



Kurú: Revista Forestal (Costa Rica) 5 (13), 2008

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos

Julio C. Calvo Alvarado ¹
Jorge A. Jiménez R. ²
Eugenio González ²
Francisco Pizarro ²
Alejandro Jiménez ³

Resumen

El Río Tempisque, Guanacaste-Costa Rica, fue seleccionado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) como un caso estudio para demostrar la importancia de la determinación de caudales ambientales y su relación con el adecuado uso de los recursos hídricos. Para eso se conformó una base de datos hidrometeorológicos y de concesiones de agua para establecer el impacto del uso del agua en riego, consumo humano y agroindustrial en los caudales del Río Tempisque. Para evaluar las necesidades de agua para la ecología se seleccionaron dos especies acuáticas: el pez guapote (*Parachromis dovii*) y el cocodrilo (*Cocodylus acutus*). Se emplearon 26 perfiles del canal principal del río para evaluar con el programa Hec-Ras, el efecto de diferentes caudales ambientales propuestos en las características hidráulicas, tales como la profundidad del agua. El estudio propone tres caudales ambientales: máximo, promedio y mínimo; cada uno fue evaluado contra el escenario actual y los requerimientos del hábitat de las especies acuáticas seleccionadas. En términos generales, los caudales propuestos son más aceptables que el escenario actual, que es muy degradante. Finalmente, los caudales ambientales propuestos, pueden establecerse si el Departamento de Aguas del Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), renegocia las concesiones actuales y conduce un plan para restituir agua en el río, tomándola de sistemas de riego cercanos o ríos vecinos que tienen excedentes de flujos durante la estación seca.

Palabras clave: Caudales ambientales, Caudales ecológicos, Caudales de reposición, Río Tempisque, Guapote, *Parachromis dovii*, Cocodrilo, *Cocodylus acutus*, Planificación de recursos hídricos, Costa Rica.

Abstract

Determination of environmental flows for the Tempisque River, Costa Rica: The hydrological approach with limited data. The Tempisque River, Guanacaste-Costa Rica, was selected by the International Union for Conservation of Nature (IUCN) for a case study to demonstrate the importance of establishing environmental flows and its relationship with the wise use of water resources. To do this a hydro-meteorological

¹ Instituto Tecnológico de Costa Rica. jucalvo@itcr.ac.cr.

² Organización para Estudios Tropicales

³ Unión para la Conservación de la Naturaleza UICN-ORMA:

and water withdraw permits data base was prepared to determine the impact irrigation, human and agro-industry water used on the flows of the Tempisque River. To evaluate the ecological water needs we chose two aquatic species; the fish known as guapote (*Parachromis dovii*) and the cocodrile (*Cocodrylus acutus*). Twenty six river channel profiles were used to evaluate the effect of different proposed environmental flows on the channel hydraulic properties, such as water depth, using the Hec-Ras software. The study proposed three environmental flows: maximum, average, minimum and each one was evaluated against the current scenario and selected aquatic species habitat requirements. The proposed environmental flows are more acceptable in terms of habitat conservation than the current scenario which is very degrading. Finally the proposed environmental flows can be set if the Costa Rican water authority re-negotiates the current water withdraw permits and launch a plan to compensate the Tempisque River flows by withdrawing water from nearby irrigation projects and watersheds that have a surplus of flows during the dry season.

Key words: Environmental flows, Ecological Flows, Tempisque River, Rainbow Bass, *Parachromis dovii*, Crocodile, *Cocodrylus acutus*, Water resources planning, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

En el año 2004, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) unió esfuerzos con la Organización para Estudios Tropicales (OET) para desarrollar un estudio de caso a nivel centroamericano, con el fin de ilustrar la importancia de establecer caudales ambientales en la planificación de los recursos hídricos. Fue así como se desarrolló el primer estudio a nivel regional en la cuenca del Río Tempisque (CRT), la cual tiene una extensión de 594 000 ha, que corresponde a un 12% del territorio nacional y a un 60% de la provincia de Guanacaste (Jiménez y González, 2001). Esta cuenca encierra una diversidad de ambientes naturales, agrícolas e industriales, lo que crea un paisaje de gran complejidad y riqueza. Las actividades económicas como el turismo, la agroindustria (ingenios, plantas de empaque, etc.), los cultivos de caña, melón y arroz de esta cuenca, dependen fuertemente del recurso hídrico, dado que la región presenta una estación seca prolongada entre los meses de diciembre y abril. Por otro lado, las aguas residuales de estos sistemas de consumo contienen contaminantes que terminan en el Golfo de Nicoya, el cual es un gran estuario que mantiene una de las pescas artesanales más importantes del país. Consecuentemente, la selección de la CRT para realizar un estudio de caso no podría ser más acertada, pues es donde se presentan los mayores conflictos entre usuarios del recurso hídrico y la conservación del ambiente a nivel nacional.

Este artículo resume el abordaje metodológico empleado para estimar el caudal ambiental del Río Tempisque, con especial énfasis en el enfoque hidrológico (Calvo-Alvarado, 2004). El objetivo del artículo no es describir la problemática de la cuenca o los conflictos del recurso hídrico, el propósito más bien es el de ilustrar los pasos seguidos para resolver un problema en un escenario en poco tiempo de trabajo (seis meses aproximadamente) y de escasa información hidrológica/ecológica detallada. Por esta razón, este estudio se asemeja a la realidad de muchas cuencas de la región centroamericana, donde se carece de información hidrológica/ecológica detallada y no se cuenta con los recursos y el tiempo necesario para el desarrollo de estudios, que permitan generar información para la toma de decisiones.

2. MARCO CONCEPTUAL DEL ESTUDIO

En muchas partes del mundo, el crecimiento de la población ha provocado una disminución de disponibilidad de los recursos hídricos por consumo y contaminación. Durante el Siglo XX, la población mundial creció cuatro veces, hasta llegar a 6 billones de personas. La extracción del agua creció ocho veces, lo cual causó una crisis del recurso en algunas partes del planeta, que motivó a políticos y planificadores a explorar estrategias para un manejo sostenible de este precioso recurso (Gleick, 2000; IUCN, 2000).

En busca de satisfacer las demandas de agua de la sociedad, las necesidades de las especies y de los ecosistemas fluviales quedan usualmente relegadas. Esta manera de accionar genera una serie de consecuencias trágicas que comprometen la integridad de los servicios y productos de estos ecosistemas (Figura 1) (IUCN, 2000; IUCN, 2003; Richter *et al*, 2003).

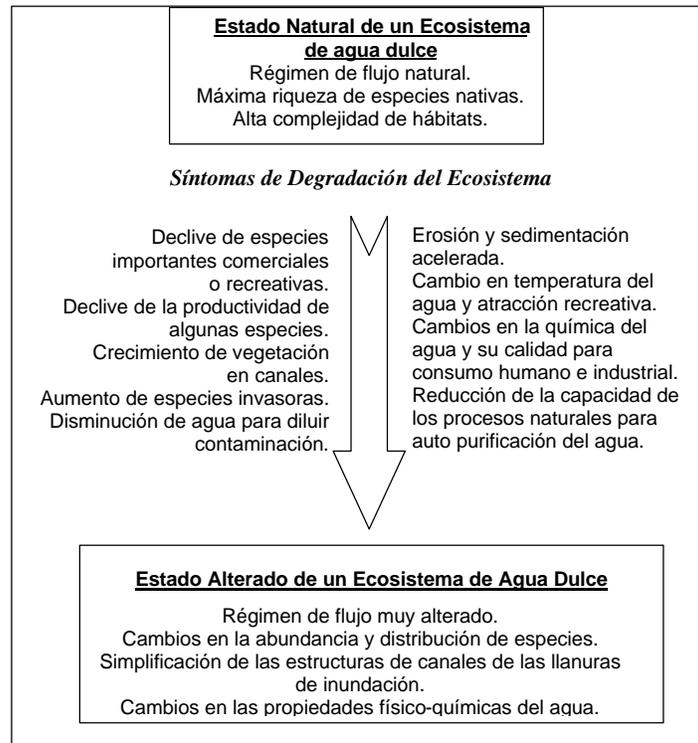


Figura 1. Comparación entre el estado natural y alterado de un ecosistema acuático de agua dulce (adaptado de Richter *et al*, 2003).

