

VIII Congreso Nacional de Ciencias
Exploraciones fuera y dentro del aula
27 y 28 de agosto, 2006 [Universidad Earth](#),
Guácimo, Limón, Costa Rica

**MODELO CUANTITATIVO PARA EL MANEJO DEL AGUA EN
LA CUENCA DEL CANAL DE PANAMÁ:
UNA VERSIÓN PRELIMINAR**

**por:
Jaime Echeverria**

**Presentado en la Feria del Agua de Centro America y el Caribe,
Ciudad de Panamá, Octubre 2001**

Elaborado con la colaboración de la Fundación McArthur, Fundación Summit, el Gobierno de los Países Bajos, el Gobierno de Alemania

Resumen

La importancia económica del Canal de Panamá, y su dependencia del recurso agua, hace que el estudio de los aspectos hidrológicos de la Cuenca del Canal sea de gran trascendencia. El Proyecto Flujos Críticos en Panamá ha realizado una serie de análisis tendientes a evaluar diferentes opciones para el manejo de los recursos naturales de la Cuenca. Utilizando modelos cuantitativos, en este documento se realizan varias estimaciones relacionadas con posibles disminuciones en la esorrentía y aumento en la demanda para consumo de la población. Los resultados muestran como el aumento de la población y posibles disminuciones en la cantidad de agua que entra a los lagos donde se almacena el agua tendrán un impacto económico importante. También se muestran las posibilidades de sustitución entre la generación de electricidad y los tránsitos de barcos.¹

Las simulaciones realizadas son de carácter ilustrativo hechas con el fin de demostrar la utilidad de modelos de optimización en el contexto del manejo de una cuenca hidrográfica. Es necesario, sin embargo, afinar los resultados para contar con análisis más precisos que puedan dar origen a decisiones concretas. En este sentido es necesario que los actores nacionales se apropien del modelo y hagan uso del mismo en el futuro.

¹ I would like to acknowledge Ernesto Quintero and Patricia Zurita for their data collection efforts.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-------------------------------------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 6 |
| 1.1. ANTECEDENTES | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO | 6 |
| 1.3. CASO PANAMÁ | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 1.4. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 2. ANÁLISIS CUANTITATIVO PARA EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS | 6 |
| 2.1. ANTECEDENTES | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 2.2. MODELOS CUANTITATIVOS | 6 |
| 2.3. ESCORRENTÍA Y CAMBIO DE USO DE LA TIERRA | 7 |
| 3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO | 8 |
| 3.1. <u>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y FUNCIÓN OBJETIVO</u> | 8 |
| 3.2. RESTRICCIONES | 9 |
| 3.2.1. <i>Capacidad del Sistema</i> | 9 |
| 3.2.2. <i>Volumen de los lagos</i> | 10 |
| 3.2.3. <i>Demanda y Oferta de Agua</i> | 10 |
| 3.2.4. <i>Vertido de Agua</i> | 10 |
| 3.3. DATOS Y SUPUESTOS | 10 |
| 3.3.1. <i>Operación del Canal de Panamá</i> | 11 |
| 3.3.2. <i>Actividades económicas</i> | 12 |
| 3.3.3. <i>Hidrología y Meteorología</i> | 12 |
| 3.3.4. <i>Información Adicional</i> | 12 |
| 4. APLICACIÓN DEL MODELO..... | 12 |
| 4.1. RESULTADOS | 13 |
| 4.2. LIMITACIONES DEL ANÁLISIS | 16 |
| 5. CONCLUSIONES..... | 17 |
| 6. BIBLIOGRAFÍA..... | 19 |
| 7. ANEXOS..... | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 7.1. ANEXO 1. CÓDIGO GAMS..... | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| 7.2. ANEXO 2. ESCORRENTÍA Y SU RELACIÓN CON EL CAMBIO DEL USO DE LA TIERRA: MODELOS DE ESCORRENTÍA (POR PATRICIA ZURITA) | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |

Lista de Cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Propuesta en cuanto a cambio del uso del suelo de la Ley 21. | 6 |
| Cuadro 2. Resumen de Datos para el modelo (en Hm3)..... | 9 |
| Cuadro 3. Beneficios por Hm3 de Agua según las distintas actividades. | 11 |
| Cuadro 4. Variantes del Modelo. | 13 |

Lista de Figuras

- Figura 1. Componentes Proyecto Flujos Críticos... **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 2. Resumen de Areas Criticas, Plan de Acción Cuenca Río Tempisque, Costa Rica. Fuente: Echeverría et al. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 3. Estimación de Aspecto, Plan de Acción Cuenca Río Tempisque, Costa Rica. Fuente: Echeverría et al. **Error! Bookmark not defined.**
- Figura 4. Nivel de los Lagos Alajhuela y Gatún por Mes, Caso Base..... 14
- Figura 5. Efecto de las variantes sobre las ganancias anuales de la generación de electricidad y el paso de barcos por el Canal. 14
- Figura 6. Consumo de agua entre usos alternativos, para las distintas variantes.15
- Figura 7. Ganancias Totales según la escorrentía y nivel de población. 16

1. Introducción

1.1. Objetivos del Proyecto

La importancia económica del Canal de Panamá, y su dependencia del recurso agua, hace que el estudio de los aspectos hidrológicos de la Cuenca del Canal sea de gran trascendencia. Recientemente, con la aprobación de la Ley 21 y la transferencia del Canal a Panamá, se inicia una discusión muy importante relacionada con el futuro de la Cuenca. Esta ley hace una propuesta de cambio de uso del suelo que se observa en el Cuadro 1. Es posible notar cambios importantes que no solo implican un costo de transacción sino grandes cambios en términos de la rentabilidad del uso de la tierra y posiblemente los flujos hidrológicos. Vale la pena destacar que la ganadería, que en la actualidad ocupa casi un 40% del área y es extensiva, será prácticamente eliminada y sustituida por ganadería intensiva pero solamente en un 2% del área. Por otra parte, el área forestal y agroforestal que es en la actualidad menos del 1% del territorio de la cuenca, llegaría a cubrir una cuarta parte del mismo.

