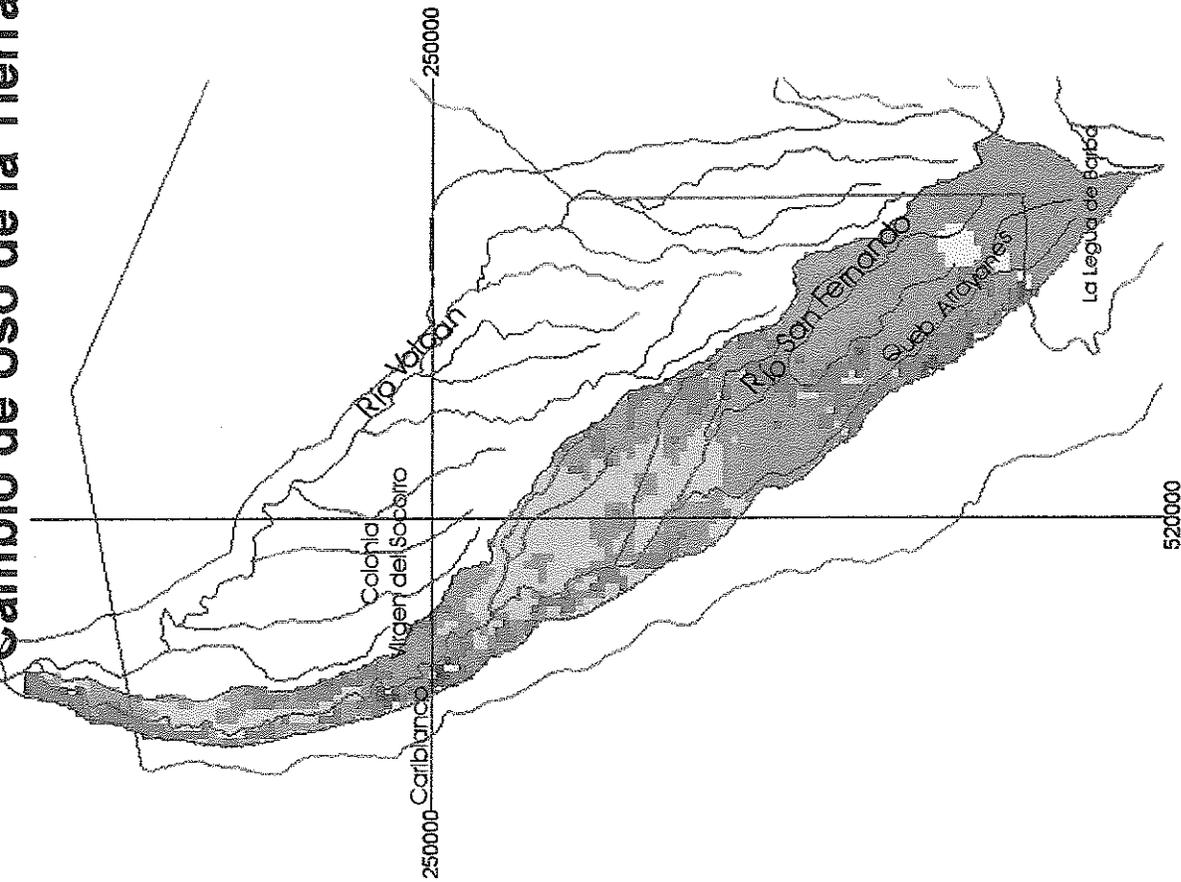


ESCALA

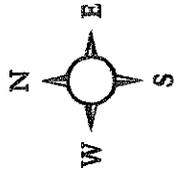


Anexo 4. CUENCA RIO SAN FERNANDO

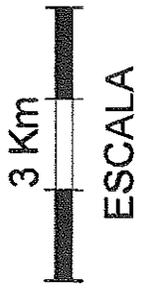
Cambio de Uso de la Tierra, 1986-1992



SIMBOLOGIA		(Ha)
Otro Uso	[Dark Grey Box]	28
Deforestación	[Medium-Dark Grey Box]	350
Nubes y/o No Datos	[Medium-Light Grey Box]	525
Reforestac./Recuperac.	[White Box]	49
Sin Cambios 86-92	[Dark Grey Box]	1425
Areas Protegidas	[Wavy Line]	