Por esta razón, se debe poner límites a la cantidad de agua que se extrae de los ríos, lagos y otros ecosistemas de aguas dulces, antes de degradar sus funciones naturales, su productividad, servicios y productos que estos ofrecen a la sociedad. Los planificadores están concientes de que deben proteger las especies y ecosistemas en peligro de extinción, así como la calidad del agua para los diferentes usos. Además, los planificadores son concientes de que enfrentan cambios sociales que apuntan a una mayor conciencia en la protección de la ecología. Consecuentemente, es imperativo integrar las necesidades sociales y ecológicas del agua para evitar las crisis y la degradación ecológica.

Richter *et al* (2003), proponen un enfoque para el desarrollo de programas de manejo ecológico- sostenible del agua, con el cual las necesidades de la sociedad se pueden satisfacer y a la vez se mantiene la integridad de los ecosistemas acuáticos. Este enfoque se resume en seis pasos esenciales que se presentan en la Figura 2. El enfoque mencionado se ha considerado como la base conceptual para definir el caudal ambiental del Río Tempisque. En términos generales, al tratar de conservar un caudal ambiental en una cuenca específica, se está tratando de asegurar la suficiente cantidad de agua, con los parámetros físico-químicos y biológicos de calidad de agua y un régimen de flujos apropiados para satisfacer a todos los usuarios. De acuerdo con Jiménez *et al* (2005) y Baeza y García de Jalón (2004), los caudales ambientales buscan mantener el carácter, extensión y condición de los hábitats acuáticos y riparios, de forma que sean los apropiados para mantener poblaciones bióticas viables y los procesos ecológicos, que a la vez aseguren los bienes y servicios que la sociedad recibe del ecosistema.

3. OBJETIVO GENERAL, ALCANCE Y LIMITACIONES

El objetivo general del estudio es analizar y generar información hidrológica del Río Tempisque que sirva de base para apoyar el proceso de definición de caudales ambientales.

El estudio por tanto, está enfocado a abordar los tres pasos principales para describir el problema de caudales ambientales según lo establecido en la Figura 2. No obstante, se debe reconocer que se enfrentan varias limitaciones desde el punto de vista de calidad y disponibilidad de información hidrológica, sobre ecología de poblaciones de especies acuáticas/riberañas y de sus requerimientos ecológicos. Así mismo, hay limitaciones en cuanto a la contabilización del uso del recurso hídrico dentro del área de estudio, que permita una mejor aproximación de las incompatibilidades de uso del agua, tanto desde el punto de vista espacial como temporal.

Consecuentemente, el alcance de este estudio está restringido por las limitaciones de cantidad y calidad de información disponible. Adicionalmente, hay que apuntar que el estudio enfrentó limitaciones de disponibilidad de tiempo y recursos; por lo tanto, no fue posible cubrir con gran detalle todos los aspectos necesarios para un estudio completo final. Se dispuso básicamente de seis meses para coleccionar y procesar información disponible por parte de un equipo reducido de expertos. Sin embargo, dado que estas limitaciones son las mismas que se comparten en la región, este estudio se constituye en un ejemplo de cómo enfrentar el problema empleando creativamente la información disponible.

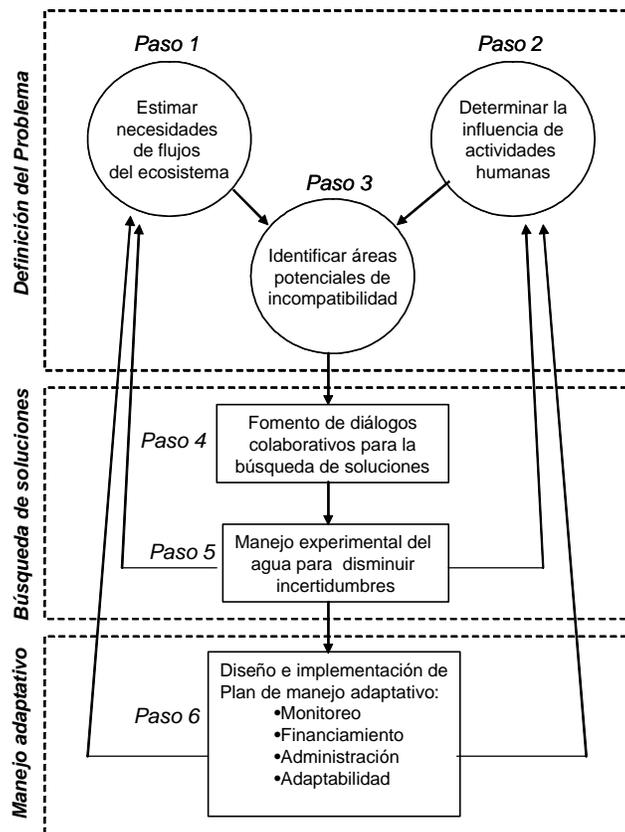


Figura 2. Enfoque para el manejo ecológico sostenible del agua. (Adaptado de Richter *et al*, 2003).

4. METODOLOGÍA

La determinación del caudal ambiental se realizó empleando datos hidrológicos y batimétricos disponibles de un tramo del cauce del Río Tempisque, así como información sobre los requerimientos de hábitat y las características biométricas de las dos especies acuáticas seleccionadas. Con estos datos e información, se aplicó un enfoque tipo hidro-biológico para determinar varios escenarios de caudal ambiental para el tramo del río a partir del Punto Guardia (Figura 3 y Figura 8a). Debe indicarse que desde este punto la extensión de la cuenca es de casi un 25% de la sub-cuenca del Río Tempisque. El tramo escogido discurre por llanuras aluviales y consecuentemente los flujos de agua pierden velocidad y presentan meandros que amplían el ancho del río hasta 70 m (Figura 8b). El tramo escogido no recibe aportes de otras corrientes naturales o canales, debido a que en ambos lados, otros canales naturales o artificiales capturan la escorrentía superficial y la descargan aguas abajo del Punto La Guinea (Figura 3). Además, en este tramo el canal principal tiene diques naturales (aumentados artificialmente para contener las inundaciones) en ambos lados, que impiden la entrada de flujos de agua superficial.

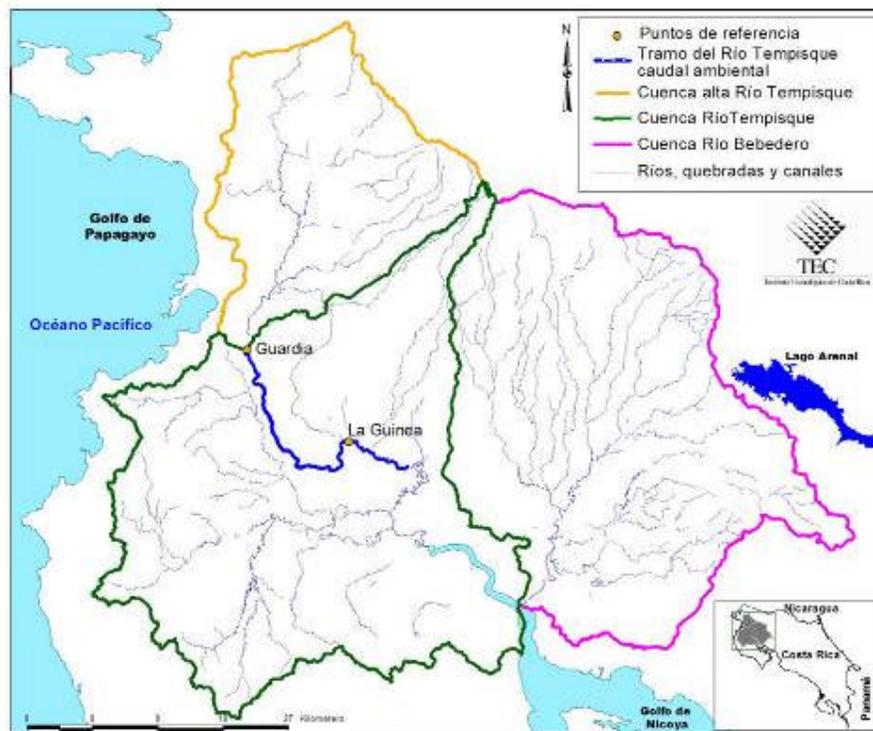


Figura 3. Cuenca del Río Tempisque y ubicación del área de estudio. Costa Rica.