Cuadro 1. Propuesta en cuanto a cambio del uso del suelo de la Ley 21.

| % Uso Actual (1995) | | % Uso Propuesto para 2020 | |
|--------------------------------|------|--------------------------------|-----|
| Canal de Panamá y lagos | 12% | Canal de Panamá y lagos | 15% |
| Áreas silvestres protegidas | 34% | Áreas silvestres protegidas | 40% |
| Agricultura de subsistencia | 0.5% | Agricultura sostenible | 8% |
| Ganadería extensiva | 39% | Ganadería intensiva | 2% |
| Forestal y Agroforestal | 0.5% | Forestal y Agroforestal | 23% |
| Urbanización e infraestructura | 6% | Urbanización e infraestructura | 12% |
| Bases Militares de EEUU | 8% | Bases Militares de EEUU | 0% |

Fuente: ARI

Esta situación es interesante y se presta para realizar distintos análisis. Una herramienta integrada para la toma de decisiones puede ser muy útil para conocer los diferentes impactos de la implementación de esta ley al nivel global y local. Por ejemplo, determinar los sacrificios económicos que conlleva un cambio de la tierra de un uso a otro y su efecto sobre los otros elementos del sistema. Además, estudiar el impacto de distintos sistemas de manejo de las actividades productivas.

Este es el objetivo final del Proyecto Flujos Críticos en Panamá: producir una herramienta que ayude a los tomadores de decisión a cuantificar el impacto de esas decisiones. La utilización de GAMS (sistema de modelación algebraico generalizado) permite que el modelo sea adaptado con mucha facilidad para responder nuevas preguntas o utilizar diferentes juegos de datos. En este sentido es necesario mencionar que la opinión experta es una fuente importante para mejorar y aumentar la información disponible.

2. Análisis Cuantitativo para el Manejo de Cuencas Hidrográficas

2.1. Modelos cuantitativos

El uso de modelos cuantitativos puede ayudar a anticipar los efectos de las diferentes opciones de política e identificar aquellas que son más beneficiosas o que presentan mayor estabilidad ante la incertidumbre. Como Carpenter et al (1999) lo manifiestan

“modelos de computadora pueden ser utilizados como caricaturas de la realidad que encienden la imaginación, enfocan la discusión, clarifican la comunicación y contribuyen al entendimiento colectivo de problemas y sus soluciones potenciales”.

La mayoría de los esfuerzos existentes a nivel de cuencas hidrográficas tratan acerca de la dinámica hidrológica y contaminación. Algunos ejemplos incluyen ANSWERS (Simulación de respuesta ambiental de cuenca hidrográfica a fuentes no puntuales), SWIM (modelo integrado de agua y suelo) y WASP (programa de simulación para análisis de calidad del agua). Un área muy prolífica de investigación es la asignación del agua entre agricultura y generación hidroeléctrica (Gisser et al. 1979; Houston and Whittlesey 1986; McCarl and Parandvash 1988).

Pocos esfuerzos sin embargo integran la dinámica biológica y física con la conducta económica. Uno de estos es presentado por Costanza et al. (1998) quienes desarrollaron el modelo de paisaje del Patuxent (PLM), un modelo basado en procesos, que tiene el objetivo de evaluar metas para indicadores de la calidad del ecosistema. Otro fue desarrollado por Aylward y Echeverría (1998) y utiliza información hidrológica y económica para explorar los efectos de distintos incentivos sobre la producción de hidroelectricidad y rentabilidad de la ganadería. Fulcher et al (1997) desarrollaron un modelo para evaluar las consecuencias ambientales y económicas de usos alternativos de la tierra usando diversas técnicas.

2.2. Escorrentía y Cambio de Uso de la Tierra

Para el manejo de ecosistemas es imprescindible conocer el efecto de los cambios en el uso de la tierra sobre la distribución temporal y espacial de los flujos de agua. Sin embargo, este tema es uno de los más controversiales en hidrología (Bruijnzeel 1990; Calder 1998; Aylward 2000). Debido a la complejidad de interacciones que ocurren en la cuenca hidrográfica, los efectos que tiene el bosque sobre el ciclo hidrológico son difíciles de discernir. Más aún, por lo general no es posible encontrar registros que sean de largo plazo y que incluyan tanto información de flujos como de uso de la tierra. Hay factores como la geología, estructura del suelo, pendiente y morfología que también intervienen y que cuesta separar.

Cambios en el uso de la tierra provocan cambios en los flujos aguas abajo, sin embargo, la evidencia en cuanto a la dirección y la magnitud de los impactos es ambigua. En el caso de la Cuenca del Canal de Panamá, la opinión de algunos expertos, es que la lluvia es el factor que determina la escorrentía y que probablemente el uso de la tierra tenga un efecto pequeño sobre la misma. Estudios anteriores han tratado de aclarar esta situación (reportes de Intercarib 1996 y Heckadon 1999) pero no de forma definitiva.

Un impacto sobre el que hay mayor consenso es la erosión y la sedimentación. Reducciones de la cubierta forestal exponen el suelo a los elementos y por lo tanto se produce mayor erosión y sedimentación (Bruijnzeel 1990).

Es posible pensar que el bosque natural “produce” menos agua anualmente (debido a mayor evapotranspiración) pero que durante la época seca produce más (debido a mayor infiltración). Este “efecto de esponja”, como se la ha llamado, sin embargo depende del balance entre el cambio en evapotranspiración e infiltración del bosque en comparación al pasto. En el caso de Panamá no hemos obtenido información que respalde el “efecto esponja” del bosque.

Idealmente quisiéramos contar con una matriz **Y**, que nos indique cuanta agua “genera” por mes cada uno de los tipos de uso de la tierra, por unidad de área **a** dada la cantidad

de lluvia. El resultado sería entonces el vector \mathbf{f} que indica el total de agua producida en la cuenca en cada mes por todos los usos de la tierra.

$$[a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] \mathbf{X} \begin{bmatrix} y_{1,1} & \dots & y_{1,12} \\ y_{2,1} & \dots & y_{2,12} \\ \dots & \dots & \dots \\ y_{n,1} & \dots & y_{n,12} \end{bmatrix} = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{12}]$$

Contando con suficientes datos sería posible estimar esta relación de forma empírica, en donde \mathbf{a} y \mathbf{f} son conocidos y \mathbf{Y} se estimaría por medio de análisis de regresión. Sin embargo como se mencionó anteriormente, es difícil encontrar juegos completos de datos que permitan establecer dicha relación. Investigadores alrededor del mundo se encuentran realizando investigaciones en este tema. En el Anexo 3 se incluyen algunos ejemplos.

3. Descripción del Modelo

El análisis pretende promover la discusión y contribuir al proceso de toma de decisiones. Utilizando GAMS como plataforma computacional se desarrolla un modelo flexible para la toma de decisiones en la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá.

Balanceando distintos aspectos se decidió utilizar una escala mensual y realizar el análisis para un período de un año. Aunque las decisiones con respecto al manejo del canal se toman prácticamente minuto a minuto, y ACP cuenta con un departamento que recibe información hidrológica en tiempo real, se considera que para efectos ilustrativos del modelo con una escala mensual es suficiente. Esto además reduce el esfuerzo computacional lo que permite hacer un mayor número de simulaciones.