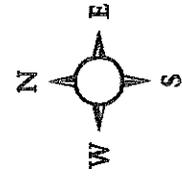
Fuente:
Elaborado a partir de imágenes de Satélite, 1986-1992
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1996



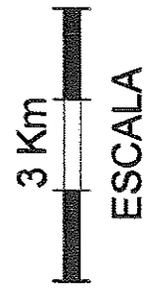
Anexo 5. CUENCA RIO SAN FERNANDO Uso de la Tierra, 1992



SIMBOLOGIA	(Ha)
Bosque Primario	1403
Bosque Intervenido	65
Pasto con Arboles	6
Cultivos y/o Pastos	370
Charral	1
Suelo Desnudo	1
Agua	0
Recuper./Reforest.	6
Nubes y/o No datos	525
Areas Protegidas	



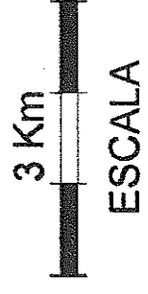
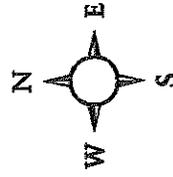
Fuente:
Elaborado a partir de Imágenes de Satélite, 1992
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1996



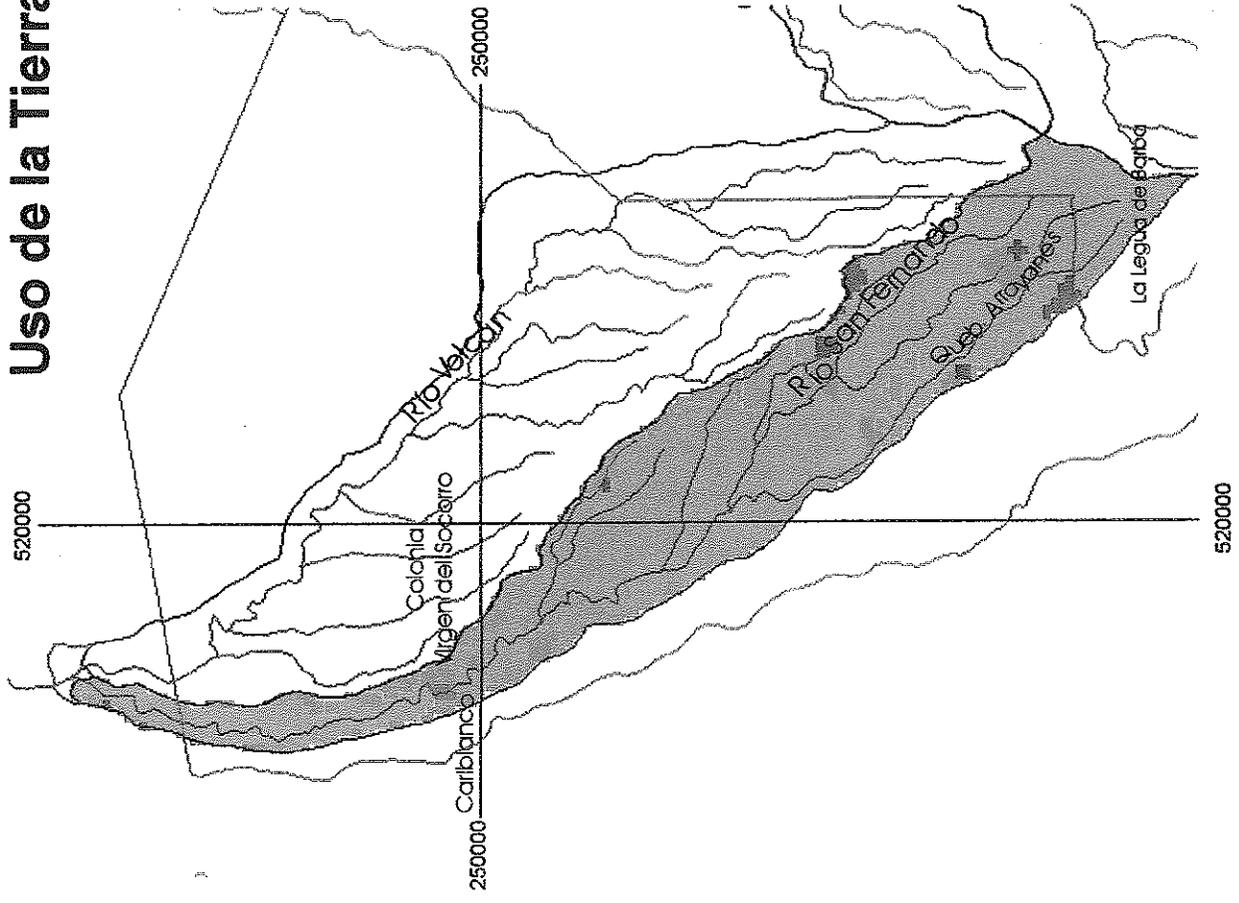
Anexo 6. CUENCA RIO SAN FERNANDO

Uso de la Tierra, 1996

SIMBOLOGIA	(Ha)
Bosque Primario	2023
Bosque Intervenido	53
Pasto con Arboles	57
Cultivos y/o Pastos	161
Charral	0
Suelo Desnudo	22
Agua	5
Recuper./Reforest.	48
Nubes y/o No datos	8
Areas Protegidas	