4.1 Componente biológico

La disponibilidad de la información sobre las especies de la zona y el conocimiento de los requerimientos de hábitat que fueran fácilmente relacionadas con niveles de caudal del río, estuvieron dentro de las principales criterios de escogencia de las especies acuáticas (Cuadro 1). Con base en ello, se seleccionaron el pez guapote (*Parachromis dovii*) y el cocodrilo (*Cocodrylus acutus*). *P. dovii* prefiere aguas de poca corriente, requiere territorios de desove asociados a pozas y a cuevas en troncos, o en los bancos del río con profundidades de hasta 1 m por 0.6 m de alto. La época de desove es continua en el año, pero con un fuerte pico en la estación seca, justo cuando el río soporta las mayores extracciones de agua para riego y otros usos (Pizarro, 2004). Según Pizarro (2004), la disponibilidad de hábitat para los estados de cocodrilos juveniles mayores, subadultos y adultos, a lo largo del río, es fundamental para la distribución de la especie; los juveniles llegan a desplazarse hasta 13 km de su sitio de

nacimiento. Los subadultos y adultos se establecen en sitios protegidos y de aguas profundas. Debido a su talla, esta especie requiere que las pozas del río estén interconectadas para asegurarse su desplazamiento y alimentación. Durante el periodo de reproducción, que coincide con la estación seca, la especie requiere de pozas de hasta 1,1 m de profundidad. La preferencia de territorios de las hembras reproductoras está fuertemente influenciada por la disponibilidad de hábitat de anidación (bancos de arena del río y pozas).

Cuadro 1. Características biológicas y de hábitat de *Parachromis dovii* y *Cocodyrus acutus*. Estudio de caudales ambientales del río Tempisque, Costa Rica.

Características biológicas	Requerimientos de hábitat
<i>P. dovii</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Longevidad: 8-10 años. - Longitud: 450-500mm. - Peso: hasta 7 kg. - Primera maduración: H-134-142mm (7.6 meses), M-144-154mm (8.3 meses). - Alimentación: peces, insectos, micro crustáceos. - Desova todo el año con un pico en época seca. - Las crías dejan a las madres cuando tienen 3 cm. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevaciones: 0-600 m. - Temperatura: de 21-37°C. - Aguas de poca corriente. - Territorio de desove: zonas con cuevas en rocas, troncos caídos o bancos del río. - Prefiere pozas por profundidad y presencia de refugios. - Cuevas de reproductores: 55,0 ± 31,1cm de ancho, 72,5 ± 34,0 cm alto, 87,5 ± 9,6 cm de profundidad. - Profundidad mínima para la reproducción >1,0m.
<i>C. acutus</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño: hasta de 3,5 m. - Edad reproductiva entre los 6-10 años (> 2,3m longitud). - Ovipositan en promedio 20 huevos/año. - La reproducción se inicia en marzo. - La eclosión ocurre entre 80 y 90 días después de la puesta (mayo-junio). - La madre guía los neonatos durante las primeras semanas de vida. 	<ul style="list-style-type: none"> - A finales de la época seca migran río arriba por sitios de anidación. - Taludes que permitan la construcción de cuevas o túneles. - Áreas arenosas, protegidas por maleza, donde puedan construir los nidos. - Disponibilidad de alimento todo el año. - Pozas con profundidad mayor a 1.1 m para reproducción. - Requieren pozas como refugios y sitios de copulación. - Se desplazan con flujo de los cuerpos de agua.

Adaptado de: Pizarro, 2004.

4.2 Requerimientos de hábitat relacionados con el caudal

Un aspecto fundamental del estudio fue relacionar los volúmenes de caudal con los requerimientos de hábitat de las especies seleccionadas (Cuadro 1). De esta forma, se consideró que el parámetro más crítico para establecer las relaciones es el nivel o profundidad del río, dado que este es el que mejor define la calidad del hábitat de las especies (nivel de pozas, desplazamiento, conectividad, tamaño de cuevas). En el caso de cocodrilos, la formación de pozas es indispensable para mantener refugios y sitios de cópula para los cocodrilos adultos durante la estación seca. La profundidad mínima del agua para mantener las condiciones adecuadas de los individuos reproductores se definió en 1,1 m. De acuerdo con las características morfométricas de *P. dovii* y de *C. acutus*, y de la relación predador-presa, así como de los requerimientos de hábitat como refugio, alimentación, reproducción y desplazamiento, se sugiere un caudal ambiental que mantenga al menos profundidades de 1,1 m. en las áreas de pozas y una continuidad a lo largo del río mayor a 60 cm de profundidad, sobre todo durante la estación seca, justo cuando el caudal es afectado sensiblemente por la extracción de agua para riego, turismo y la agroindustria. Un nivel de al menos 60 cm permitiría el desplazamiento de ambas especies a lo largo del río.

4.3 Información hidrometeorológica y batimétrica disponible

Para este estudio se empleó la serie mensual de caudales diarios mínimos, medios y máximos en m³/seg, colectados por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) en la Estación Guardia para los períodos 1951-1969 y 1980-1999 (datos tomados del estudio de JICA, 2002). El área seleccionada tiene varias estaciones meteorológicas con registros de lluvia para diferentes períodos y consistencia de datos. Arias (2001), realizó una homogenización de datos para todas las estaciones para el período 1978-2000. La limitante de esta base de datos es que la misma no se extiende hasta el año 1951, fecha en que se inicia el registro de caudales en la Estación Guardia. Por lo tanto, fue preciso hacer una extensión de los datos de lluvia media anual para el área de estudio hasta corresponder con los datos de caudales, de manera que se pudiera realizar un análisis de doble masa entre lluvia media y escorrentía media anual. Entre las estaciones de lluvia dentro del área de estudio se escogió la Estación Llano Grande-Liberia, la cual tiene el mayor período de registro y mejor consistencia de datos, con una serie de datos casi completa desde 1953. Luego se procedió a estimar la lluvia media mensual de la cuenca empleando todas las estaciones disponibles (1978-2000) y se obtuvo la relación de la lluvia media mensual de la cuenca con los datos de lluvia media mensual de la Estación Llano Grande para el mismo período. Esta relación se aplicó a todo el registro de la Estación Llano Grande para el período 1953-2000, logrando así la extensión de datos de lluvia media anual y mensual de la cuenca.

Para determinar el efecto de diferentes caudales en las características hidráulicas del canal principal y el hábitat de las dos especies acuáticas seleccionadas, se utilizó la información de 26 perfiles topográficos transversales ubicados en el tramo seleccionado del canal principal del río Tempisque (Figura 8a). Estos perfiles fueron levantados por JICA (2002). Finalmente se recolectó información sobre las concesiones de agua otorgadas en de área de estudio por el Departamento de Aguas del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). La información requerida fue: la ubicación espacial de cada concesión, el volumen de agua concesionado, el uso reclamado y la fecha de inicio de la explotación. Esta base de datos se utilizó para hacer estimaciones de volúmenes de agua extraídos directamente del río Tempisque o de sus afluentes.

4.4 Caracterización del régimen de caudales del río Tempisque

Con los datos de caudal medio, mínimo y máximo diario en m³/seg del río Tempisque para los dos períodos disponibles, se realizó un análisis estadístico simple incluyendo el promedio, la desviación estándar, los valores máximo y mínimo y los valores correspondientes para un intervalo de confianza del 95%.

4.5 Impacto del aprovechamiento de los recursos hídricos en el régimen de los caudales del río

Para el río Tempisque es conocido que el aprovechamiento de agua para diferentes usos ha sido un proceso que ha venido en aumento desde los años 80, dado que el uso de la tecnología del riego no era común antes de 1980. Por consiguiente, se decidió comparar los regímenes de caudales de los dos registros de caudales disponibles para determinar si han existido cambios entre ambos períodos. De esta forma, se asumió que en el primer período (1951-1969), el aprovechamiento de agua para riego y otros usos era mínimo y que por tanto el régimen de caudales de ese período se aproxima más al régimen natural de caudales del río. Para realizar la anterior comparación fue necesario establecer el grado de influencia de la variabilidad climática en el régimen de caudales de la cuenca, para tener certeza que las diferencias entre caudales entre períodos se relacionan más con el aprovechamiento de los recursos hídricos que con la variabilidad climática. Para esto se realizaron comparaciones gráficas de lluvia y caudal mensuales de la cuenca para ambos períodos.