El modelo es por el momento de tipo ilustrativo: pretende mostrar las consecuencias de distintas decisiones de manejo de la cuenca. Es una simplificación de la realidad y no pretende abarcar todos los aspectos relacionados con el manejo del Canal de Panamá o la Cuenca Hidrográfica.

3.1. Definición del Problema y Función Objetivo

En el caso de Panamá, el modelo desarrollado pretende determinar cual es la combinación de actividades que maximiza la renta total de la Cuenca Hidrográfica del Canal. Se parte de tres actividades básicas que demandan agua: consumo humano, tránsitos por el Canal y generación eléctrica. Los tránsitos por el canal incluyen tres tipos de embarcaciones, correspondientes a las tres tarifas en vigencia: *ladden*, *balast* y *displacement*. Cada actividad genera un beneficio neto distinto por unidad de agua utilizada, que depende de las tarifas y los costos de producción.

Matemáticamente, la función objetivo del modelo puede plantearse como:

$$\max Z = \sum_{t=1}^{12} \left[\sum_{i=1}^n a_{ti} b_{ti} \pm \sum_j^m h a_{ij} r_{ij} \right] \quad \text{donde,}$$

Z = renta total de la cuenca,

a_{ti} = cantidad de agua dedicada en el período t a la actividad i .

b_{ti} = beneficios económicos por unidad de agua utilizada en el período t en la actividad i .

ha_j = hectáreas dedicadas a cobertura j .

R_j = renta de actividad j .

Claramente la cantidad de agua disponible va a depender de la cantidad de lluvia (sobre la que no existe control), geomorfología, permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal del terreno y otros factores. El factor clave, sin embargo, en términos de un ejercicio de optimización es la cobertura del suelo debido a que distintos usos tienen distintas tasas de evapotranspiración, es decir, necesitan diferentes cantidades de agua para su propio desarrollo. En Panamá, la Ley 21 reconoce esta situación y propone cambios en el uso del suelo que supuestamente van a impactar la cantidad y la calidad del agua disponible para ser usada por el canal, la producción de electricidad y el consumo de la población.

Debido a la incertidumbre asociada a la magnitud y dirección del efecto del cambio de uso de la tierra, en este caso se ignora el uso de la tierra. Esto no quiere decir sin embargo que el tema no sea importante y que no deba ser incorporado al modelo en el futuro. Esto hace que la decisión entonces sea simplemente determinar cuánta agua se asigna al canal y cuánta a generar electricidad, debido a que la cantidad que va para las municipalidades es constante. Este tipo de análisis es más útil, por ejemplo, para la Autoridad del Canal de Panamá, específicamente a la Sección de Meteorología e Hidrología, que tiene que decidir cuánta agua dedica a cada uso. El modelo puede servir como una guía adicional, un insumo más en el proceso de toma de decisiones.

Hay que tener presente, sin embargo, que la idea de desarrollar este modelo es contar con herramienta dinámica que pueda perfeccionarse en el futuro. Conforme se realicen nuevos estudios será posible mejorar el sistema de apoyo a las decisiones y aún incluir nuevos aspectos en el proceso, como por ejemplo el tema de urbanización y calidad de agua.

3.2. Restricciones

Claramente la renta que es posible obtener de la cuenca está limitada por una gran cantidad de factores, incluyendo la capacidad de la planta, disponibilidad de tierra, etc. A continuación se presentan las restricciones utilizadas en el modelo con detalle:

3.2.1. Capacidad del Sistema

Tanto el Canal de Panamá como las plantas de producción de electricidad tienen una capacidad de operación limitada: existen límites en cuanto al número de esclusajes y los kilowatt hora que pueden generarse. El Cuadro 2, presenta la capacidad existente en términos de la cantidad de agua que puede ser utilizada por actividad.

Cuadro 2. Resumen de Datos para el modelo (en Hm³)

| | ALAJHUELA | GATUN |
|---|-----------|--------|
| Capacidad de Almacenamiento | 577 | 641 |
| Nivel inicial de los lagos | 577 | 641 |
| Capacidad de Operación del Canal por mes | | 209.27 |
| Capacidad de Operación Plantas Electricas por mes | 260 | 340 |
| Consumo de Agua Urbano por mes | 14.02 | 11.27 |

Debido a que hay barcos que transitan por el canal y que pagan una tarifa preferencial, es necesario también plantear una restricción que “obligue” al modelo a asignar al menos una cantidad de agua a dicha clase de embarcación. En este caso se asigna 31.36 Hm³ and 3.2 Hm³ por mes para los tránsitos de tipo especial.

3.2.2. Volumen de los lagos

La cantidad de agua presente en cada uno de los dos lagos para cada período es igual a la cantidad de agua que había en el período anterior, más el agua que ingresa, menos el agua que se utiliza, menos el agua que se vierte. El agua que ingresa incluye la escorrentía o caudal, que puede depender o no del uso de la tierra.

Hay que distinguir entre Gatún y Alajhuela pues hay varias diferencias entre estos. El agua que se utiliza para producir electricidad en Alajhuela entra en Gatún, por lo que no se pierde, se utiliza dos veces. En cambio, el agua utilizada en Gatún para producir electricidad no se puede utilizar para operar el canal. Los vertidos de Alajhuela alimentan Gatún mientras que los de este último reservorio van al mar.

El nivel inicial de ambos lagos es determinado por el usuario y constituye una restricción adicional al sistema. En caso de utilizar un análisis de años múltiples el nivel al principio del año será igual al nivel existente el año anterior. En esta versión del modelo se supone que ambos lagos inician el año completamente llenos.

3.2.3. Demanda y Oferta de Agua

La demanda total de agua está conformada por: 1) el agua utilizada por el canal para tránsitos de los distintos tipos de barco; 2) el agua utilizada para la generación de electricidad y 3) el agua dirigida hacia las municipalidades para uso urbano e industrial.

La oferta total de agua incluye el agua almacenada al inicio del mes en los lagos Alajhuela y Gatun más el agua que ingresa al sistema por la escorrentía. Como se menciona en la sección anterior es importante recordar que el agua que se utiliza en Alajhuela para producir electricidad ingresa luego a Gatún. Aunque el uso de la tierra posiblemente tiene un efecto sobre la oferta de agua, debido a las diferencias en evapotranspiración entre los diferentes usos, no se considera en este caso debido a la falta de información.

3.2.4. Vertido de Agua

Los excesos de agua en el sistema se convierten en vertidos que se realizan al océano sin ser utilizada para ninguna actividad económica. Esta variable está restringida a ser igual o mayor que cero. Para “decidir” entre almacenar o verter el agua el modelo primero trata de almacenarla (debido a que el almacenamiento tiene un valor positivo en la función objetivo); si no hay espacio para hacerlo entonces se generan vertidos.