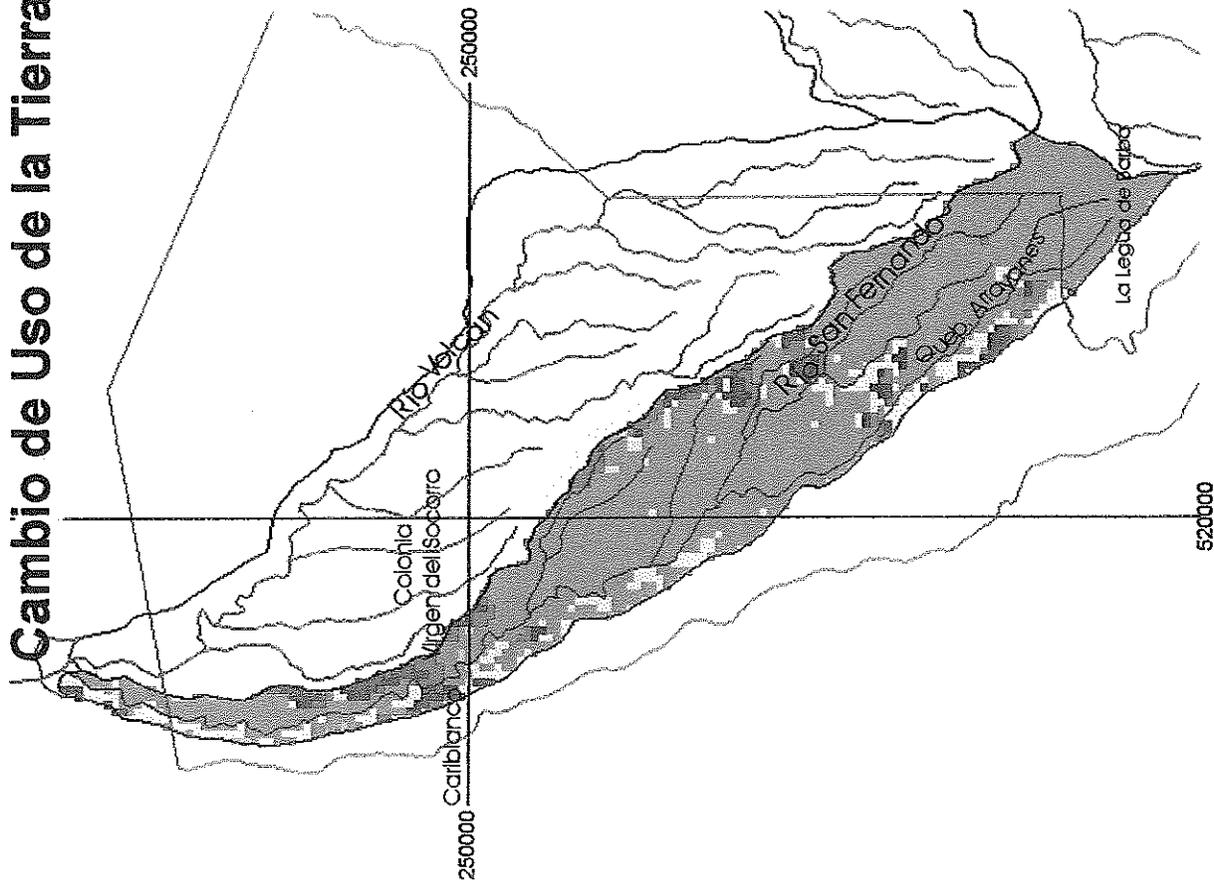


Fuente:
Elaborado a partir de Imágenes de Satélite, 1996
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1998

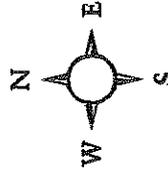


Anexo 7. CUENCA RIO SAN FERNANDO