Una vez concluidas estas comparaciones se realizó un análisis de doble masa entre escorrentía y lluvia anual de la cuenca para los dos registros disponibles. Este análisis permite detectar si han existido cambios en la escorrentía anual de la cuenca debido al aprovechamiento del agua, independientemente de la variabilidad climática. Las diferencias de las comparaciones simples entre los promedios de los dos períodos y las diferencias de los

coeficientes de regresión de las tendencias lineales de la curva de doble masa, se sometieron a pruebas de comparaciones estadísticas.

4.6 Sistematización la información sobre concesiones de aguas en la cuenca

La información sobre concesiones de agua se tabuló y desplegó de manera gráfica, para así estimar los volúmenes de uso del agua superficial que afectan los caudales del río. Para esto se empleó el Sistema de Información Geográfica de la Estación Biológica Palo Verde (SIG-OET-Palo Verde), con el propósito de ubicar cada concesión según el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

4.7 Modelación del impacto de caudales en las características hidráulicas del canal principal

Para la definición de caudales ambientales, fue necesario evaluar el efecto de diferentes caudales en las características hidráulicas del canal, tales como: el perímetro mojado, profundidad, la velocidad, el área transversal del flujo, etc. Estas características hidráulicas afectan el hábitat de las especies acuáticas, si se conocen las exigencias de las mismas se podrá valorar el impacto de diferentes caudales propuestos. Para realizar esto, los perfiles fueron introducidos en el SIG-OET-Estación Palo Verde y con el programa HEC-RAS 3.1.2² se corrió los caudales propuestos para generar datos para cada perfil. El programa HEC-RAS estima las características hidráulicas del cauce empleando la fórmula Manning-Chezy:

$$\text{Ecuación 1. } Q = 1/n * A * r^{2/3} * s^{1/2};$$

Donde:

- Q = m³/seg
- n = coeficiente de rugosidad
- A = área transversal de la sección en m²
- r = radio hidráulico = A/wp
- wp = perímetro mojado de la sección en m
- s = pendiente de canal en fracción

A continuación se justifica los valores de la ecuación empleados en este estudio.

Valor de **n**: en este caso se asumió para todos los perfiles un coeficiente de rugosidad (n) para los caudales mínimos y promedios diarios de 0,048, que corresponde a un canal sinuoso, limpio con pozos y rápidos a niveles bajos. En el caso de caudales pico y caudales promedio diarios máximos el valor de "n" es de 0,03³. Idealmente se debería contar con este valor del coeficiente "n" para cada perfil, pero como este dato no se tiene, se hace esta generalización que corresponde muy bien con las características de este tramo del canal principal.

Valor de **s**: la pendiente para todos los perfiles se fijó como la pendiente media del canal principal obtenido según los estudios de JICA (2002). Este valor corresponde a 0,003 o 0,3%. Se prefirió esta opción antes de la opción automática que estima el programa HEC-RAS, la cual puede tener inconvenientes, dado que es una estimación extrapolada entre elevaciones del perfil superior y inferior de cada perfil, lo cual puede inducir a errores, dado que algunos perfiles podrían ubicarse en pozas naturales del río, registrando por tanto elevaciones del fondo del cauce fuera de la tendencia normal del canal principal. Por lo tanto, es más adecuado emplear un valor general para todo el canal, el cual es muy estable en este tramo.

Valor de **Q**: este valor es introducido según los escenarios de caudales propuestos que se quieran correr. En el modelo Hec-Ras al introducir los caudales se especificó que los caudales eran constantes (steady flows) y con régimen subcrítico para los caudales mínimos o promedios y régimen supercrítico para los caudales máximos y pico.

² <http://www.bossintl.com/products/download/item/HEC-RAS.html#1>

³ El valor de "n" en el caso de caudales pico y máximos es de 0,03 tomando en cuenta que estos flujos pasan por un canal confinado entre los diques, ninguno de estos caudales, incluyendo el caudal pico de 2 años de retorno, se sale del cauce principal, por tanto el "n" es menor que el empleado en los caudales mínimos o promedios.

Valores de **A**, **wp** y **r**: corresponden con las características hidráulicas del canal estimadas por el programa de acuerdo a diferentes valores de **Q** que se simulen en el programa. Los mismos son empleados para analizar el impacto de diferentes caudales en el hábitat de las especies seleccionadas.

4.8 Propuesta de un esquema de caudales ambientales como base de discusión

Con la información hidrológica colectada y procesada según los puntos anteriores y el conocimiento de las demandas de las especies acuáticas seleccionadas, se procedió a recomendar el régimen de caudales ambientales normales, mínimos y máximos mensuales. Igualmente se recomendó una aproximación para mantener caudales picos extremos y un enfoque de manejo de cuenca dirigido a satisfacer las necesidades sociales y ecológicas.

5. RESULTADOS

5.1 Comparación de lluvia y caudales entre los periodos 1953-1969 y 1980-1999

El análisis de lluvia media anual del período 1953-1999 reveló que existe una gran variabilidad climática en la cuenca alta a partir de la Estación Guardia. La lluvia media fue de 1798 mm, con 546 mm de desviación estándar (D.S.) y 30% de coeficiente de variación (C.V.). El rango de lluvias anuales está definido entre 3100 y 1100 mm. Sin embargo, al comparar los dos periodos de registros, las diferencias en cuanto a lluvia media anual resultaron mínimas (7,7 mm o el 0,4%) y estadísticamente no significativas ($P < 0,05$). Igual resultado se obtuvo al comparar la desviación estándar y el coeficiente de variación. Por el contrario, cuando se comparó la escorrentía anual en ambos periodos se encontró una diferencia notable (91 mm o el 10% del valor anual), siendo el segundo periodo de menor escorrentía. La desviación estándar y el coeficiente de variación aumentaron en el segundo periodo, pero las diferencias no fueron significativas. Igualmente se comparó el patrón de lluvias promedio mensual para los dos periodos y se concluyó que no se encuentran diferencias significativas. Pero al comparar el régimen de caudales promedio mensuales para los mismos periodos indicados, se encontró que los caudales durante la estación seca (enero a abril) son significativamente menores para el segundo periodo ($P < 0,05$). La diferencia de caudales de estos meses es de alrededor de 3 m³/s, lo que confirma que en el último periodo hay una extracción de caudales del río para usos humanos y agrícolas.

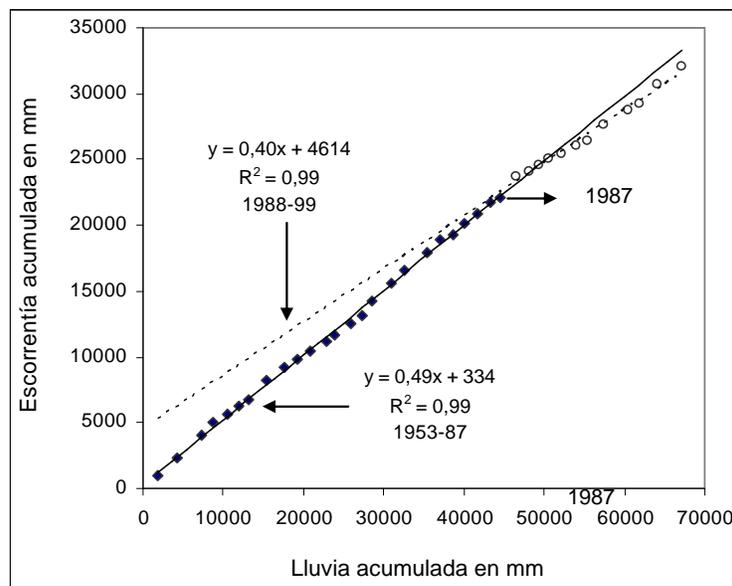


Figura 4. Curva de doble masa, lluvia media anual acumulada vs. escorrentía media anual acumulada, para dos periodos unidos (1953-1969, 1980-1999), Río Tempisque, Estación Guardia, Costa Rica.