3.3. Datos y Supuestos

La información recolectada incluyó datos sobre la operación del Canal de Panamá, datos de uso y cobertura vegetal de la Cuenca del Canal, información sobre los distintos usos del agua y los valores generados por las distintas actividades económicas desarrolladas en el Canal de Panamá. Dada la variedad de los datos y de las fuentes, se escogió el año 1999 como año modelo dado que era el año con que más información se contaba. Para aquella información que carecía de datos para 1999 se utilizaron aproximaciones para completar la información requerida. A continuación se describen las fuentes y estimaciones que se realizaron para cada uno de los elementos.

3.3.1. Operación del Canal de Panamá

Para analizar el valor de una unidad de agua utilizada en la operación del Canal, se colectaron datos sobre el número de tránsitos en el Canal diferenciada por el tipo de embarcación –laden, ballast o displacement- la cantidad de agua utilizada en cada tránsito, el tonelaje transportado por cada tipo de embarcación por año y las tarifas que el Canal cobró por el tránsito de las embarcaciones en el año 1999. La información en su mayoría provino de los reportes anuales de la Autoridad del Canal de Panamá y de las tablas reportadas en el website de la Autoridad del Canal de Panamá (www.pancanal.com).

Basados en el número de tránsitos que la Autoridad del Canal reportó y en virtud de que la cantidad de agua utilizada por tránsito -independiente del tonelaje de la embarcación- equivale al valor de un esclusaje (191,000 m³) (ARI, 1996) se pudo calcular la cantidad de agua utilizada por tipo de embarcación para el año 1999. Relacionando la cantidad de agua utilizada por tipo de embarcación por año y utilizando el tonelaje reportado por la Autoridad del Canal para cada tipo de embarcación se pudo determinar la cantidad de agua utilizada por tonelada de cada tipo de embarcación. Este resultado parcial serviría para determinar el valor pagado por unidad de agua dependiendo del tipo de embarcación.

Utilizando el sistema de tarifas aprobado en 1998 y el Sistema Universal de Arqueo del Canal de Panamá (SUA/CP) según el cual los peajes son fijados en base al Tonelaje Neto del SUA/CP, se pudo determinar el valor que el Canal recibió por unidad de agua. Para efectos de simplificación se utilizó como unidad de agua un Hectómetro cúbico (1,000,000 m³). Luego se deducen los costos de operación y mantenimiento del Canal para determinar la renta generada por una unidad de agua por cada tipo de embarcación.

Adicionalmente de los valores de agua utilizados para el tránsito de embarcaciones a través del Canal, se estimó el beneficio de una unidad de agua utilizada para generar hidroelectricidad. Se utilizaron los datos reportados por la ACP para la generación de energía eléctrica en sus reportes anuales. De la misma manera que para el caso del tránsito de embarcaciones, para la electricidad se determinó el valor por unidad de agua. Para este caso particular se supone que el costo de operación de una planta hidroeléctrica es de \$0.01 por Kwh. La potencia de la Planta de Gatún es de 24 Mw y la de la planta de Madden es de 36 Mw. El precio de venta de energía eléctrica es de \$0.052 por Kwh.

El agua de la Cuenca también provee agua para servicio urbano a las plantas de Chilibre, Sabanitas y Gatún. No se consideró el agua que se utiliza en las plantas de tratamiento del lago Miraflores pues se considera que su escorrentía viene de fuera de los límites de la cuenca del Canal. Utilizando los datos provistos por el IDAAN en cuanto a cantidad de agua provista, tratada, capacidad de tratamiento de las plantas y costo de tratamiento, se determinó el valor de una unidad de agua que se utiliza para la provisión de agua potable a las ciudades de Panamá y Colón. (IDAAN, 1998)

El Cuadro 3 presenta los valores utilizados en el modelo. Valores negativos para barcos vacíos representan una pérdida por Hm³ utilizado en estos. Sin embargo, por compromisos existentes el Canal debe aún así brindar este servicio. El hecho de que el valor por unidad de agua utilizada en generar electricidad en Gatún sea menor que en Alajhuela se debe a la diferencia en la eficiencia de generación entre ambas plantas.

Cuadro 3. Beneficios por Hm³ de Agua según las distintas actividades.

| Actividad | Beneficio neto en \$/Hm ³ de |
|-----------|---|
|-----------|---|

| agua | |
|------------------------------|----------|
| Barcos regulares (laden) | 108,944 |
| Barcos especiales (ballast) | 27,337 |
| Barcos vacíos (displacement) | -145,975 |
| Electricidad Gatún | 2,117 |
| Electricidad Alajhuela | 4,149 |
| Agua para municipalidades | 45,000 |

3.3.2. Actividades económicas

Eventualmente será necesario determinar la renta económica de las distintas actividades que hacen uso del suelo en la Cuenca. No obstante, debido a que el uso del suelo no es una variable de decisión en la versión actual del modelo, las mismas no son consideradas. Los datos de renta agrícola, ganadera y forestal que genere el reporte producido por el Proyecto Mida-Ruta (UTPP 2000) podrán ser una base para este análisis en el futuro.

3.3.3. Hidrología y Meteorología

Para el caso de la escorrentía se utilizó también los datos reportados por ACP. Se supone una producción de agua anual de 3,857 Hm³ para toda la Cuenca.

La escorrentía fue distribuida en los diferentes meses del año proporcionalmente a la precipitación de ocho estaciones meteorológicas que proveían información de precipitación mensual desde el año 1980 hasta el año 2000.

3.3.4. Información Adicional

Insumos adicionales para el componente biofísico en un futuro deberán incluir:

- ∞ Tasas de evapotranspiración e infiltración para cada uso de la tierra, nivel de precipitación y temperatura por sub-cuenca.
- ∞ Índices de biodiversidad para los usos de la tierra.
- ∞ Localización de ecosistemas importantes o críticos, incluyendo ecosistemas de agua dulce como humedales.
- ∞ Tasas de secuestro y almacenamiento de carbono por tipo de uso.

4. Aplicación del Modelo

Con el fin de mostrar la utilidad del modelo, y de forma ilustrativa se presentan a continuación resultados de una aplicación sencilla del mismo. El problema consiste en distribuir el agua entre los usos competitivos respetando las restricciones mencionadas en la Sección 3.2. Se trata de maximizar la renta del sistema, sin considerar aspectos de uso de la tierra.