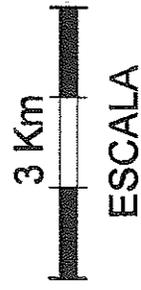
Cambio de Uso de la Tierra, 1992-1996



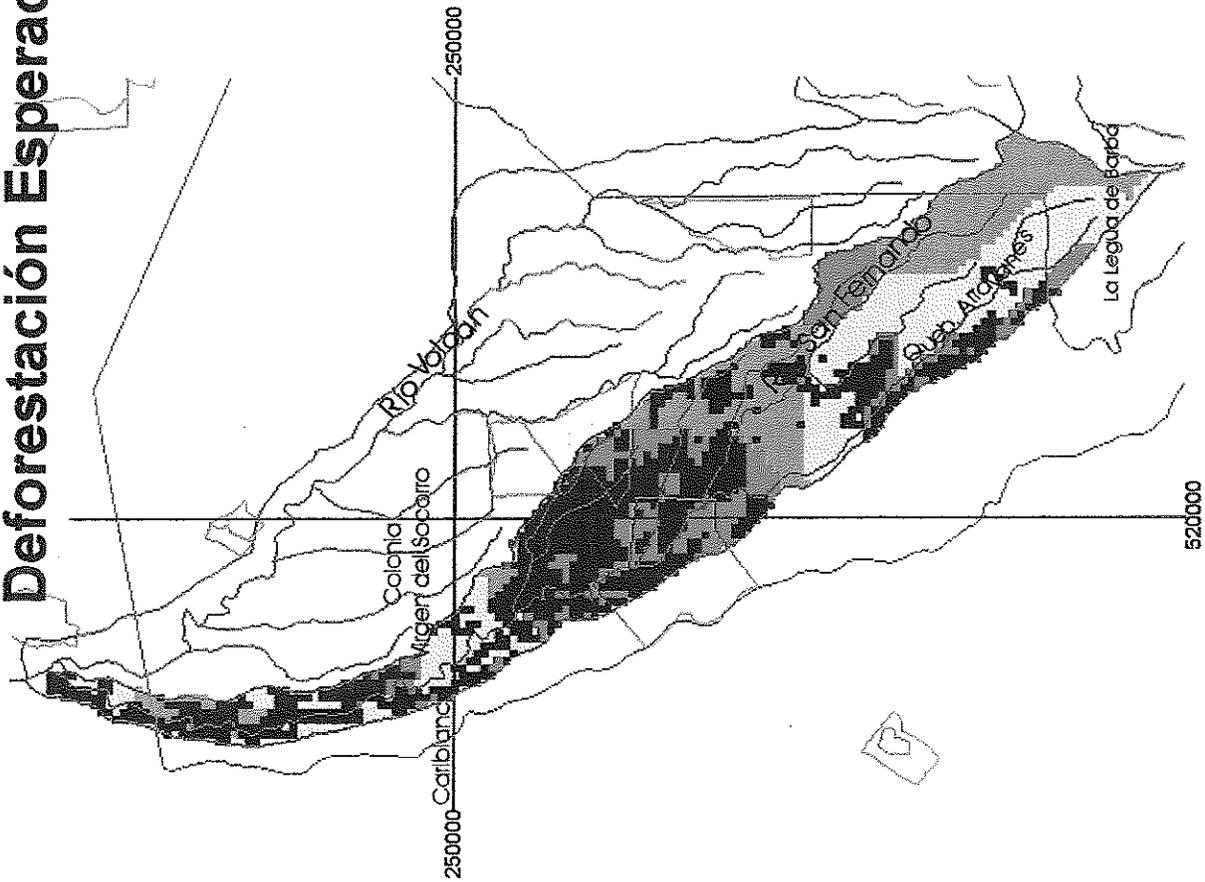
SIMBOLOGIA		(Ha)
Otro Uso		139
Deforestación		106
Nubes y/o No Datos		8
Reforestac./Recuperac.		240
Sin Cambios 86-92		1884
Areas Protegidas		