5.2 Análisis de la curva de doble masa de lluvia y escorrentía media anual

Al unir los dos registros de caudales disponibles, la curva de doble masa revela dos tendencias y claramente se observó que después de 1987 se inicia un proceso de extracción de agua para riego (Figura 4). Las pendientes de ambas tendencias indicaron que hay un cambio en la relación lluvia acumulada en el *eje x* (variable independiente) y la escorrentía acumulada en el *eje y* (variable dependiente). Así las dos tendencias tienen dos pendientes significativamente diferentes ($P < 0,05$) pasando de un 0,49 (pendiente de la tendencia) en el primer periodo; a 0,40 en el segundo periodo (ver ecuaciones en Figura 4). En este caso se concluyó que el cambio de las pendientes de las dos tendencias se debe a la extracción de agua para riego. Nótese que la diferencia de las pendientes es de casi 0,1 o el equivalente del 10%, que corresponde justamente a la diferencia encontrada en escorrentía media anual en el apartado anterior.

5.3 Aprovechamiento de los recursos hídricos dentro del área de estudio

Un análisis más preciso de las concesiones de agua superficiales otorgadas aguas arriba de la Estación Guardia, indicó que el volumen total concesionado llegó a $3,1 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde justamente con la diferencia de caudales en los meses de la estación seca detectados en la sección 5.1. Después de la Estación Guardia, se identificaron 14 concesiones de agua superficial que llegaron a sumar $5,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Al integrar estas concesiones con las discutidas en el párrafo anterior se determina cómo se disminuye el flujo del caudal del río en el mes de abril, que es el mes más seco (Figura 5). La información inicia en la Estación Guardia (distancia cero en Figura 5), con un caudal para abril de $6,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (promedio 1980-1999), donde ya se asume una extracción de agua de $3 \text{ m}^3/\text{s}$ (ver punto 5.1). El flujo del río en la Estación Guardia (distancia cero) es del 70% del promedio del caudal que se puede considerar natural ($9 \text{ m}^3/\text{s}$ del promedio 1951-1969). Como se aprecia en la Figura 5, después de 7 km de la Estación Guardia el caudal llega a ser un 35% ($3,2 \text{ m}^3/\text{s}$) y al final del tramo se reduce a un 7% ($0,6 \text{ m}^3/\text{s}$) del caudal natural o del promedio del registro 1951-1969 (Figura 8 c y d).

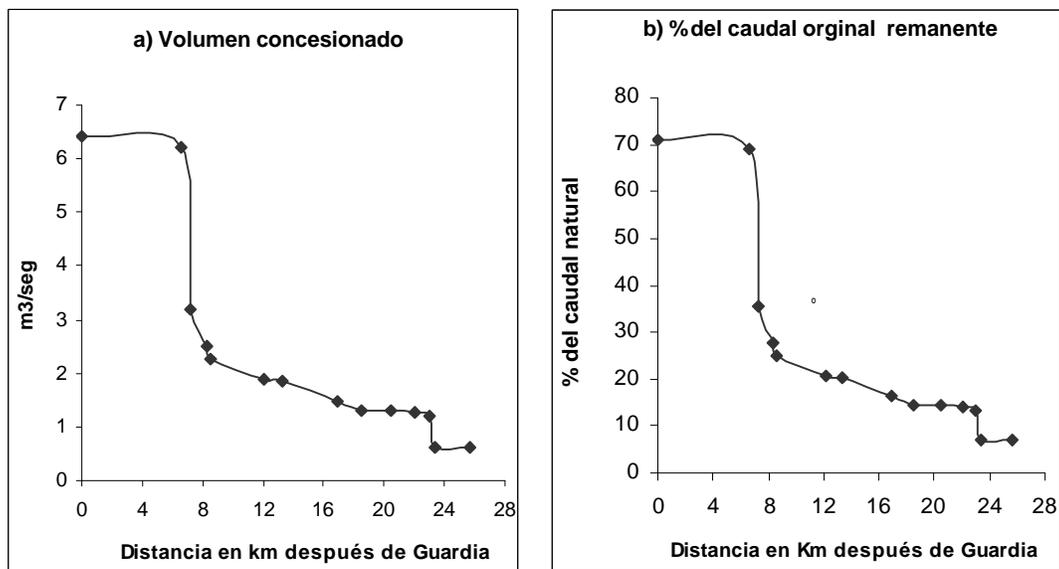


Figura 5. Caudales para el mes de abril a partir de la Estación Guardia (distancia cero): a) Volumen del caudal concesionado y b) % del caudal original disponible después de las concesiones en el río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica.

5.4 Recomendación de caudales ambientales

La recomendación de caudales ambientales se basó en el análisis de los regímenes de caudales históricos no alterados, los cuales se asumen como el régimen natural. Es así como supone que los ecosistemas fluviales y las especies han evolucionado sometidos a

determinados tipos de regímenes de caudales y por tanto sus ciclos biológicos y requerimientos ecológicos están adaptados a las variaciones estacionales propias de dicho régimen (Baeza y García de Jalón, 2004).

Como se demostró en las dos primeras secciones de resultados, la serie de datos de caudal de 1951-1969 es la más representativa de los flujos naturales del río Tempisque y por tanto, los datos estadísticos de este período son los que se deben emplear para fijar los caudales ambientales. El Cuadro 2 incluye un resumen de los datos estadísticos para el período 1951-1969 y los caudales ambientales propuestos.

Cuadro 2. Datos estadísticos de caudales del río Tempisque, caudales ambientales recomendados y caudal disponible máximo a concesionar (m^3/s) en Guardia, Costa Rica.

Lín.	Caudales 1951-1969	Meses											
		May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
1	Promedio	14,7	35,2	24,2	25,2	42,9	63,1	49,3	24,7	18,5	13,7	10,5	9,0
2	Desv. estándar	10,7	25,5	11,3	11,6	29,4	49,8	43,2	7,9	5,1	3,2	2,5	1,8
3	Años (n)	18,0	18,0	18,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
4	Valor mínimo	6,7	9,3	11,6	12,0	15,2	19,8	17,4	14,7	12,8	10,4	7,1	6,4
5	Valor máximo	51,8	107,0	55,4	58,0	140,0	208,0	179,8	41,3	28,8	21,0	15,7	12,0
6	Límite Conf. -95%	9,4	22,6	18,6	19,6	28,7	39,2	28,5	20,9	16,1	12,2	9,3	8,1
7	Límite Conf. +95%	20,0	47,9	29,9	30,8	57,1	87,1	70,1	28,5	21,0	15,2	11,6	9,8
	Caudales ambientales	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.
8	Mínimo	3,4	4,6	5,8	6,0	7,6	9,9	8,7	7,4	6,4	5,2	3,6	3,2
9	Normal	8,6	17,3	11,4	11,6	21,8	33,9	29,5	11,2	8,8	6,7	4,7	4,1
10	Máximo	13,9	30,0	17,0	17,2	35,9	57,9	50,3	14,9	11,3	8,2	5,9	4,9
11	Caudal a concesionar	6,0	17,9	12,8	13,6	21,1	29,3	19,8	13,6	9,7	7,0	5,7	4,9

Fijación de caudal ambiental mínimo

Dado que en la actualidad existen en operación varias concesiones para extraer agua directamente del río Tempisque, la definición de caudales ambientales debe tomar en cuenta esta realidad para lograr acuerdos sociales. Idealmente el caudal mínimo ambiental debería corresponder al caudal mínimo histórico registrado durante el período 1951-1969 (línea 4, Cuadro 2), que sería el umbral mínimo que las especies y ecosistemas han soportado durante ese período. No obstante, solo considerar esta posibilidad confrontaría directamente con la realidad, dado que implica denegar las posibilidades de continuar con la mayoría de las concesiones existentes. Ante esta situación se propuso ensayar inicialmente un caudal ambiental mínimo correspondiente al 50% del caudal mínimo histórico. Esto es el 50% del valor de la línea 4, que se incluye en la línea 8-Cuadro 2. Este sería el caudal ambiental mínimo de estiaje que debería llegar a la Estación Guardia y continuar por el tramo del río hasta llegar al Golfo de Nicoya. Esta asignación de caudal mínimo no tiene mayor fundamento que la aceptación del hecho que la sociedad actualmente disfruta del recurso y de que para poder llegar a un acuerdo social sobre caudales ambientales, se debe dejar un porcentaje de caudal mínimo para el desarrollo económico durante la estación seca, en este caso se propuso dejar un 50% de mínimo histórico.