Esta versión puede ser mejorada mediante la inclusión de información más exacta, pues en algunos casos hubo que recurrir a aproximaciones. Se realiza un caso Base y 8 variantes (V) del modelo según el cuadro siguiente. Parámetros que cambian son únicamente la escorrentía que entra al sistema (lo cual es útil para demostrar el valor del recurso hídrico y conocer posibles consecuencias de eventos climáticos extremos) y la cantidad de agua que es dirigida hacia el consumo urbano (lo cual es útil para conocer el efecto del crecimiento de la población). La escorrentía en el caso base es 3,857 Hm3 y se reduce en 25% y 50% mientras que el consumo de la población se aumenta al doble y al triple (con un crecimiento supuesto del 1.5% esto ocurriría en 50 y 75 años respectivamente).

Cuadro 4. Variantes del Modelo.

| Caso | Escorrentía (Hm3/mes) | Consumo Urbano de Agua (Hm3/mes) |
|------|--------------------------|-------------------------------------|
| Base | 3,857 | 25.3 |
| V1 | 2,893 | 25.3 |
| V2 | 1,928 | 25.3 |
| V3 | 3,857 | 50.6 |
| V4 | 2,893 | 50.6 |
| V5 | 1,928 | 50.6 |
| V6 | 3,857 | 75.9 |
| V7 | 2,893 | 75.9 |
| V8 | 1,928 | 75.9 |

Nota: estas son situaciones hipotéticas con fines demostrativos únicamente.

4.1. Resultados

Alimentando esta información al modelo GAMS (ver código en el Anexo 1) es posible entonces proceder a la optimización del uso del agua en un período de un año. La Figura 1 muestra el comportamiento de los niveles de los dos reservorios que suplen de agua al sistema. El comportamiento es muy similar (aunque no exacto) al observado en la realidad. Durante la época seca disminuye el nivel y durante la húmeda aumenta, para estar prácticamente lleno al final del año. Vale destacar que se incluye una restricción indirecta en el modelo que consiste en un “premio” por cada Hm3 de agua que esté almacenado al final del año en la función objetivo, lo que en la práctica resulta en que ambos lagos estén llenos al final del período. No obstante, y aún con ese premio, cuando el agua es un factor limitante (caso de algunas de las variantes que no se incluyen aquí por razones de espacio) al final del período los lagos no llegan a llenarse por completo.



Figura 1. Nivel de los Lagos Alajuela y Gatún por Mes, Caso Base.

Es interesante comparar la sustitución que ocurre entre generación de electricidad, y el tránsito de barcos cuando cambian la escorrentía y el consumo de agua en las distintas variantes del modelo. Es posible notar que el valor de las reducciones en electricidad es mínimo en comparación con el de las reducciones en las ganancias por tránsito de barcos que ocurren cuando disminuye la cantidad de agua disponible. Al pasar de BASE a V1, cuando se reduce la escorrentía en un 25%, los ingresos por motivo de barcos no se reducen, únicamente se observa una reducción en la electricidad de un poco más de \$1m. (ver Figura 2) La magnitud de los efectos esperados aumenta significativamente cuando la demanda de agua se triplica y se reduce la escorrentía (caso más extremo). La generación de electricidad prácticamente desaparece en V8 y las ganancias derivadas de los tránsitos se reducen en más de \$100m. Esta información demuestra el gran valor económico que tiene el recurso hídrico en la Cuenca del Canal de Panamá.

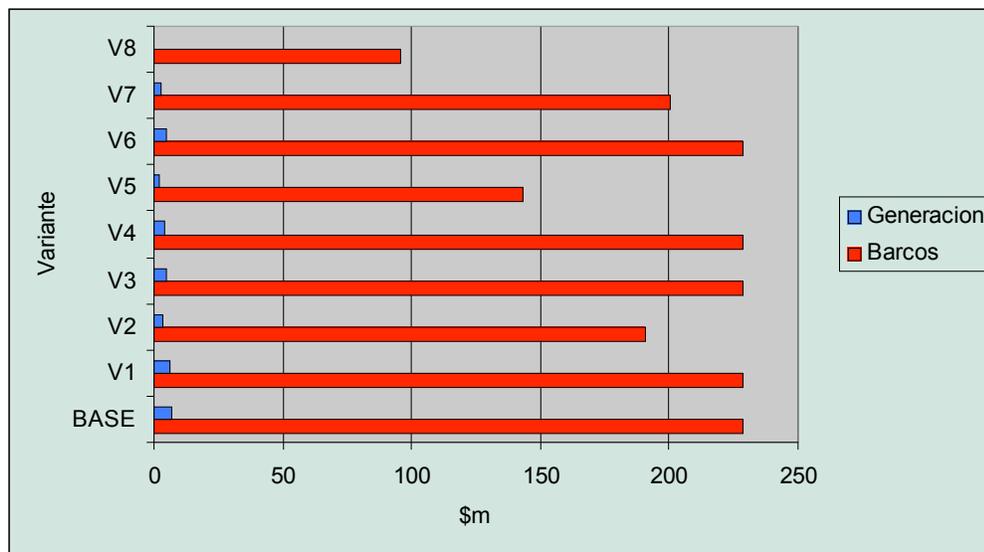


Figura 2. Efecto de las variantes sobre las ganancias anuales de la generación de electricidad y el paso de barcos por el Canal.

En la Figura 2 se mostraba como el grueso de los beneficios económicos provienen de la operación de Canal, la generación de electricidad hace un aporte mínimo en relación al

Jaime Echeverría B. MSc.

Modelo Cuantitativo para el Manejo del Agua en la Cuenca del Canal de Panamá.

total. La Figura 3 muestra en contraste como el consumo de agua para la generación de electricidad y la operación del Canal en los diferentes escenarios es de una magnitud similar. No se incluye en la figura el agua que se utiliza para consumo humano ni para los barcos que pagan tarifa *ballast* o *displacement* debido a que estas son cantidades fijas en cada variante.

Los beneficios del Canal por tránsito de barcos son mucho mayores que los beneficios de generación de electricidad por unidad de agua utilizada. Por ejemplo en el caso Base la producción de electricidad representa un poco más de \$7 millones y usa más de 2,500 Hm³ de agua, el Canal produce más de \$200 m con un poco menos de agua.