Fuente:
Elaborado a partir de imágenes de Satélite, 1992-1996
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1998



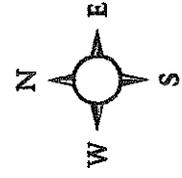
Anexo 8. CUENCA RIO SAN FERNANDO Deforestación Esperada 1992-1998



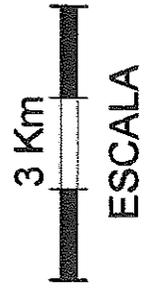
SIMBOLOGIA

	(Ha) (refer. anual)
Menor Riesgo	499 3.8
Mediano Riesgo	610 6.7
Mayor Riesgo	365 11.4
Otro Uso y/o Nubes	903
Proyectos FUNDECOR	195
Áreas Protegidas	2313 (*)

(*) 25 hectáreas en Parques Nacionales

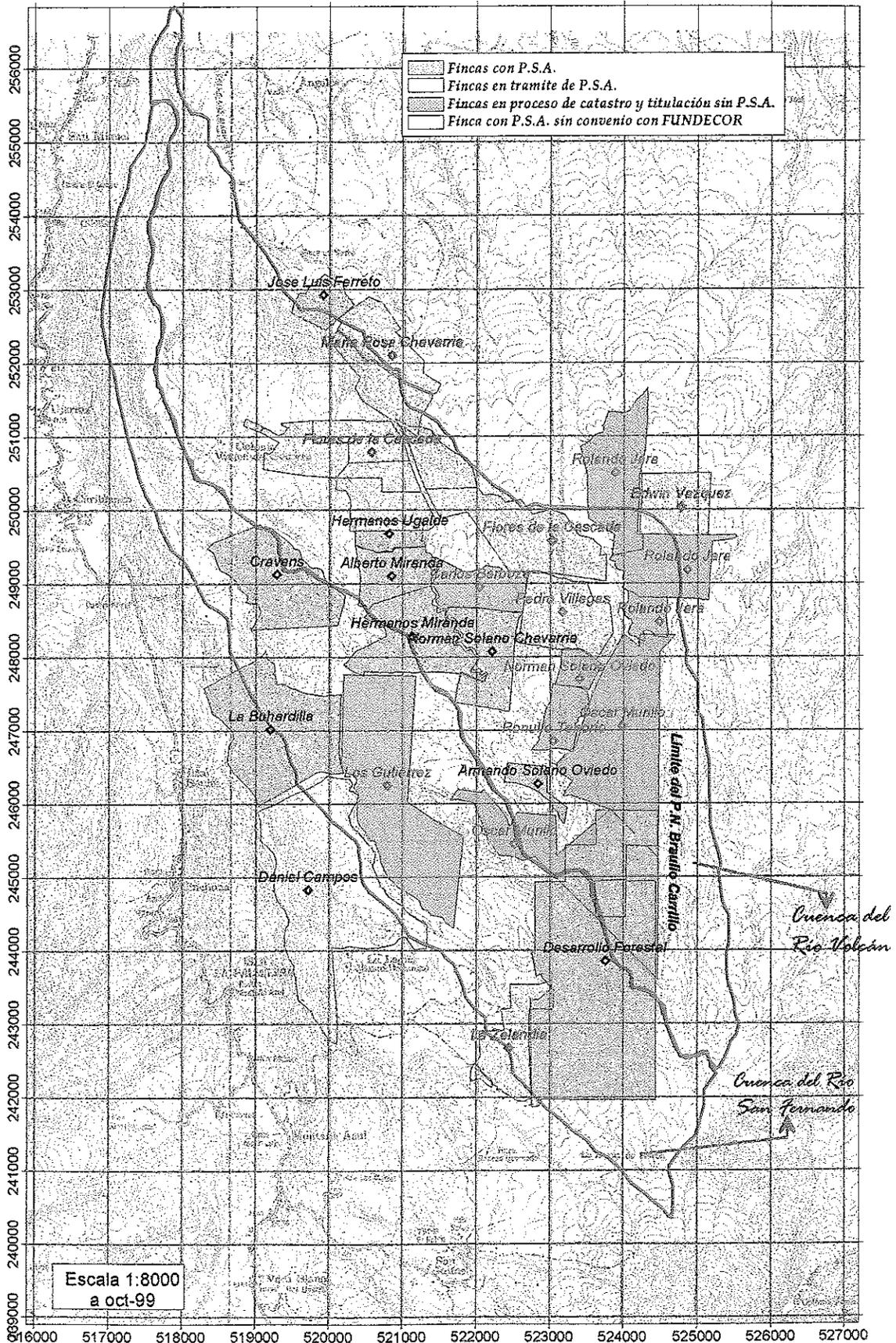


Fuente:
Elaborado a partir de imágenes de Satélite, 1992
OFICINA DE PLANIFICACION Y EVALUACION
FUNDECOR, 1996