Caudales mensuales disponibles para concesiones

Una vez definido el caudal ambiental mínimo mensual se fijó el caudal disponible para concesiones. Estos caudales corresponden a la diferencia del caudal ambiental mínimo (línea 8) y al límite inferior de los intervalos de confianza al 95% (línea 7). Los caudales disponibles para concesiones serían entonces los que se encuentran en la línea 11. Como estos caudales se han fijado empleando los mínimos históricos, se asume que aún en los años más secos se podrá cumplir tanto con el caudal ambiental mínimo como con el caudal concesionado.

Dado que antes de la Estación Guardia ya se han concesionado $3,1 m^3/s$ y después de esta estación se han concesionado $5,7 m^3/s$, la demanda total concesionada llega a sumar $8,1 m^3/s$.

La Figura 6a ilustra los caudales disponibles para concesiones por mes (curva) y la demanda actual (línea recta). Como se puede apreciar los meses de mayo, febrero, marzo y abril presentan un déficit de 2,1, 1,1, 2,4 y 3,2 m³/s, respectivamente. Estos déficits deben ser compensados renegociando las concesiones actuales hasta llegar a alcanzar los caudales máximos a ser concesionados (Línea 11-Cuadro 2) o restaurando el flujo con aportes adicionales de agua directamente al cauce.

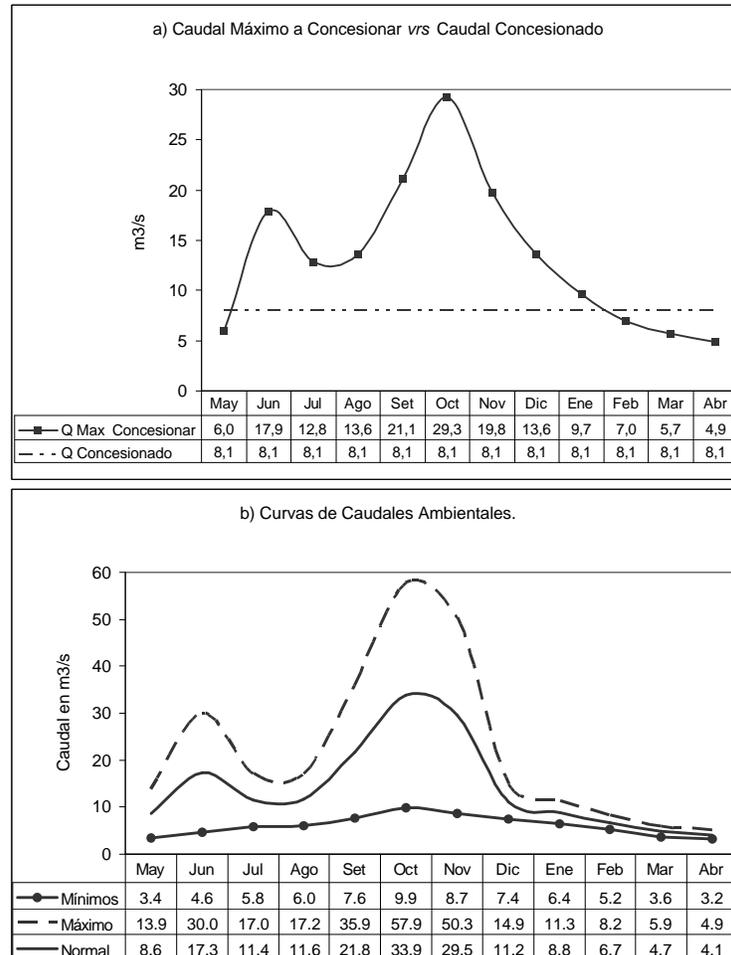


Figura 6. a) Caudal máximo a concesionar vrs caudal concesionado para todos los meses a partir de la Estación Guardia (distancia cero) y b) Curvas de los caudales ambientales propuestos para el río Tempisque. Guanacaste, Costa Rica.

Caudales ambientales normal y máximo medio diario mensual

El caudal ambiental normal corresponde a la diferencia del caudal medio (Línea 1) y el caudal máximo a ser concesionado (Línea 11). Así mismo, el caudal ambiental máximo corresponde a la diferencia entre caudal máximo a concesionar (línea 11) y el límite superior del intervalo de confianza del 95% de los promedios de caudales medios diarios (Línea 7). La Figura 7b representa la distribución mensual de los caudales ambientales propuestos para el río Tempisque. Como se observa en la Figura 6b, los mismos representan un régimen de caudales que simula los flujos naturales después de liberar un flujo máximo para otros usos. Las curvas de caudales ambientales mínimos y máximos engloban un 95% de probabilidades de que los caudales ambientales oscilen entre estos dos extremos, ofreciendo diferentes regímenes de flujos a los ecosistemas y a las especies para adaptarse, recuperarse y mantener una población saludable.

Fijación de caudales pico ambiental

Los caudales ambientales propuestos proveen las condiciones mínimas para que los ecosistemas y especies fluviales persistan. Sin embargo, existen procesos de geomorfología fluvial y ecológicos que requieren de la ocurrencia de caudales pico para distribuir sedimentos, materia orgánica, mantener los diques naturales y forma del canal, limpiar el canal y depositar nuevos sedimentos, etc. (Baeza y García de Jalón, 2004). Lo más relevante de estos caudales pico es que los mismos no solamente son importantes para la geomorfología y ecología del río, sino también para mantener otros procesos en los ecosistemas litorales y marinos del Golfo de Nicoya. En el caso del río Tempisque, se conoce de intenciones para desarrollar proyectos para represar el río y crear un embalse para proveer agua para riego y satisfacer las necesidades de los desarrollos turísticos en el litoral pacífico (JICA, 2002). Por lo tanto, si se represa el río se afectará los caudales pico de dos años de retorno, que es el periodo de retorno que justamente la literatura recomienda mantener para garantizar la existencia y continuidad de los procesos geomorfológicos y ecológicos. Consecuentemente se recomendó que ninguna represa a lo largo del río modifique el régimen de los caudales ambientales definidos anteriormente y la ocurrencia de los caudales pico con periodos de retorno de dos años ($442 \text{ m}^3/\text{s}$, según estudio de JICA, 2002).

5.5 Efecto de caudales ambientales en el hábitat del cocodrilo y el guapote

De acuerdo con el análisis de resultados obtenidos con el Modelo Hec-Ras, el promedio de profundidad para todos los perfiles y meses se encontró que el caudal promedio natural y el caudal ambiental normal cumple las exigencias de los niveles requeridos para *P. dovii* y de *C. acutus*. No sucede igual con los resultados para caudal ambiental mínimo, donde se observó que los meses de marzo, abril y mayo tienen menor profundidad de lo requerido para *C. acutus*, pero si cumplen con lo requerido para *P. dovii* (Figura 7a). El análisis del porcentaje de frecuencia de perfiles que cumplen o no con el requerimiento para *C. acutus* permitió concluir que durante el año, los caudales naturales tienen un rango de porcentaje de perfiles que cumplen el requerimiento de 65% para el mes de abril y un 100% para el mes de octubre. Al analizar el caudal ambiental normal este rango baja a 35% y a un 88% para los mismos meses y para el caso del caudal ambiental mínimo el rango pasó a 31% y a un 65% para los mismos meses. Del análisis de la distribución de los porcentajes de perfiles que satisfacen los requerimientos de profundidad para el guapote se observó que la situación no es tan grave, dado que los porcentajes de perfiles para el caudal ambiental normal se cumple en todo los meses, excepto los meses de marzo y abril con un 77% de los perfiles. Igualmente se concluyó que los resultados son muy favorables para el caudal ambiental mínimo, dado que un 70% de los perfiles está sobre el requerimiento todos los meses, con excepción de abril, con un 65%.