Otro aspecto interesante es ver como cuando el Canal alcanza su capacidad operativa (fijada en este caso en 209.27 Hm³/mes) unidades de agua adicionales son utilizadas en la producción de electricidad, que genera un ingreso mucho menor por unidad de agua. Este hecho hace que planes para la posible ampliación del Canal y la construcción de un tercer juego de esclusas tengan mucho sentido. Ampliar el Canal permitirá utilizar el agua en una actividad mucho más rentable. Esto se puede comprobar al comparar el Caso Base con V1 y V3 con V4. En ambas comparaciones la cantidad de agua utilizada para tránsitos es la misma, solo aumenta o disminuye la cantidad de electricidad producida. Esto indica también que reducciones en la cantidad de agua disponible, ya sea por disminuciones en la escorrentía o aumento en la demanda urbana, hasta cierto punto van a repercutir primero en la cantidad de electricidad producida. Mientras no se amplíe el canal, la energía eléctrica que se deje de generar será equivalente al valor del agua cuando esta disminuye moderadamente (casos V1, V3, V4 y V6). Más allá hay que incluir también el beneficio perdido por la disminución en el número de tránsitos, aunque estas son situaciones un poco extremas (V2, V5, V7 y V8).

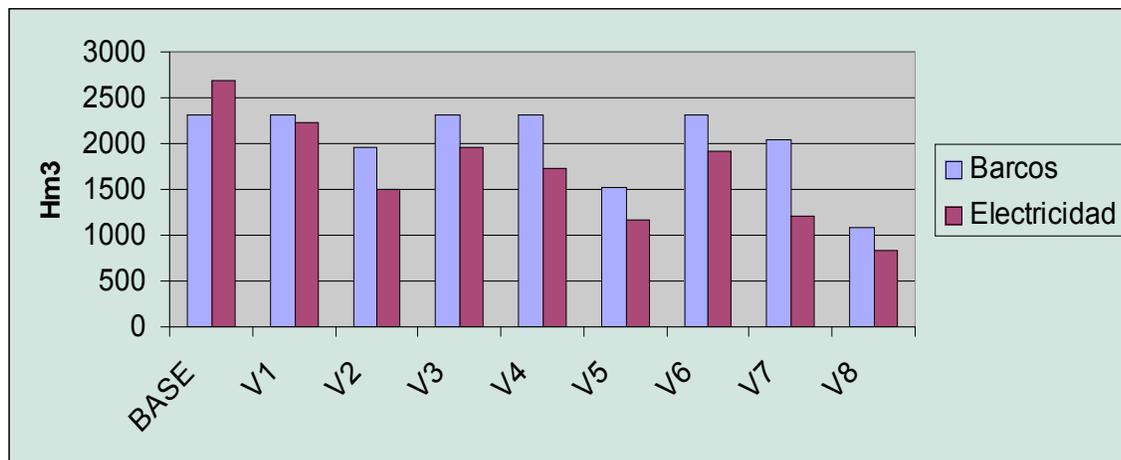


Figura 3. Consumo de agua entre usos alternativos, para las distintas variantes.

Finalmente, y para analizar la situación general en relación a la escorrentía y el crecimiento de la población se presenta la

Figura 4. Esta figura muestra como las ganancias totales disminuyen conforme entra menos agua al sistema lo cual era de esperar. Aunque los casos extremos que se presentan (puntos a la izquierda y hacia abajo en la figura) son poco probables, si son útiles para estudiar el comportamiento del sistema. Cuando el agua es abundante (aprox 4,000 Hm³) y el consumo de agua es igual al actual las ganancias son menores que si la demanda de agua fuera mayor (situaciones con 2x o 3x la población actual, 50.6 o 75.9 Hm³ por mes respectivamente). Esto tiene sentido debido a que mayor cantidad de agua consumida significan mayores ingresos para el sistema y si el agua es abundante no

habrá sacrificio en términos de tránsitos por el Canal. Sin embargo, conforme la cantidad de agua comienza a disminuir, la situación se invierte. Mayor consumo de agua para la población se traduce en disminución de ganancias para el sistema debido a que por la escasez del agua, es necesario realizar un sacrificio en términos del número tránsitos. Esto es sumamente importante, porque tarde o temprano (y hay que recordar que el Canal ha operado por casi 100 años ya), la demanda de agua de la población va a competir directamente con el número de tránsitos por el Canal. Entonces será necesario desarrollar nuevas fuentes de agua para suplir a las ciudades. Si eventualmente se expandiera el Canal, por ejemplo, construyendo un tercer juego de esclusas, esta situación sería todavía mas grave.

No obstante, hay formas de por lo menos atrasar este problema. Aumentando la eficiencia en la distribución y el consumo del agua. Es conocido, y se ha hecho público en la prensa Panameña en los últimos meses, la alta morosidad y las dificultades de cobro que existen en el servicio del agua. Un precio más alto por el agua resulta en una disminución del consumo de agua, debido a que se reduce el desperdicio y aumenta la eficiencia en su uso (tanto en la industria como en el hogar). La eliminación de subsidios al agua, y consecuente incremento en el precio, en muchos países ha resultado en aumentos en la eficiencia de la distribución y el consumo (Johnson, Revenga y Echeverria, 2001). Más aún, parte de los ingresos adicionales podrían dirigirse a actividades de protección de los recursos naturales de la Cuenca Hidrográfica.

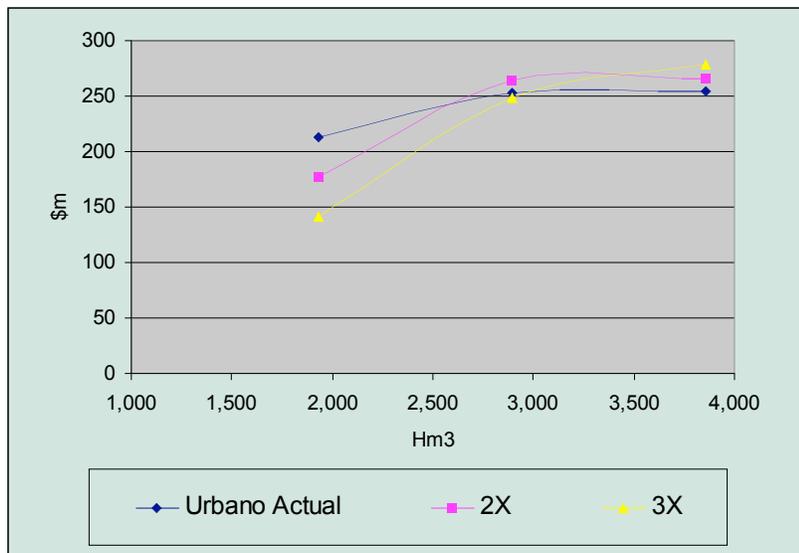


Figura 4. Ganancias Totales según la escorrentía y nivel de población.

4.2. Limitaciones del Análisis

Como se mencionó anteriormente este análisis es de tipo ilustrativo y lo que pretende es plantear situaciones y mostrar el funcionamiento del sistema. La falta de información en cuanto al efecto hidrológico del cambio de uso de la tierra hace que un componente importante no haya sido incluido. Conforme se estudie y se generen nuevos análisis el tema del uso de la tierra y sus impactos sobre la cantidad y calidad de agua para el Canal podrán ser incorporados en esta herramienta para la toma de decisiones. La Ley 21 propone importantes cambios en el uso de la tierra que deben ser valorados muy cuidadosamente y el modelo desarrollado por el Proyecto Flujos Críticos puede ser una base para analizar las distintas opciones disponibles para su implementación.

Para vincular características físicas y biológicas con la dimensión humana del uso de la tierra, es necesario contar con una representación razonable del sistema económico local. El excedente del productor y del consumidor (que miden el bienestar de la sociedad) debe ser calculado para comparar distintas políticas. También es necesario conocer la respuesta de los actores a los diferentes estímulos, lo que puede hacerse utilizando técnicas econométricas. Las siguientes actividades pueden ser consideradas:

- ∞ Determinación de curvas de costo marginal y de demanda para las actividades relevantes y asociados excedentes del productor y consumidor,
- ∞ Incluir valor de las externalidades ambientales de las distintas,
- ∞ Incluir aspectos biológicos de los ecosistemas. Captura de carbono, biodiversidad son solo dos de estos. Eventualmente, al incluir parámetros de este tipo se podrán conocer los impactos que las distintas políticas van a tener sobre estos aspectos de tanta importancia.
- ∞ Estimación de la elasticidad de la demanda por agua. La respuesta de los usuarios del agua a cambios en el precio debe ser establecida para poder evaluar políticas que consideran estos cambios,
- ∞ Determinación de los costos y beneficios de prácticas de uso de la tierra que podrían adoptarse como parte de una estrategia de manejo de la cuenca.
- ∞ Análisis de opciones de política económica. Instrumentos económicos que pueden ser probados incluyen tarifas de agua, bonos, impuestos, permisos transables y pago de servicios ambientales como almacenamiento de carbono, protección de recursos biológicos y belleza escénica.

5. Conclusiones

La falta de información y herramientas adecuadas, que permitan vincular la dinámica económica y ecológica, es citada con mucha frecuencia como una causa que impide el manejo adecuado de los recursos naturales. Desde políticas equivocadas hasta decisiones en el campo que no promueven una buena administración de los recursos hídricos en las cuencas hidrográficas. El desarrollo de herramientas para el apoyo de las decisiones es por lo tanto un paso en la dirección correcta. El integrar el ámbito económico con el ecológico y el social, sin duda, resulta siempre en mejores decisiones y mayor bienestar para la población.

La Cuenca del Canal de Panamá cuenta con una gran cantidad de datos ambientales que se prestan para ser utilizados en la toma de decisiones. El Programa de Monitoreo de la Cuenca, por ejemplo, ha logrado documentar muchos aspectos ambientales de importancia mientras que los registros de ACP son de los más completos del mundo en hidrología. No obstante, aún hace falta una herramienta de apoyo a las decisiones que sea dinámica y que permita analizar políticas y decisiones relacionadas con los recursos naturales de la cuenca. Un sistema de este tipo, como el modelo desarrollado por el Proyecto Flujos Críticos, permitirá cuantificar los impactos ambientales y económicos de cambios en el uso de la tierra, producción de energía con fuentes renovables incluyendo energía eólica, y el manejo del agua. El uso de modelos cuantitativos facilita este proceso y la implementación de un enfoque de ecosistemas.

No obstante lo anterior, no es posible descontar el valor de la experiencia de las personas que día a día toman decisiones en cuanto al manejo del agua. La intuición del personal muchas veces produce mejores resultados que cualquier modelo de computación. Por esta razón hay que ser realistas y reconocer que las herramientas cuantitativas deben ser *un insumo más* en el proceso de toma de decisiones. Estas pueden contribuir a ampliar el rango de posibles decisiones a ser consideradas por el administrador, y a demostrar las consecuencias de las mismas. Pero no se debe subvalorar el criterio experto.

Aunque existe potencial para la optimización del sistema, debido a la gran importancia económica del Canal, cualquier decisión debe ser realizada con suma prudencia. El principio precautorio debe ser guía por lo que cambios asociados a un nivel alto de incertidumbre deben ser descartados.

La capacidad actual del canal (tanto en términos del tamaño de los barcos que cruzan como la cantidad de tránsitos) hace que las últimas unidades de agua que entran al sistema no sean tan valiosas como lo serían si esta capacidad aumentara. Los beneficios de generar electricidad en la Cuenca del Canal son pocos cuando se compara con los del Canal, más aún si se toma en cuenta la cantidad de agua necesaria para generarla. En otras palabras, cuando entra menos agua en el sistema el efecto económico se observa en menor cantidad de electricidad generada, que como se menciona en la sección de datos del modelo, genera una renta mucho menor que la generada por el tránsito de barcos.

Si lo que se quiere es que el agua sea utilizada en su uso más rentable, entonces es posible especular un poco y proponer algunas ideas. Por un lado sería posible podría pensarse en aumentar la capacidad de tránsitos del Canal por unidad de tiempo (lo cual ya se está haciendo por ejemplo con la ampliación del corte Culebra y locomotoras más veloces). El agua necesaria para este incremento en actividad del Canal es la que se habría utilizado en generar electricidad. Básicamente, se sustituiría electricidad por tránsitos.

Hay que tomar en cuenta también que cada cierto tiempo, el exceso de agua es tal que es necesario verterla al mar. Esto hace pensar en la posibilidad de aumentar la capacidad de almacenamiento de agua en la Cuenca Hidrográfica del Canal, propiamente dicha. De esta manera esa agua sería aprovechada y contribuiría a suplir la demanda. Aplicaciones futuras del modelo, podrían tener como objetivo minimizar la cantidad de agua que entra al sistema y no es aprovechada. Es decir, manejar los recursos hídricos de tal manera que se minimice el desperdicio de agua.

Planes existentes para ampliar el Canal y construir un tercer juego de esclusas le dan aún más peso al argumento anterior.. El recurso agua será aún más valioso y la producción de electricidad tendrá un costo de oportunidad mucho mayor. En la actualidad se está discutiendo en Panamá el tema de la ampliación de la Cuenca del Canal hacia el Oeste, así como transferir agua desde la misma. Sería posible entonces más bien producir electricidad en la Cuenca Oeste, y aumentar la capacidad de almacenamiento en la Cuenca del Canal (la tradicional)? Un modelo cuantitativo de este tipo ciertamente podría ayudar a valorar estas decisiones.

La eficiencia en la distribución y el cobro del agua, así como la determinación de un precio correcto para la misma puede ayudar mucho a atrasar el aumento en la demanda. Como se observó en algunas de las variantes del modelo, la presión para suplir de agua a la población tarde o temprano reducirá las posibilidades de efectuar tránsitos por el Canal. Por esta razón, una disminución en la cantidad de agua que se necesita para suplir la demanda urbana tendrá grandes beneficios. Un precio correcto del agua, implica también

el costo de proteger la cuenca hidrográfica debido a que cuando se reduce la calidad del agua, debido al deterioro de la cuenca, los costos de tratamiento serán mayores.

El diseño e implementación de estos instrumentos requerirá de la participación amplia de los sectores involucrados. La Comisión Interinstitucional de la Cuenca Hidrográfica del Canal (CICH) es un foro ideal para este tipo de diálogo debido a su rango legal y que incluye a diversas agencias relevantes. Sin embargo es necesaria también la participación de grupos de la sociedad civil, el sector privado y otros. La continuación de este trabajo por los que verdaderamente se beneficiarán de un manejo racional e integral de los recursos naturales de la cuenca hidrográfica y su aplicación en la toma de decisiones será el indicador de éxito del Proyecto Flujos Críticos en Panamá.

6. Bibliografía

Autoridad del Canal de Panamá. 2000. Informe Annual.

Autoridad del Canal de Panamá. Estadísticas de tránsito. 2000.
<http://www.pancanal.com/esp/index.html>

Aylward, B. and J. Echeverría. 1998. Market and Policy Incentives for Livestock Production and Watershed Protection in Arenal, Costa Rica. *CREED Working Paper Series*. London: International Institute for Environment and Development and Institute for Environmental Studies, Free University Amsterdam.

Aylward, Bruce. 2000. Economic Analysis of Land-use Change in a Watershed Context. presented at the *UNESCO Symposium/Workshop on Forest-Water-People in the Humid Tropics*, Kuala Lumpur, Malaysia, July 31 –August 4.

Bruijnzeel, L. A. 1990. *Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: A State of Knowledge Review*. Paris: International Hydrological Programme of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

Calder, I. R. 1998. *Water-Resource and Land-Use Issues*. Swim Paper 3. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute.

Carpenter, S., W. Brock, and P. Hanson. 1999. Ecological and social dynamics in simple models of ecosystem management. *Conservation Ecology* 3(2): 4: [online] URL:
<http://www.consecol.org/vol3/iss2/art4>

Costanza, Robert, Nancy Bockstael, Claudia Binder, Roelof Boumans, Tom Maxwell, Ferdinando Villa, Alexey Voinov, Helena Voinov, Lisa Wainger, Steve Walters. 1998. Progress Report: Integrated Ecological Economic Modeling and Valuation of Watersheds. Institute for Ecological Economics, University of Maryland, Center for Environmental Science.

Costanza, Robert, Ralph d'Arge, Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, José Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, and Marjan van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital." *Nature* 387: 253-260.

Daily, G.C. (ed.) 1997. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC.: Island Press.

Echeverría, J.; M. Hanrahan and R. Solórzano. 1995. *Valuation of non-priced amenities provided by the biological resources within the Monteverde Cloud Forest Preserve, Costa Rica*. "Ecological Economics". Vol 13.

Echeverria, Jaime. 1999. *Plan de Accion para la Cuenca del Rio Tempisque*. Centro Cientifico Tropical. San Jose, Costa Rica.

Freeman, A. Myrick III. 1997 On Valuing the Services and Functions of Ecosystems. In *Ecosystem Function & Human Activities: Reconciling Economics and Ecology*, edited by David Simpson and Norman L. Christensen, Jr. New York, NY: Chapman & Hall. 241-254.

Fulcher, Chris, Tony Prato and Yan Zhou. 1997. Economic and Environmental Impact Assessment Using a Watershed Management Decision Support Tool. ESRI User Conference Proceedings. Environmental Systems Research Institute, Inc.

Gisser Micha, R. Lansford, W. D. Gorman, B. J. Creel and M. Evans. 1979. Water Trade-Off Between Electric Energy and Agriculture in the Four Corners Area. *Water Resources Research* 15(3): 529-538.

Grumbine,, R. Edward. 1997. Reflections on "What is Ecosystem Management." *Conservation Biology*. 11(1): 41-47

Heckadon Moreno, Stanley, Roberto Ibáñez D. and Richard Condit (eds.). 1999. *La Cuenca del Canal: deforestación, urbanización y contaminación*. Panamá: Smithsonian Tropical Research Institute, US AID and ANAM.

Houston, J. E., N. K. Whittlesey. 1986. Modeling Agricultural Water Markets for Hydropower Production in the Pacific Northwest. *Western Journal of Agricultural Economics* 11(2): 221-231.

IDAAN. 1998. Compendio de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados. Plantas Potabilizadoras.

Intercarib S. A. Nathan Associates Inc. 1996. Plan Regional para el Desarrollo de la Región Interoceánica: Plan de Usos del Suelo y los Recursos Naturales de la Región Interoceánica.

Johnson, N. and B. Cabarle. 1993. *Surviving the Cut: Natural Forest Management in the Humid Tropics*. Washington, DC.: World Resources Institute.

Johnson, N. and D. Perrot-Maitre. 2001. *Financial Mechanisms for Managing Water-Related Ecosystem Services*. Washington, DC.: Forest Trends and World Resources Institute.

Johnson, N., C. Revenga and J. Echeverría. 2001. Managing water for people and nature. *Science*. May 11, 2001.

Kahn, James R. 1995. *The Economic Approach to Environmental and Natural Resources*. Forth Worth: The Dryden Press.

McCarl Bruce A. and Gholam Hossein Parandavash. 1988. Irrigation Development versus Hydroelectric Generation: Can Interruptible Irrigation Play a Role? *Western Journal of Agricultural Economics* 13(2): 267-276.

Jaime Echeverria B. MSc.

Modelo Cuantitativo para el Manejo del Agua en la Cuenca del Canal de Panama.

Oficina de Proyectos Especiales Sostenibles. 1995. Proyecto de Reforestación. Autoridad de la Región Interoceánica.

Panama Legislative Assembly. Ley No. 21: Plan Regional para el Desarrollo de la Región Interoceánica y el Plan General de Uso, Conservación y Desarrollo del Área del Canal. Official Gazette 23, 323 (July 2, 1997): 1-21. Panamá: Órgano del Estado.

Repetto, R. and M. Gillis. 1988. *Public Policies and the Misuse of Forest Resources*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Unidad Técnica de Preparación de Proyecto (UTPP). 2000. Proyecto MIDA-RUTA (BM-FAO): Manejo Sostenible de áreas rurales de la Cuenca Hidrográfica del Canal de Panamá. Encuesta socioeconómica rural.