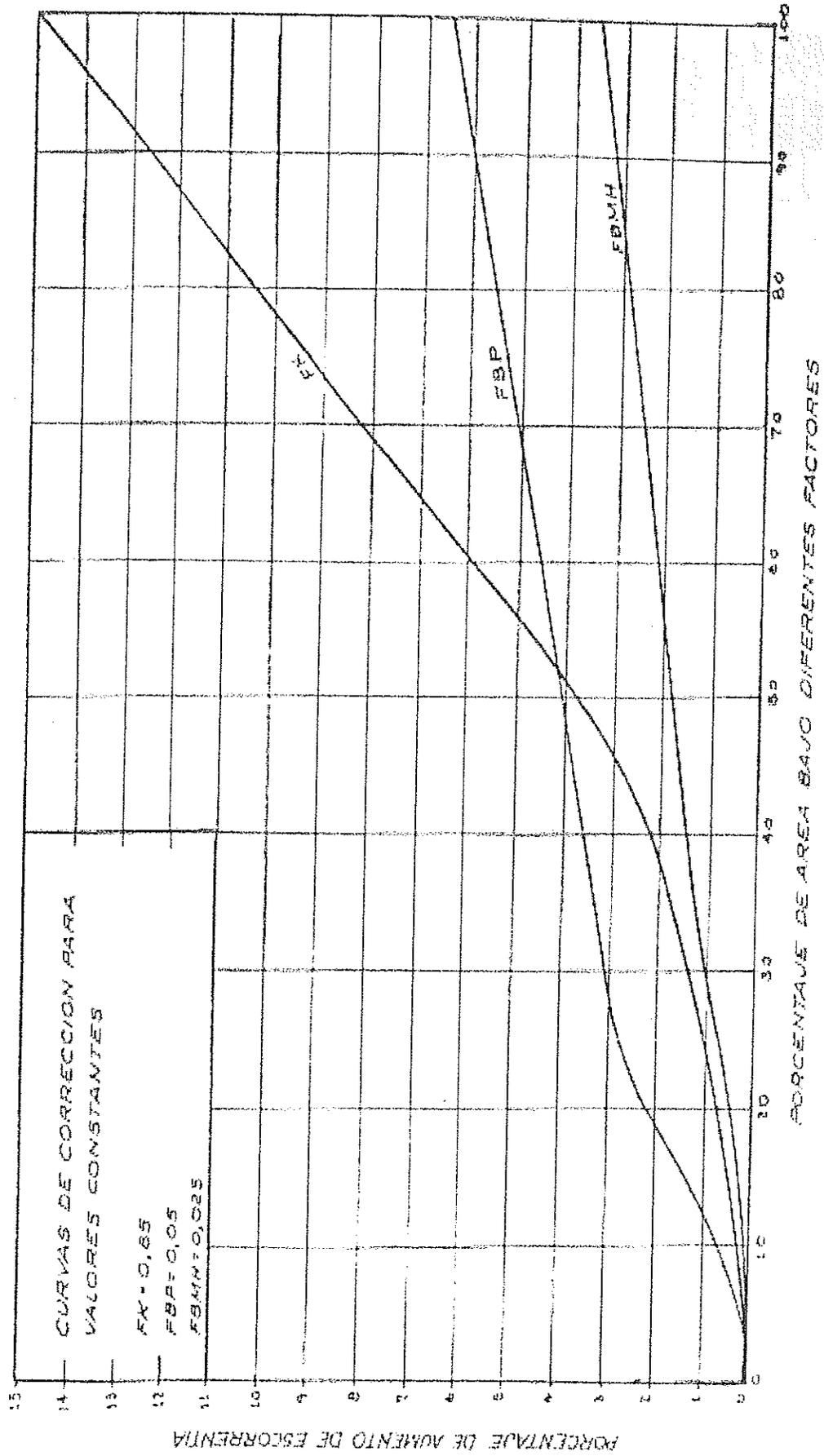


Ubicación de fincas con Convenio con FUNDECOR en las cuencas de los Ríos San Fernando (P.H. Don Pedro) y Volcán (P.H. Río Volcán)

Acuerdos contractuales para el pago de Servicios ambientales
 FUNDECOR - Compañía de Energía Global de Costa Rica S.A.



Anexo 10. Curvas para corrección de escorrentía. (Propiedad del I.C.E. - Departamento de Estudios Especiales.
 Ing. Javier Saborío)



Anexo 11. Reporte Mensual de Operaciones para el año de 1999 del Proyecto Hidroeléctrico Don Pedro

Ingresos brutos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
Producción KWH pico	70100	66697	75179	70222	70072	73423	73418	73370	73131	69959	70072	70222
Producción KWH no pico	413411	296144	170193	533404	521533	395920	280118	458835	523759	648095	533404	521533
Horas/día a máx. potencia	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Horas/día a potencia media	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
Prod. Mensual pico (colones)	1470000	1398640	1576510	1472560	1469410	1539690	1539580	1538570	1533560	1467030	1469410	1472560
Prod. Mensual fuera de pico	4406960	3156890	1814260	5686090	5559540	4220510	2986060	4891180	5583270	6908690	5686090	5559540
Precio KWH pico (colones)	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97
Precio KWH normal (colones)	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66
Total ingresos brutos	5876960	4555530	3390770	7158650	7028950	5760200	4525640	6429750	7116830	8375720	7155500	7032100