Por último se analizó la situación para el caudal actual en el mes de abril, que es el mes más crítico, y se concluyó que la situación actual del tramo es muy crítica para el cocodrilo, dado que solo 15% de los perfiles cumplen con ese requerimiento y un 62% de los perfiles cumple para los requerimientos de *P. dovii* (Figura 7b). Por tanto, la propuesta de caudales mínimos ambientales de este estudio implica al menos un 100% de mejora en la condición actual. Considerando que la fatiga causada por la ocurrencia del caudal ambiental mínimo sucede una vez cada 19 años (Cuadro 2), se considera que la propuesta de caudal ambiental mínimo es aceptable y más deseable que el escenario actual. Para lograr esto se debe disminuir el volumen de concesiones actuales de $8,1 \text{ m}^3/\text{s}$ para el mes de abril (mes más crítico) a $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que implica renegociar $3,2 \text{ m}^3/\text{s}$ entre los concesionarios.

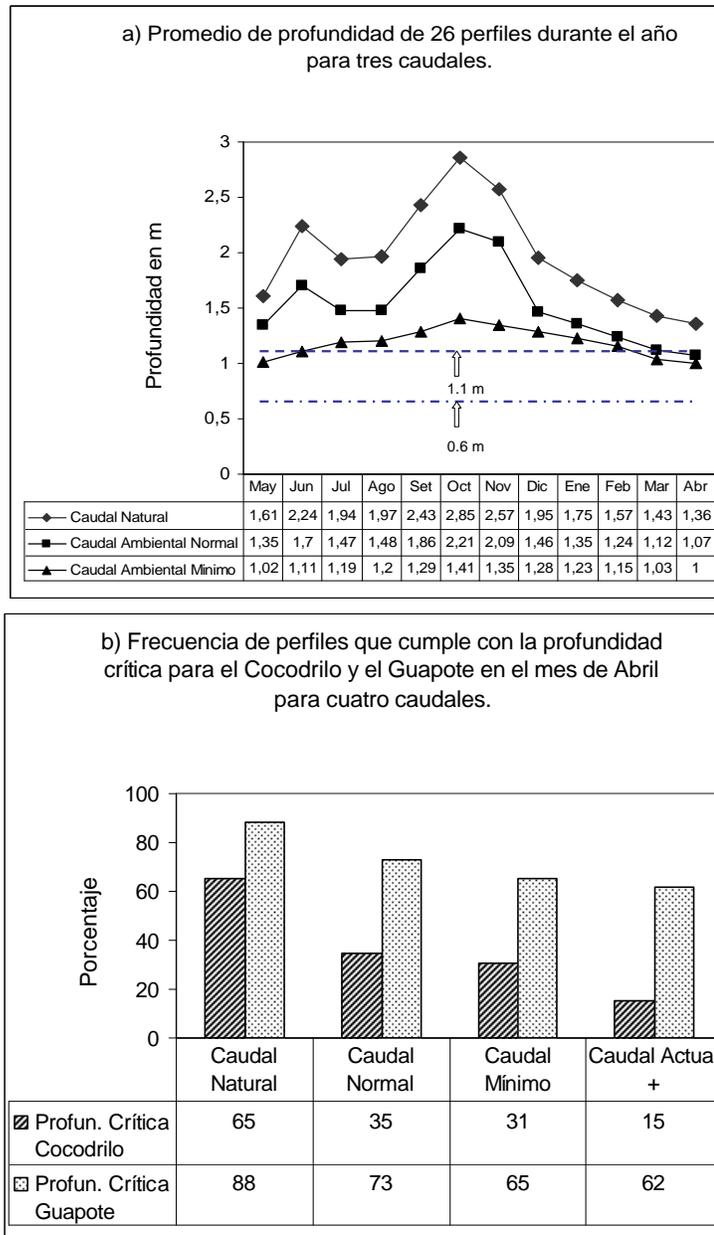


Figura 7. a) Profundidad promedio de 26 perfiles transversales a lo largo del tramo del Río Tempisque y b) frecuencia de los 26 perfiles que cumplen con las profundidades críticas para el cocodrilo y el guapote.

6. CONCLUSIONES

Reconociendo las limitaciones de información y tiempo de este estudio, se concluye que se logró: i) examinar la situación real del estado de los caudales del río Tempisque y, ii) elaborar una propuesta técnica para iniciar un diálogo entre los actores sociales para acordar la definición definitiva de caudales ambientales.

La realidad de muchas cuencas en la región mesoamericana impide la aplicación de esquemas de trabajo más sofisticados y por tanto hay una urgencia de lograr el mejor provecho a la información existente, para hacer propuestas que permitan al menos una primera aproximación

de caudales ambientales. En este sentido se debe subrayar los aportes de este estudio de caso:

a) Se logró caracterizar la magnitud de la variabilidad climática y sus efectos en el régimen de caudales. Se detectaron diferencias en los patrones de caudales, sobre todo en los meses secos, en los cuales los caudales son menores en el último período (1980-1999) con respecto al primer período (1951-1969). La diferencia se debe a la extracción de agua para riego y otros usos.

b) Al emplear el análisis de doble masa se logró seleccionar el período 1951-1969 como el más representativo del régimen natural de caudales del río. Los datos de este período se tomaron como base para la definición de caudales ambientales. Así mismo, se logró demostrar el impacto del aprovechamiento de agua para riego en la disminución significativa de caudales durante los meses de la estación seca en el segundo período.

c) Al emplear la información disponible sobre concesiones de agua superficiales, se hicieron estimaciones de los volúmenes de agua que se estaría extrayendo directamente del río. Tanto los volúmenes de extracción, antes como después de la Estación Guardia, tienen una estrecha relación con los cambios detectados al comparar los caudales de los dos períodos.

d) Se hizo una propuesta de caudal ambiental y de caudal disponible para concesiones tomando en cuenta el régimen natural de caudales y los caudales mínimos registrados históricamente.

e) El efecto de los caudales ambientales propuestos en el hábitat de las dos especies (*P. dovii* y *C. acutus*) fue evaluado con el Modelo HEC-RAS, dando especial énfasis a los cambios de profundidad en 26 perfiles transversales distribuidos a lo largo del tramo del río en estudio. Después de esta evaluación se llegó a la conclusión que solo los caudales actuales presentan efectos considerables en la fragmentación y calidad del hábitat, mientras que los caudales ambientales propuestos aseguran mejores condiciones de hábitat.

h) Aparte de definir y conservar los caudales ambientales, el estudio concluyó que es necesario hacer un manejo de la cuenca y restaurar la cobertura riparia a lo largo de los cauces principales, no solamente como estrategia para establecer un corredor biológico, sino también como estrategia para dar mejores condiciones para la regulación térmica y de oxigenación de los flujos, lo que repercute positivamente en la calidad del hábitat.

i) El estudio generó información que permite evaluar el impacto de los caudales ambientales propuestos, así como del impacto del escenario actual con concesiones de 8,1 m³/s. Esta información permitió demostrar que es necesario renegociar las concesiones actuales a fin de mejorar las condiciones de caudal mínimo, sobre todo en los meses de la estación seca. La factibilidad de que el Estado (Departamento de Agua del MINAET) acepte esta propuesta de caudales y renegocie no es un hecho. Sin embargo, desde que se concluyó este estudio ha existido un interés por mejorar las condiciones de los caudales de este río y se han iniciado procesos de renegociación de concesiones, así como la gestión de estudios técnicos para trasladar aguas de sistemas de riego y ríos vecinos para restituir los flujos necesarios.

RECOMENDACIONES

Este estudio fue el resultado de un análisis de información disponible. Algunos aspectos tienen deficiencias que deben ser superadas con trabajo adicional dirigido a mejorar la calidad de datos. Entre estos aspectos se señalan:

- Precisar con mejor detalle espacial y temporal los volúmenes de agua concesionados y aprovechados efectivamente. Los datos que se tienen actualmente solo dan una idea del potencial de aprovechamiento.