Mensuales (en colones)												
Costos										total annual colones	74406600	
Costo de Operación	38010	36800	39820	43850	44170	36540	41030	37400	37400	total annual dólares	252226	
Acumulado											40037	40037
Reservas y Acumulaciones	39690	36670	39650	41560	41520	40060	41440	41440	41440	42073	42073	42073
Total Costo de Operación	77700	73470	79470	85410	85690	76600	82470	78840	78840	82009	82110	82110
Depreciación acumulada	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710	41710
Intereses acumulados	202420	202420	202420	202420	202240	202240	203190	203190	203190	203191	203191	203191
Honorarios bancarios	820	820	820	830	830	830	840	840	840	840	840	840
Total Intereses	244950	244950	244950	244780	244780	244780	245740	245740	245740	245741	245741	245741
Otros												
Acuerdo con FUNDECOR	830	830	830	830	830	830	830	830	830	830	830	830
Pérdidas por Cambio	0	29000	-2630	3640	2260	-2160	4328	4330	4330	3793	3793	3793
Total otros	830	29830	-1800	4470	3090	-1330	5158	5160	5160	4623	4623	4623
Total costos	365190	389960	364330	376370	375270	361760	375078	371450	371450	374083	374185	374185
Totales								Total	4473311	colones	15164	Dólares
BN (en colones por kw)	5511770	4165570	3026440	6782280	6653680	5398440	4150562	6058300	6745380	8001637	6781315	6657915
Totales								Total	69933289	colones	237062	dólares
Diferencias en beneficios netos	2489867	3836067	4975197	1219357	1347957	2603197	3851075	1943337	1256257	0	1220321	1343721
								Total	26086350	colones	88428	dólares

Anexo 12. Escenario 1B. Tres horas laboradas a máxima potencia con producción promedio, producción promedio también en las horas restantes durante los meses secos; cinco horas a máxima potencia con producción promedio, producción promedio en las horas restantes durante los meses lluviosos.

Ingresos brutos en colones Costarricenses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
Producción KWH pico	29882	29882	29882	29882	49804	49804	49804	49804	49804	49804	49804	29882
Producción KWH no pico	173268	173268	173268	173268	156766	156766	156766	156766	156766	156766	156766	173268
Horas/día a máx. potencia	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	3
Horas/día a potencia media	21	21	21	21	19	19	19	19	19	19	19	21
Prod. Mensual pico (colones)	896468	896468	896468	896468	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	896468
Prod. Mensual fuera de pico (colones)	5198029	5198029	5198029	5198029	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	5198029
Precio KWH pico (colones)	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97
Precio KWH normal (colones)	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66
Total ingresos netos Mensuales (colones)	5729307	5704537	5730167	5718127	5821821	5835331	5822013	5825641	5825641	5823008	5822907	5720312
	Total anual colones											69378812
	Total anual dólares											235182

Anexo 13. Escenario 2B. Tres horas laboradas a máxima potencia con producción mínima y producción máxima también en las horas restantes durante los meses secos. Durante los meses lluviosos, cinco horas a máxima potencia con producción promedio y producción promedio también en las horas restantes

Ingresos brutos en colones Costarricenses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
Producción KWH pico	27995	27995	27995	27995	49804	49804	49804	49804	49804	49804	49804	27995
Producción KWH no pico	66934	66934	66934	66934	156766	156766	156766	156766	156766	156766	156766	66934
Horas/día a máx. potencia	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	3
Horas/día a potencia media	21	21	21	21	19	19	19	19	19	19	19	21
Prod. Mensual pico (colones)	839849	839849	839849	839849	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	1494113	839849
Prod. Mensual fuera de pico (colones)	2008024	2008024	2008024	2008024	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	2008024
Precio KWH pico (colones)	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97
Precio KWH normal (colones)	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66
Total ingresos netos Mensuales (colones)	2482683	2457913	2483543	2471503	5821821	5835331	5822013	5825641	5825641	5823008	5822907	2473688
Total anual colones											53145692	
Total anual dólares											180155	

Anexo 14. Escenario 3B. Tres horas laboradas a máxima potencia con producción mínima y producción mínima también en las horas restantes durante los meses secos. Durante los meses lluviosos, cinco horas a máxima potencia con producción mínima y producción promedio en las horas restantes.

Ingresos brutos en colones Costarricenses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
Producción KWH pico	27995	27995	27995	27995	46658	46658	46658	46658	46658	46658	46658	27995
Producción KWH no pico	66934	66934	66934	66934	156766	156766	156766	156766	156766	156766	156766	66934
Horas/día a máx. potencia	3	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5	3
Horas/día a potencia media	21	21	21	21	19	19	19	19	19	19	19	21
Prod. Mensual pico (colones)	839849	839849	839849	839849	1399748	1399748	1399748	1399748	1399748	1399748	1399748	839849
Prod. Mensual fuera de pico (colones)	2008024	2008024	2008024	2008024	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	4702979	2008024
Precio KWH pico (colones)	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97	20,97
Precio KWH normal (colones)	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66	10,66
Total ingresos netos mensuales (colones)	2482683	2457913	2483543	2471503	5727456	5740966	5727648	5731276	5731276	5728643	5728542	2473688
Total anual colones												52485137
Total anual dólares												177916