- Estudiar si el acuífero de la margen derecha del río Tempisque contribuye, y en cuánto, al caudal de estiaje del río durante los meses de la estación seca. En este estudio se asume que la contribución es mínima.
- Para este estudio no se contó con datos de calidad físico-química del agua. Es necesario diseñar un sistema de monitoreo periódico y básico que mida parámetros de calidad de agua a diferentes niveles del cauce principal, con el objetivo de crear una base de datos que permita analizar la variabilidad y los cambios producidos por manejo de la cuenca, las concesiones y la variabilidad climática.
- Es importante estudiar y comprender mejor las relaciones entre los ecosistemas litorales y marinos del Golfo de Nicoya con los flujos y la calidad del agua del río Tempisque.
- Un estudio más elaborado requiere de los registros de caudales diarios, evaluaciones de la precisión de las estimaciones del Modelo HEC-RAS, de una base de datos de calidad de aguas, dinámica de población de otras especies importantes, un inventario del estado de los hábitat de las especies y de un modelo hidrológico que simule el efecto del manejo de la cuenca en los flujos y calidad del agua.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó gracias al apoyo del Programa de Humedales de la IUCN-ORMA, especialmente de su coordinadora Rocio Córdoba. Se reconoce el apoyo de Mauricio Castillo, Antonio Guzmán y Oscar Arias de la Estación Biológica Palo Verde de la Organización de Estudios Tropicales.

BIBLIOGRAFÍA

- Arias, O. 2001. Estudio hidrometeorológico de la Cuenca del Río Tempisque. Informe de Práctica de Especialidad. Cartago, CR, Escuela de ingeniería Forestal. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 32 p.
- Baeza, D; García de Jalón, J. 2004. Avances y aspectos no resueltos en la estimación de regímenes de caudales ambientales. Madrid, ES, Departamento de Ingeniería Forestal. Escuela de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. 12 p.
- Calvo-Alvarado, J. 2004. Caracterización hidrológica del Río Tempisque: base para la definición de caudales ambientales. San José, CR, Organización para Estudios Tropicales-IUCN. 42 p.
- Gleick, P. 2000. The changing water paradigm: a look at twenty-first century water resources development. *Water International* 25: 127-138.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad, CR). 1994. Boletines Hidrológicos. Nº 5 al 21. San José, CR. Dirección de Planificación Eléctrica, Departamento de Estudios Básicos. Oficina de Hidrología.
- IUCN. 2000. Vision for water and nature: a World strategy for conservation and sustainable management of water resources in the 21 st century. International Union for the Conservation of Nature, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- IUCN. 2003. Flow. The essentials of Environmental Flows. Dyson M; Bergkamp G and J. Scanlon (eds.). Gland, Switzerland and Cambridge, UK. 118 pp.
- JICA (Japan International Cooperation Agency). 2002. Estudio del proyecto de desarrollo rural de la cuenca del Río Tempisque. Guanacaste-Costa Rica. Pacific Consultants Internacional/Naigai Engineering Co. 156 p.
- Jiménez, J; Calvo-Alvarado, J; Pizarro, F; González, E. 2005. Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el río Tempisque. Guanacaste-Costa Rica. Organización para Estudios Tropicales-UICN. Área temática de Humedales, Agua y Zonas Costeras. 40 p.

- Jiménez, J; González, E. 2001. La cuenca del Río Tempisque. Perspectivas para un Manejo Integrado. San José, CR, Organización para Estudios Tropicales. (OET). 135 p.
- Pizarro, F. 2004. Caudales ambientales en el Río Tempisque: Aspectos biológicos para su determinación. Guanacaste-Costa Rica Organización para Estudios Tropicales-IUCN. 26 p.
- Richter, B; Mather, R; Harrison D; Wigington, R. 2003. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity. *Ecological Applications* 13(1): 206-224.

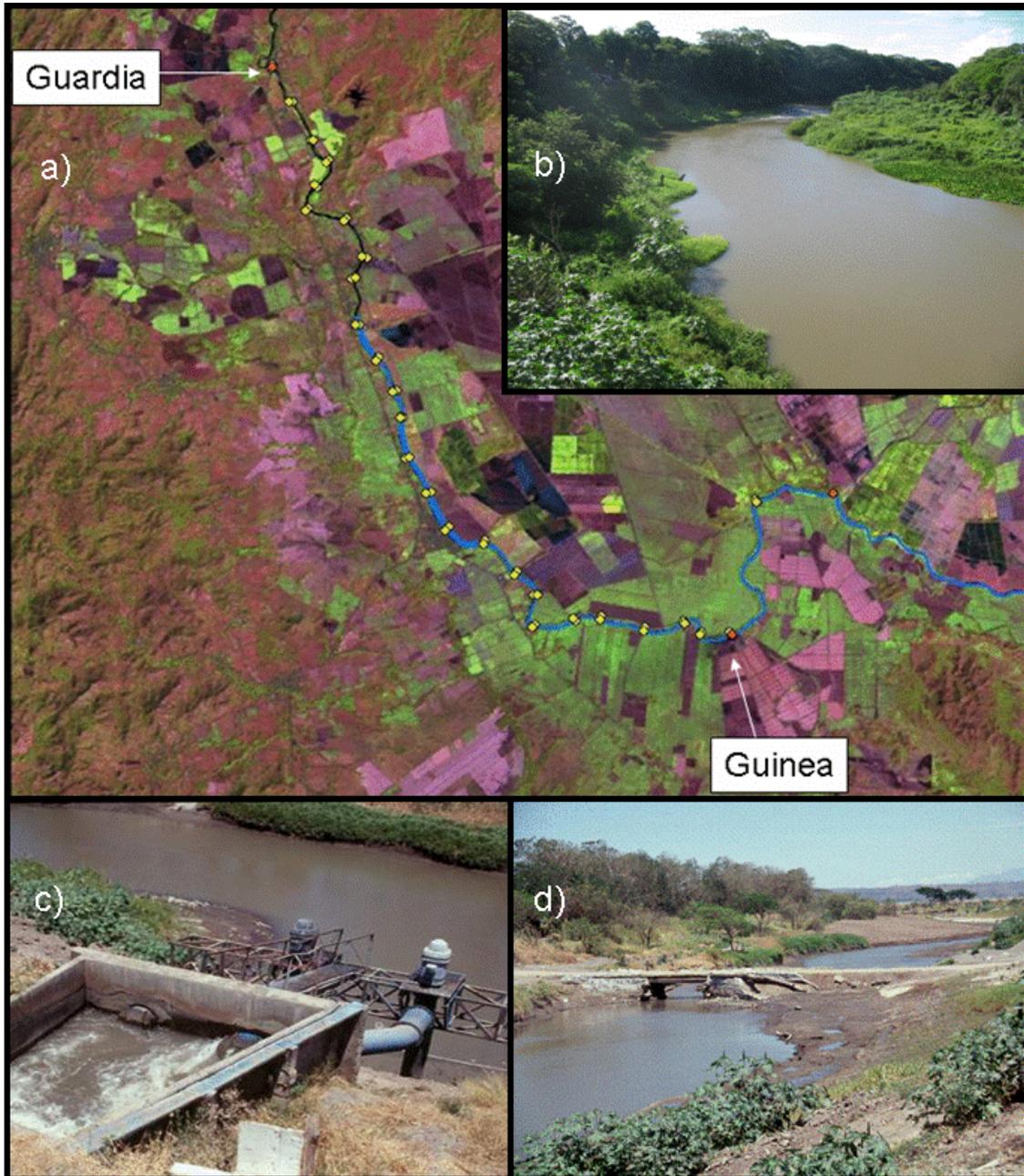


Figura 8. Ilustraciones del estudio. a) Imagen de satélite Landsat indicando el tramo del río en estudio, la Estación Guardia y La Guinea, la ubicación de los perfiles topográficos y el paisaje agrícola y natural de la cuenca. b) Canal del Río Tempisque cerca de Guardia en la estación lluviosa. c) Sistemas de bombeo de agua directamente del río a lo largo del tramo. d) Caudal disminuido del río en el mes de abril del 2002, el sitio corresponde al Jobo, donde hay influencia de las mareas del Golfo de Nicoya. El caudal que es menor de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando el caudal natural era de $9 \text{ m}^3/\text{s}$. Río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica.