



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS PUEBLA

POSTGRADO EN ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO: IMPACTO ECONÓMICO EN EL USUARIO AGRÍCOLA DE LA CUENCA RÍO YAUTEPEC, ESTADO DE MORELOS

MARÍA LIDIA PALMA RAYMUNDO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

Puebla, Puebla

2013



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
CAMPECHE-CÓRDOBA-MONTECILLO-PUEBLA-SAN LUIS POTOSÍ-TABASCO-VERACRUZ

CAMPUE- 43-2-03

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe **María Lidia Palma Raymundo** alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta Institución, bajo la dirección del Profesor **Dr. Angel Bustamante González** por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis **Determinación del caudal ecológico: impacto económico en el usuario agrícola de la cuenca río Yautepec, estado de Morelos** y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, el Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Puebla, Puebla, 25 de octubre de 2013.

María Lidia Palma Raymundo
Nombre y Firma

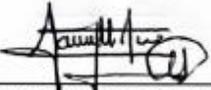
Angel Bustamante González
Vo. Bo. Profesor Consejero o Director de Tesis
Nombre y Firma

La presente tesis titulada: **Determinación del caudal ecológico: impacto económico en el usuario agrícola de la cuenca río Yautepec, estado de Morelos**, realizada por la alumna: **María Lidia Palma Raymundo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
ESTRATEGIAS PARA EL DESARROLLO AGRÍCOLA REGIONAL

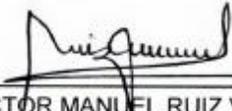
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. ÁNGEL BUSTAMANTE GONZÁLEZ

ASESOR: 
DR. JOSÉ LUIS JARAMILLO VILLANUEVA

ASESOR: 
DR. SAMUEL VARGAS LÓPEZ

ASESOR: 
DR. ARTURO HUERTA DE LA PEÑA

ASESOR: 
DR. VÍCTOR MANUEL RUIZ VERA

Puebla, Puebla, México, 2013

DETERMINACIÓN DEL CAUDAL ECOLÓGICO: IMPACTO ECONÓMICO EN EL USUARIO AGRÍCOLA DE LA CUENCA RÍO YAUTEPEC, ESTADO DE MORELOS

María Lidia Palma Raymundo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

En México, a partir de la modificación de la Ley de Aguas Nacionales en el 2004, en México es obligatorio destinar parte del agua de los ríos para usos ambientales. Esta agua que se debe dejar que corra en el cauce del río se conoce como caudal ecológico. El reto es, por un lado, estimar cuánta agua debe corresponder al caudal ecológico. Por otro lado, que consecuencias sociales y económicas tendrá el quitar agua asignada actualmente a otros usuarios para destinarla como caudal ecológico. En este estudio se tuvo como objetivo estimar la disponibilidad de caudales ecológicos en la cuenca del Río Yautepec, en el estado de Morelos, así como los efectos económicos sobre los productores agrícolas, principales usuarios actuales del agua del río. Se utilizó el método de Análisis de Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) para estimar la alteración del régimen de caudal y el caudal ecológico del río. Posteriormente, se descontó la cantidad de caudal ecológico estimado al caudal concesionado a los productores de caña de azúcar, principales usuarios del agua del río, y se estimó la pérdida económica asociada a esa cantidad de agua. Para esto se generó una función de producción translog que considera los factores de producción agua y jornales agrícolas. El déficit de caudal ecológico estimado con un criterio de límite bajo del análisis de rango de variabilidad (RVA) fue de 43.2 hm³ y con este criterio la pérdida de ingresos en el cultivo de la caña sería de \$66,571,200 (28.36% del ingreso por el cultivo en la cuenca). Con un criterio de valor medio de RVA el déficit de caudal ecológico sería de 65.6 hm³ y se tendría una pérdida económica de \$101,089,600, lo que representa el 43.07% del ingreso por el cultivo en la cuenca.

Palabras clave: caudal ecológico, impacto económico, río Yautepec.

ECOLOGICAL FLOW ASSESSMENT: ECONOMIC IMPACT ON AGRICULTURAL USER IN THE YAUTEPEC RIVER BASIN, STATE OF MORELOS

María Lidia Palma Raymundo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

In Mexico, due to changes of National Water Law in 2004, is mandatory to allocate part of the river water for environmental uses. This water must be allowed to run in the river channel and is known as ecological flow. The challenge is, first, to estimate how much water should correspond to ecological flow. On the other hand, to provide the social and economic consequences of removing water currently assigned to other water users to be destined as environmental flow. The aim of this study was to estimate the availability of environmental flows in Yautepec River basin, in the State of Morelos, and to quantify the economic effects on agricultural producers, major current river water users. It was used the method of analysis Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) to assess the altered flow regime and estimate the ecological flow of the river. Subsequently, the estimated ecological flow was deducted from total water concession of sugar cane producers, major users of water of the river, and the economic loss associated with that amount of water was estimated. For this purpose, a translog production function that considers as factors of production water and agricultural wages was generated. The deficit of ecological flow, estimated with a low limit of the range of variability (RVA), was 43.2 hm³ and the loss of revenue in the total income of sugarcane production would be \$ 66,571,200 (28.36% of the total revenue by the cultivation of sugarcane in the basin). With a mean RVA value the ecological flow deficit would be 65.6 hm³, with an economic loss of \$ 101,089,600, representing 43.07% of total income for the production of sugar cane.

Key words: ecological flow, economic impact, Yautepec River.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) quien aportó el financiamiento necesario para la realización de mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados campus Puebla por los recursos académicos y de investigación brindados durante mi estancia en la institución.

Al Dr. Ángel Bustamante González por la dirección de esta tesis, sus atinadas observaciones, por su amistad, comprensión y orientación brindada.

A los Doctores Arturo Huerta De La Peña, José Luis Jaramillo Villanueva, Samuel Vargas López y Víctor Manuel Ruiz Vera por sus enseñanzas, recomendaciones y amistad, las cuales han sido fundamentales para el desarrollo e esta investigación.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema de investigación.....	2
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Hipótesis.....	4
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	5
2.1 La cuenca en la gestión integral del recurso hídrico.....	5
2.1.1 Concepto de cuenca.....	5
2.2 La cuenca como unidad de manejo integral del recurso agua....	6
2.3 Manejo integral del recurso hídrico.....	6
2.3.1 Concepto de Manejo Integral del Recurso Hídrico (MIRH)..	6
2.3.2 Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible.....	8
2.3.3 Usos del agua identificados en el manejo integral del agua en cuencas.....	9
2.4 El agua como base del mantenimiento de los procesos y funciones del ecosistema.....	11
2.4.1 Importancia del uso ambiental del agua.....	11
2.4.2 El régimen hidrológico y su influencia en el ecosistema.....	12
2.4.3 Componentes del régimen hidrológico.....	13
2.5 El papel del hombre en el manejo integral del agua.....	15
2.5.1 El hombre como principal usuario del agua.....	15
2.5.2 Conflictos entre los usos antropocéntricos del agua.....	16
2.5.3 Conflictos entre los usos ambientales y antropocéntricos del agua.....	17
2.6 Los caudales ambientales o ecológicos como elementos del manejo integral del agua.....	18

2.6.1 Definición de caudal ambiental.....	18
2.6.2 Antecedentes u origen del concepto de caudal ecológico.....	19
2.6.3 Métodos para estimar los caudales ecológicos.....	20
2.6.4 Criterios para elegir el método de caudal ecológico.....	24
2.6.5 Normatividad sobre los caudales ecológicos en México.....	24
2.7 La valoración económica del agua, métodos y aplicación en el usuario agrícola.....	25
2.7.1 Valoración económica del agua.....	25
2.7.2 Métodos de valoración económica del agua.....	27
2.7.3 Método de valoración económica del agua en función de la productividad marginal.....	30
2.7.4 Función de producción translog y el valor marginal del agua.....	33
3. MARCO DE REFERENCIA.....	35
3.1 Ubicación de la zona de estudio.....	35
3.2 Clima.....	36
3.3 Tipos de suelo.....	38
3.4 Uso de suelo y vegetación.....	40
3.5 Hidrología.....	42
3.6 Información hidrométrica.....	43
3.7 Disponibilidad media anual de agua.....	45
3.8 Aprovechamiento del agua.....	46
3.9 Población.....	48
3.10 Agrodiversidad.....	49
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	52
4.1 Determinación del caudal ecológico.....	52
4.1.1 Selección de las estaciones hidrométricas para el análisis..	52
4.1.2 Estimación de los caudales ecológicos.....	54
4.2 Estimación del impacto económico de la determinación del caudal ecológico en el usuario agrícola.....	63

4.2.1 Identificación de los principales cultivos en la cuenca.....	63
4.2.2 Estimación de los impactos.....	63
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
5.1 Análisis histórico de los caudales del río.....	66
5.2 Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) con base en la estación hidrométrica 18193.....	69
5.2.1 Condición hidrológica mensual.....	69
5.2.2 Caudales mínimos y máximos.....	71
5.2.3 Condiciones hidrológicas extremas.....	72
5.2.4 Pulsos altos y bajos	73
5.2.5 Tasa y frecuencia de los cambios en las condiciones hidrológicas.....	74
5.3 Componentes del Caudal Ecológico (EFC) de la estación 18193.....	74
5.3.1 Caudales bajos.....	74
5.3.2 Caudales extremadamente bajos	75
5.3.3 Pulso de caudal alto.....	76
5.3.4 Pequeñas inundaciones.....	76
5.3.5 Grandes inundaciones.....	77
5.4 Análisis de rangos de variabilidad (RVA) y caudal ecológico para la estación 18193.....	79
5.5 Análisis del régimen de caudal alterado del Río Yautepec (estación hidrométrica 18223).....	81
5.5.1 Análisis de la serie histórica de caudales de la estación 18223.....	81
5.5.2 Parámetros de IHA para la estación 18223.....	84
5.5.3 Parámetros de caudal ecológico (EFC) para al estación 18223.....	87
5.6 Volumen de agua superficial utilizado por el usuario agrícola.....	90

5.7 Impacto económico de la disminución de los volúmenes de agua concesionadas para la agricultura para usarse con fines ecológicos.....	92
6. CONCLUSIONES.....	96
7. BIBLIOGRAFÍA.....	98
8. ANEXOS.....	109

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Valor del agua y sus relaciones por diferente tipo de bien.....	28
Cuadro 2. Estaciones hidrométricas.....	44
Cuadro 3. Volumen anual de escurrimiento.....	45
Cuadro 4. Módulos de riego presentes en la cuenca.....	46
Cuadro 5. Superficie sembrada en hectáreas de los principales cultivos.....	50
Cuadro 6. Parámetros hidrológicos que definen el régimen de caudal.....	55
Cuadro 7. Componentes del caudal ecológico y sus influencias en el ecosistema.....	60
Cuadro 8. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) para la estación hidrométrica 18913.....	70
Cuadro 9. Parámetros de IHA (mediana) del grupo 2 para la estación 18193.....	71
Cuadro 10. Parámetros de IHA de los grupos 3, 4 y 5 para la estación 18193.....	73
Cuadro 11. Parámetros de los componentes de caudal ecológico (EFC) del grupo 1 para la estación 18193.....	75
Cuadro 12. Parámetros de EFC de los grupos 2 y 3 para la estación 18193.....	76
Cuadro 13. Parámetros de EFC de los grupos 4 y 5 para la estación 18193.....	77
Cuadro 14. Déficit mensual de agua para el caudal ecológico.....	81
Cuadro 15. Caudales medios mensuales para la estación 19223.....	83
Cuadro 16. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) para la estación hidrométrica 18223.....	85

Cuadro 17. Parámetros del grupo 2 de IHA (mediana) para la estación hidrométrica 18223.....	86
Cuadro 18. Parámetros de los grupos 3, 4 y 5 de IHA (mediana) para la estación hidrométrica 18223.....	87
Cuadro 19. Caudales bajos mensuales para la estación 18223.....	88
Cuadro 20. Caudales extremadamente bajos para la estación 18223.....	89
Cuadro 21. Pulso de caudal alto para la estación 18223.....	89
Cuadro 22. Pequeñas y grandes inundaciones para la estación 18223.....	90
Cuadro 23. Volumen ofertado y volumen utilizado por el usuario agrícola.....	91
Cuadro 24. Estimación de la función producción.....	93
Cuadro 25. Volumen a reducir en el uso agrícola para fines ecológicos.....	94
Cuadro 26. Impacto económico por reducción de agua para el cultivo de la caña.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Ciclo hidrológico.....	11
Figura 2. Interacción de los componentes en el régimen hidrológico.....	13
Figura 3. Componentes del régimen hidrológico.....	14
Figura 4. Diferentes niveles de flujo y su funcionalidad.....	15
Figura 5. Criterios de eficiencia de Pareto y el de Beneficio-Costo.....	27
Figura 6. Localización de la subcuenca del Río Yautepec.....	36
Figura 7. Tipo de clima de la subcuenca del río Yautepec.....	38
Figura 8. Tipos de suelo de la subcuenca del río Yautepec.....	40
Figura 9. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca del río Yautepec.....	41
Figura 10. Tipos de vegetación y el porcentaje que ocupan con respecto a la superficie de la subcuenca.....	42
Figura 11. Hidrología superficial de la subcuenca del río Yautepec.....	43
Figura 12. Presas derivadoras y colindancias del DR 016 Morelos.....	47
Figura 13. Canal general de la presa Toma 1 Río Yautepec.....	48
Figura 14. Localidades de la subcuenca.....	49
Figura 15. Cultivos principales de la subcuenca.....	50
Figura 16. Zonas agrícolas de riego y temporal de la subcuenca.....	51
Figura 17. Ubicación de estaciones hidrométricas de la subcuenca.....	53
Figura 18. Variación de los valores medios diarios en las estaciones hidrométricas analizadas del cauce.....	66
Figura 19. Variación de la mediana de los caudales mensuales las dos estaciones analizadas.....	67
Figura 20. Variación inter-anual estación 18193 sin extracción de agua.....	68
Figura 21. Variación inter-anual estación 18193 con extracción de agua.....	68
Figura 22. Variación inter-anual estación 18223.....	69
Figura 23. Efectos de la extracción de agua sobre los caudales mensuales.....	70

Figura 24. Componentes del caudal ecológico para la estación hidrométrica 18193.....	78
Figura 25. Rangos de variabilidad anual (RVA) para la estación 18193.....	80
Figura 26. Caudales medios mensuales para la estación 18223.....	82
Figura 27. Tendencia del caudal base para la estación 18223.....	84

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la sociedad ha estado estrechamente vinculado con el agua de los ríos. Por mucho tiempo se pensó que la cantidad de agua de los ríos y de otras fuentes era infinita y por ello se abusó en su utilización. El crecimiento de la población y el aumento de las actividades económicas que utilizan al agua en sus procesos de producción han generado una creciente demanda del recurso. En el caso de los ríos, la consecuencia ha sido la reducción del caudal y la creciente contaminación del agua, con el consiguiente deterioro de la condición ecológica de los ríos y la disminución de la disponibilidad del agua, en cantidad y calidad, para los diferentes usuarios del agua. También han generado impactos sobre la biodiversidad de la flora y fauna acuática, y de la vegetación riparia o ribereña.

El reconocimiento de la importancia de una buena condición ecológica del río para el funcionamiento de los sistemas ribereños ha dado como consecuencia que a nivel mundial se consideren los requerimientos de los ecosistemas en la gestión del agua. Diversos países como los de la Unión Europea y Estados Unidos han desarrollado estrategias para la protección y manejo de los ecosistemas hídricos. Las investigaciones sobre los requerimientos mínimos para asegurar las funciones de los ríos han dado origen al concepto de caudal ecológico. Se han desarrollado diversas metodologías para determinar la cantidad suficiente de caudal y los países han realizado una serie de reformas en su legislación para incluir el concepto en la gestión y aprovechamiento del recurso agua.

En México, en el año 2004 la Ley de Aguas Nacionales (LAN) adiciona un usuario del agua más al que denomina caudal ecológico o uso ambiental del agua. En septiembre del 2012 entra en vigor la norma que establece los lineamientos para determinar el caudal ecológico. La aplicación del concepto de caudal ecológico en la práctica en México, no ha pasado de su incorporación en la legislación ambiental. Aun cuando la LAN establece la obligatoriedad de asignar un volumen de agua de los ríos para el

mantenimiento de los ecosistemas, esto no se ha aplicado. En gran parte se debe a dos causas. La primera fue la falta de un lineamiento nacional para determinar el volumen de caudal ecológico para un río en particular, lo cual fue subsanado con la publicación de la NOM NMX-AA-159-SCSI-2012. La segunda causa se relaciona con la inevitable afectación de los usuarios del agua tradicionales en la asignación de sus cuotas de agua, ya que el caudal disponible de los ríos está distribuido entre los usuarios de los ríos, dentro de los cuales no estaba el usuario ambiental.

En el país existen pocos estudios que determinen del caudal ecológico de los ríos y no se tienen estudios sobre los posibles impactos sobre los demás usuarios del agua. Esto último es importante porque puede generar conflictos sociales locales o regionales, sobre todo con el sector agropecuario. El sector agropecuario es el que demanda mayor volumen del agua superficial, ya que absorbe el 77% del total del volumen de agua asignado a todos los sectores (CONAGUA, 2011). En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo con dos objetivos principales. El primero fue estimar el caudal ecológico de una cuenca en particular con una metodología de uso generalizado, para lo cual se utilizó el método IHA-RVA. El segundo objetivo fue estimar el impacto económico sobre los usuarios del agua del río. Se seleccionó la cuenca del Río Yautepec, en el estado de Morelos, México. En esta cuenca el usuario de mayor demanda de agua es el agrícola, para la producción del cultivo de caña. Más del 80% de la superficie de la cuenca es sembrada con este cultivo.

1.1 Planteamiento del problema de investigación

La Ley de Aguas Nacionales consideró cuatro usuarios del agua (consumo humano, agropecuario, industria, generación de energía) hasta el año 2004. Posteriormente, en la nueva Ley del 2004 se incluye un nuevo usuario al cual se denomina caudal ecológico. Sin embargo, a nivel mundial el concepto de caudal ecológico es anterior al 2004, ya que en el año de 1976, Tennant (Tennant, 1976; Growns, 1998) propuso uno de los métodos más usados para estimar el caudal ecológico, conocido como el Método Tennant o Método Montana. El concepto tomó mayor relevancia en las

iniciativas mundiales sobre la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), en las que se pone énfasis en la necesidad de asignar cierta cantidad de agua a los ecosistemas, de tal manera que éste pueda cumplir con las funciones ecológicas que provee. Esto implica estimar esa cantidad de agua, por lo que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) durante 13 años, de 2004 a 2012, fue responsable de dirigir la selección los lineamientos nacionales para estimar los caudales ecológicos de los ríos de México. Debido a la gran cantidad de propuestas metodológicas desarrolladas a nivel mundial, se han propuesto alrededor de 203 variantes de metodologías, el proceso para seleccionar la metodología más adecuada es complicado. Los estudios de soporte para estimar los caudales ecológicos en México son limitados. El trabajo más importante al respecto en México se realizó en el Río Conchos, donde se aplicó una metodología Holística de Bloques de Construcción (BBM). El enfoque consistió en establecer la cantidad de volumen de agua que se debe otorgar al ecosistema para asegurar la salud de éste. Así mismo, no hay estudios sobre posibles impactos socioeconómicos de la aplicación de la LAN en lo relativo a la asignación de los caudales ecológicos. En este sentido, se considera que se requiere evaluar metodologías para determinar la cantidad de agua que un ecosistema hídrico necesita para cumplir con sus funciones ecológicas y establecer un escenario del impacto económico sobre los usuarios afectados por la redistribución de los caudales de un río. De estos usuarios, el más afectado será el agropecuario, debido a que demanda mayores volúmenes de agua (77% de total del volumen de agua asignado a todos los sectores).

La cuenca del Río Yautepéc, en el estado de Morelos, es una de las cuencas de México en las que la redistribución del agua del río para asignar los caudales ecológicos tendría un impacto notable en el ingreso económico de los productores agropecuarios. Al disminuir la asignación de agua al sector, se afectaría a un cultivo comercial importante, el de la caña de azúcar, que se siembra en el 87.8% de las tierras agrícolas de regadío de la cuenca.

Las preguntas de investigación que dirigieron esta investigación fueron:

- 1) ¿Cuál es el caudal ecológico en la cuenca del Río Yautepec?
- 2) ¿Cómo impacta la asignación del caudal ecológico al usuario agrícola en la cuenca de estudio?

1.2 Objetivos

- 1) Evaluar la disponibilidad de caudales del Río Yautepec para asignarlos como caudal ecológico para el funcionamiento del ecosistema acuático del río y el ecosistema ripario.
- 2) Determinar cuál sería el impacto económico en los usuarios agrícolas sobre la disminución de los caudales concesionados para el sector con el fin de reasignarlos como caudal ecológico.

1.3 Hipótesis

- 1) La disponibilidad de agua superficial de la cuenca del Río Yautepec en el estado de Morelos es insuficiente para abastecer tanto la demanda del usuario agrícola del cultivo principal, caña de azúcar, como la demanda de caudal ecológico.
- 2) La reasignación del agua concesionada a los usuarios agrícolas de la cuenca del Río Yautepec, para cumplir con la demanda de caudal ecológico tendrá un impacto económico alto en los productores de caña de azúcar, quienes son los principales usuarios del agua de la cuenca.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1 La cuenca en la gestión integral del recurso hídrico

2.1.1 Concepto de cuenca

Una cuenca es toda área drenada por una corriente o sistema de corrientes, constituye la principal unidad territorial donde el agua que proviene del ciclo hidrológico, es captada, almacenada y disponible como oferta de agua. Los límites de la cuenca se definen por la forma del paisaje y corresponden a las partes más altas del área que encierra un río (también llamado parteaguas) (CONAFOR, 2007). La definición de cuenca no establece límites en cuanto a la extensión de su superficie. Sin embargo, es común que de acuerdo a su tamaño se categoricen en cuenca, subcuenca, y microcuenca. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y el Instituto Nacional de Ecología (INE) han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales, se han agrupado en 728 cuencas hidrológicas. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas, y estas a su vez están agrupadas en las 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (SEMARNAT, 2010).

La cuenca se ha utilizado como unidad de análisis y de gestión del recurso agua y de otros recursos naturales (Banco Mundial, 1993; Bustamante, 2006). En México, en el año 1947 la cuenca hidrográfica fue utilizada institucionalmente como la unidad básica de gestión para el manejo de los recursos naturales y proyectos de desarrollo regional de las cuencas de los ríos principales del país. En esa década se constituyeron las Comisiones Hidrológicas de los grandes ríos del país (FAO, 2000).

2.2 La cuenca como unidad de manejo integral del recurso agua

La cuenca constituye la principal unidad territorial donde el agua proveniente del ciclo hidrológico es captada, almacenada y disponible como oferta de agua. De esta manera, se establece un proceso de interacción permanente y dinámica entre la oferta y la demanda del recurso agua. Dourojeanni *et al.* (2002) consideran tres razones principales que explican por qué la cuenca es la unidad adecuada para la gestión integrada del agua. La primera, porque las cuencas son las principales formas terrestres dentro del ciclo hidrológico, al captar y concentrar el agua que proviene de las precipitaciones; esta característica física genera una interrelación e interdependencia entre los usos y usuarios en una cuenca. La segunda, porque en el espacio de las cuencas interactúan los recursos naturales no renovables y bióticos en un proceso permanente y dinámico. La tercera, porque en el territorio de las cuencas se interrelacionan los sistemas socioeconómicos formados por los usuarios de la cuenca, ya sean habitantes o interventores externos de la misma; cada grupo con sus propios intereses. Los mismos autores reconocen que la cuenca no es la única unidad para la gestión de los recursos naturales. En ocasiones es pertinente seleccionar otras unidades territoriales, debido a que los límites político-administrativos no coinciden con los límites naturales de la cuenca y los procesos de gestión son altamente dependientes de los límites políticos administrativos, sobre todo para la asignación de recursos financieros.

2.3 Manejo integral del recurso hídrico

2.3.1 Concepto de Manejo Integral del Recurso Hídrico (MIRH)

El concepto de Manejo Integrado del Recurso Hídrico, también conocido como Gestión Integrada de Recursos Hídrico (GIRH), surgió en la década de 1930. La Organización de las Naciones Unidas comenzó a promoverlo desde finales de 1950. Para marzo de

1977, en la Conferencia del Agua de las Naciones Unidas organizada en Mar del Plata, Argentina, se derivó un compendio de recomendaciones sobre el agua, sus diferentes usos y su protección. En la Conferencia Internacional sobre Agua y Medio Ambiente en Dublín en 1992 se establecieron cuatro principios universales como guías para el Manejo Integral de los Recursos Hídricos. Se puso énfasis en garantizar el acceso al recurso hídrico para las generaciones actuales y futuras, y disminuir la crisis mundial por escasez de agua. Posteriormente, la Asociación Mundial para el Agua (Global Water Partnership, GWP) definió el Manejo Integrado de los Recursos Hídricos como un proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas (GWP, 2000).

El Manejo Integrado de los Recursos Hídricos no es un concepto acabado ni tiene una definición única, cada país ha acogido el concepto en función de sus condiciones. No existen procedimientos únicos para su implementación. El MIRH reconoce todos los componentes de la sustentabilidad: el ambiental, el social y el económico. Incluye varias dimensiones como se describe a continuación (Carabias y Landa, 2005):

- La interacción entre el ciclo hidrológico y los demás recursos naturales, aguas superficiales y subterráneas y el ecosistema.
- La vinculación entre el agua que circula por la biomasa de la vegetación y que por el proceso de evapotranspiración fluye por cauces de agua y acuíferos.
- La interdependencia entre el sistema humano y el natural.
- La relación entre la disminución de la calidad del agua y su disponibilidad jurídica.
- La integración de las variables sociales, económicas y ambientales.
- La interacción entre los intereses de los usuarios aguas arriba con los de aguas abajo.
- La integración de los diferentes sectores involucrados en la salud, alimentación, desarrollo económico, social, entre otras.

2.3.2 Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible

En la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA) celebrada en Dublín, Irlanda, del 26 al 31 de enero de 1992 (CIAMA, 1992), se establecieron cuatro principios rectores, conocidos como principios de Dublín, los cuales han sido reconocidos como guía para el Manejo Integrado de los Recursos Hídricos (GWP, 2009). Los principios de Dublín son:

- 1) El agua dulce es un recurso vulnerable y finito, esencial para mantener la vida, el desarrollo y el medioambiente.

Para asegurar una gestión eficaz del recurso hídrico se requiere un enfoque integrado, que contemple aspectos económicos, sociales. El agua, indispensable para la existencia de la vida, está profundamente relacionada con las necesidades y actividades del ser humano.

- 2) El desarrollo y manejo del agua debe estar basado en un enfoque participativo, involucrando a usuarios, planificadores y realizadores de política a todo nivel.

Todos los actores involucrados en todas las diversas escalas deben participar de éste proceso de planificación para la protección y conservación del recurso hídrico a nivel mundial, a través de reformas a las leyes en materia del recurso hídrico.

- 3) La mujer juega un papel central en la provisión, el manejo y la protección del agua.

La participación de la mujer como usuaria del recurso hídrico es muy limitada en cuanto a la toma de decisiones a causa de las formas de organización social y aspectos culturales en ciertas regiones, por lo cual al incluir este principio se asegura un mecanismo para incluir a la mujer en este proceso.

- 4) El agua posee un valor económico en todos sus usos competitivos y debiera ser reconocido como un bien económico.

El agua como bien económico significa promover un valor más alto de sus usos, especialmente bajo condiciones de escasez, en el cual se toman en cuenta los costos y beneficios sociales de los diferentes usos del agua. Bajo esta condición el valor más alto del agua siempre será el suministro doméstico, si éste falla los costos económicos se elevarán.

En el primer principio, se reconoce la importancia del agua para mantener la vida en los ecosistemas. Esto es retomado en la Cumbre de la Tierra de 1992, en Río de Janeiro. En ella se incluyen los requerimientos de agua al ambiente. Como resultado se adopta la Agenda 21, una especie de guía respecto al crecimiento económico de los países considerando temas de equidad social y protección ambiental. Los gobiernos acuerdan que en relación al manejo de los recursos hídricos se dará prioridad a la satisfacción de las necesidades básicas y a la conservación de los ecosistemas (Agenda 21, 1992).

2.3.3 Usos del agua identificados en el manejo integral del agua en cuencas

Los usos del agua tienen diferentes clases de utilización de la misma según su destino. Los usos más tradicionales son: domésticos, industriales, agrícolas, hidroeléctricos, recreativos, para la navegación y acuicultura. Balairón (2002) define dos clasificaciones de los usos del agua: la que atiende a que haya o no consumo de agua en el uso, es decir usos consuntivos y no consuntivos, y las que los clasifica en prioritarios y secundarios según la necesidad del agua para lograr el fin demandado. La clasificación más generalizada es en usos del agua consuntivos y no consuntivos. Los primeros son los que extraen el recurso de su ubicación natural, los utilizan para fines industriales, agrícolas, domésticos y luego vierten en un sitio diferente en menor cantidad y calidad. Los usos no consuntivos no requieren sacar el agua de su lugar natural ni modifican el recurso en cantidad ni calidad, por ejemplo usos para la navegación y recreativos. En la

segunda clasificación, los usos prioritarios son los que necesitan de manera imprescindible del recurso agua para su fin, tales como el uso doméstico, agrícola, industrial; los usos secundarios son en los que dicho fin podría lograrse mediante otros recursos, por ejemplo el uso del agua para la producción de electricidad.

En México, la Ley de Aguas Nacionales establece prioridades en los usos consuntivos. Por orden de prioridad se encuentra el consumo humano, seguido por el uso para la agricultura, uso industrial y generación de energía. La Comisión Nacional del Agua reportó en 2011 que la agricultura representa el 76.7% del total de los usos del agua, el abastecimiento público el 14.1%, el uso industrial el 4.1% y el uso hidroeléctrico el 5.1%. El sector agrícola es el que desperdicia más agua, ya que del 45% al 65% del agua concesionada no se aprovecha. Entre el 15% y el 25% de las aguas residuales generadas por todos estos usos son tratadas, el resto va a parar a los ríos, lagos y embalses sin tratamiento alguno, acarreando problemas para la salud de la población y para el equilibrio de los ecosistemas (CONAGUA, 2011). En términos generales, la distribución del agua en México sigue un patrón similar al mundial, para el cual las proporciones de extracción son aproximadamente 70% agropecuaria, 11% municipal y 19% industrial (AQUASTAT, 2012).

El uso del agua como requerimiento ambiental hasta hace unos años no era considerado. Más bien era entendido como una restricción al sistema de explotación y no como una demanda que alguien realiza. En el caso de México es en el año de 2004 cuando se incorpora en la Ley de Aguas Nacionales éste uso.

2.4 El agua como base del mantenimiento de los procesos y funciones del ecosistema

2.4.1 Importancia del uso ambiental del agua

El agua satisface necesidades básicas para los seres humanos y los ecosistemas. Provee servicios fundamentales como la regulación del funcionamiento de los ecosistemas y el balance de la energía en el planeta. El proceso de regulación de estos servicios es el ciclo hidrológico (Figura 1). Achkar *et al.* (2004) lo definen como un proceso continuo de flujos de desplazamiento del agua que se producen en la biósfera y se interrelacionan en forma dinámica y permanente, reciclando el agua de los reservorios naturales para cumplir las funciones ambientales que hacen posible el desarrollo y mantenimiento de la vida.

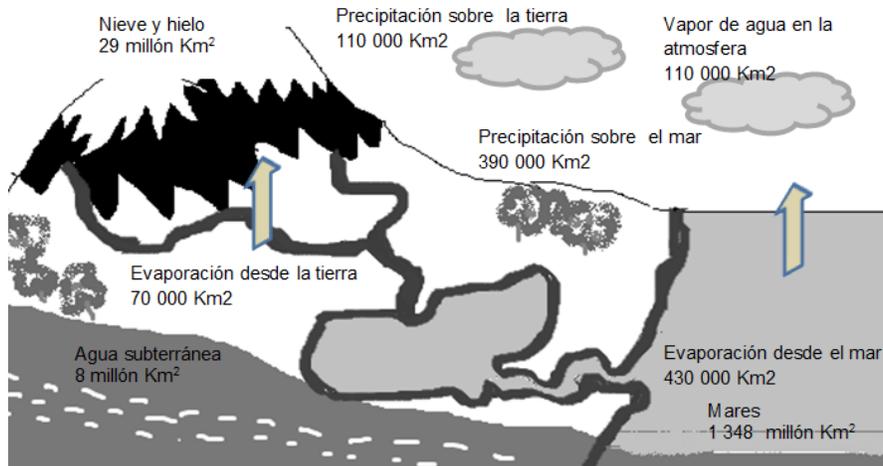


Figura 1. Ciclo hidrológico.

La dinámica de los componentes del sistema hidrológico y las interacciones de esos componentes puede conducir a condiciones de desequilibrio en la disponibilidad de agua superficial y subterránea, creando condiciones de escases para los diferentes usos del recurso, incluyendo el uso ambiental o ecológico. Por esto, la determinación del caudal ecológico plantea la necesidad de un análisis integral de los usos del agua y

una gestión eficiente del agua para promover condiciones de disponibilidad suficiente, en cantidad y calidad, para satisfacer la demanda de los diferentes usuarios y minimizar conflictos.

2.4.2 El régimen hidrológico y su influencia en el ecosistema

La composición, estructura y función de los ecosistemas hidrológicos depende en gran medida del régimen hidrológico, siendo éste el factor condicionante de la integridad ambiental del ecosistema. El régimen hidrológico define el flujo de agua de un cauce en un periodo de tiempo. El caudal tiene variaciones temporales y espaciales. Bunn y Arthington (2002), señalan que debido a la complejidad de las interacciones del régimen hidrológico su estudio debe ser abordado tanto en la escala espacial como temporal. Asignar agua al ambiente requiere conocer las características del régimen hidrológico.

El régimen hidrológico se caracteriza por su condición natural o alterada. El régimen natural es aquel que constituye un estado de referencia de un determinado ecosistema. El régimen alterado es aquel que ha sufrido una serie de modificaciones, como la construcción de presas, o simplemente una acumulación de alteraciones humanas. Cada cauce posee un régimen propio con componentes que lo caracterizan, tales como la magnitud, la frecuencia, la estacionalidad, la duración y las tasas de cambio (Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 1998). Si el ecosistema hidrológico es perturbado todo o algunos de los componentes del régimen sufren una alteración. Poff *et al.* (1997) citan ejemplos en la que la restauración de alguno de los componentes del régimen hidrológico ha ayudado a mejorar procesos físicos y biológicos del ecosistema, encaminándolo a un estado de referencia natural. Para facilitar el análisis de las características distintivas de un régimen hidrológico, se suelen utilizar gráficos llamados hidrogramas que hacen más fácil la observación de rasgos como valores de caudal máximos y mínimos, cambios temporales, patrones estacionales, entre otros.

2.4.3 Componentes del régimen hidrológico

El régimen hidrológico considera cinco componentes para regular y controlar procesos ecológicos (Poff *et al.*, 1997). Estos componentes se basan en el paradigma del régimen de caudales naturales, el cual establece que la estructura, función y biota de un ecosistema ribereño son generadas por patrones de variación temporal en los caudales. Indica que los aspectos del régimen de caudales (conocidos como componentes) que poseen mayor significancia son la magnitud, frecuencia, duración, estacionalidad y tasas de cambio. Lytle y Poff (2004), indican que estos componentes son claves en la conservación de la biodiversidad y la integridad ecológica de los ecosistemas ribereños (Figura 2).

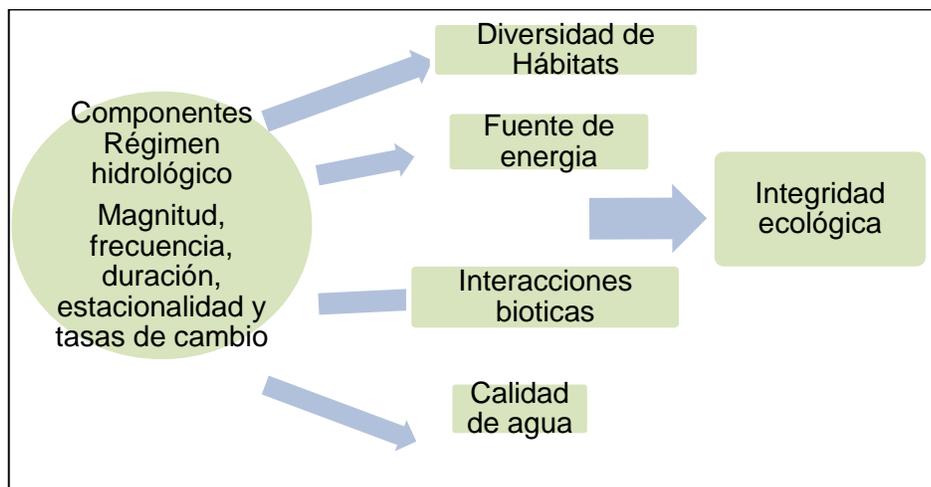


Figura 2. Interacción de los componentes en el régimen hidrológico.

Cada componente del régimen hidrológico es un factor clave del ecosistema. La magnitud de agua que corre en el cauce de los ríos determina la disponibilidad de agua superficial en el ecosistema. La frecuencia del caudal condiciona la dinámica ecológica y por tanto la biodiversidad; se refiere a la periodicidad con que ocurren ciertos valores de caudal como mínimos y máximos en cierto periodo de tiempo y es inversa a la magnitud del caudal, es decir los valores extremos del caudal ocurren con poca frecuencia. La duración está asociada con la resiliencia y ciclos de vida de las diferentes especies; constituye el intervalo de tiempo que duran determinadas

condiciones de caudal (ya sea de un evento o periodo de tiempo), por ejemplo avenidas máximas o sequías. La estacionalidad de los caudales permite sincronizar los ciclos de vida de las especies que habitan en el cauce y se define como la regularidad con la que cierto evento acontece en una época determinada, a diferentes escalas de tiempo. Las tasas de cambio de caudal están asociadas a la capacidad de respuesta de la biota; se caracterizan por la rapidez en la que un caudal pasa de una magnitud a otra (Figura 3).

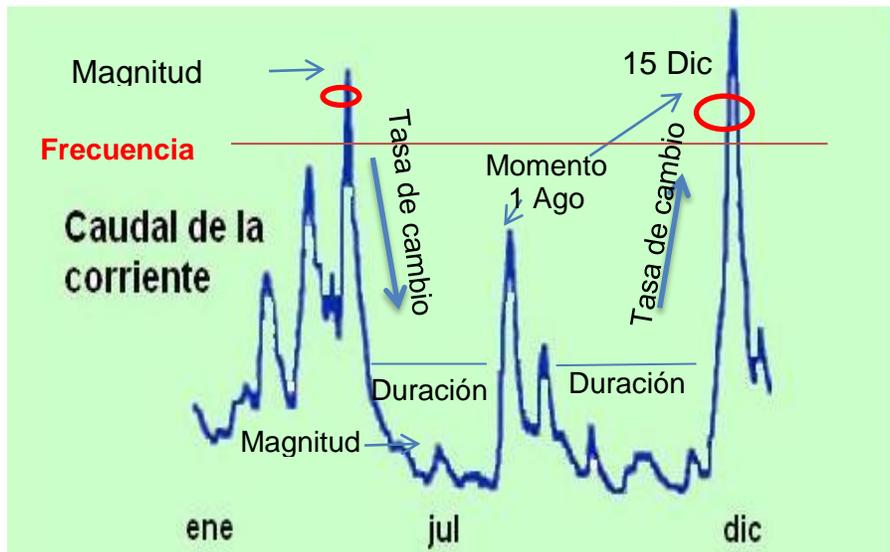


Figura 3. Componentes del régimen hidrológico.

Para caracterizar el régimen de caudales se debe contemplar los cinco componentes. Se debe tomar en cuenta los valores medios y extremos, así como las variaciones intra-anales e interanuales.

La capacidad para conservar o restaurar los componentes del régimen natural del caudal puede asegurar una buena funcionalidad del ecosistema. Poff *et al.* (1997) señalan que los diferentes niveles de caudal tienen una correlación directa con respecto a la funcionalidad biológica del ecosistema. Diferencian al caudal en cinco niveles de flujo. El primer nivel está definido por los caudales base, los cuales se obtienen de la aportación del acuífero por medio de manantiales que garantizan el aporte en épocas de poca o nula precipitación. El siguiente nivel corresponde a

avenidas habituales de pequeña magnitud, con una periodicidad anual o menor; su función biológica consiste en el transporte de sedimentos y limpieza del sustrato. El tercer nivel es el asociado a avenidas que producen caudales mayores y mantienen el equilibrio dinámico de la morfología del cauce; favorecen el intercambio de materia orgánica y sedimentos en la franja comprendida entre el nivel de aguas altas y bajas, y posibilitan la regeneración y persistencia de la vegetación riparia. El cuarto y quinto nivel lo conforman las avenidas de magnitudes superiores a los demás niveles, con periodos largos de retorno; sobrepasan el cauce y acceden a la llanura de inundación, favoreciendo la conectividad cauce-llanura o viceversa. La existencia de estas avenidas garantiza todos los procesos biológicos dependientes de este intercambio (crecida y decrecida) de agua, sedimentos, organismos y semillas (Figura 4).

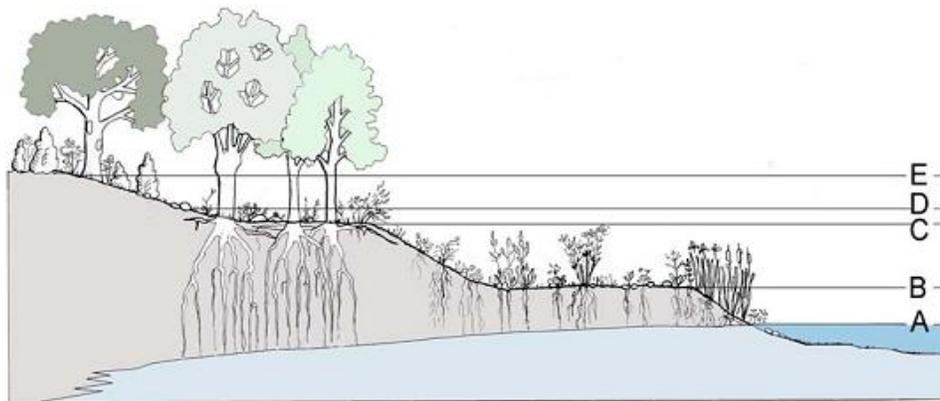


Figura 4. Diferentes niveles de flujo y su funcionalidad.

2.5 El papel del hombre en el manejo integral del agua

2.5.1 El hombre como principal usuario del agua

La relación del hombre con el agua ha determinado diversas formas de percibir y asignar un valor de uso al agua. La actitud del hombre como usuario del agua no es constante. Cuando el recurso es escaso o de mala calidad el ser humano le da un valor muy alto y cuando el recurso está disponible en abundancia su condición de imprescindible pasa desapercibida (Caballer y Guadalajara, 1998). El hombre como usuario del recurso hídrico se preocupa por utilizar el agua para la satisfacción de sus

necesidades, sin tomar en cuenta los efectos que sus acciones causan en otros usuarios y a los ecosistemas. Considera al agua como bien de libre disposición. Una vez que se ha apropiado del recurso no le preocupa el efecto que causa en el ciclo hidrológico. El uso inadecuado del agua ha provocado un desequilibrio en la naturaleza de este recurso relativamente escaso. Aunque en el planeta que habitamos la cantidad de agua es abundante, sólo 2.53% del agua es dulce y el resto es salada.

2.5.2 Conflictos entre los usos antropocéntricos del agua

El agua ha sido fuente de desarrollo, cooperación y disputa entre individuos, pueblos y naciones. En la actualidad se han intensificado los conflictos por ella, ya sea porque es un recurso escaso, por el territorio en el que se encuentra o por su suministro. Es considerada como un medio de control político y estratégico y recientemente motivo de conservación de los ecosistemas. Haftendorn (2000) distingue tres tipos de conflictos en el agua. Los principales son por usos para consumo humano, riego y generación de electricidad. Otro tipo de conflictos son por contaminación y por último, conflictos de distribución debidos a la escasez. Al respecto, Martin *et al.* (2007) señalan que los conflictos aparecen cuando los recursos o las infraestructuras son insuficientes para atender las necesidades de los usuarios del sistema.

El uso del agua en el México está asociado a una gestión del recurso que ha favorecido el desarrollo de la industria, áreas urbanas y agricultura, lo que origina una distribución desigual, costosa y degradadora. Con relación al uso ambiental, la gestión del agua es escasa. Las políticas del agua han dado prioridad a aspectos técnicos y económicos, a través de la creación de obras hidráulicas para el desarrollo industrial y han descuidado el manejo sustentable del agua y los ecosistemas (Aboites, 2009). En México no existen estadísticas oficiales sobre el número de conflictos sociales con respecto al uso y aprovechamiento del agua. Un estudio realizado a finales de la década de los 90 muestra que los principales conflictos son los relacionados con la dotación (22%), escasez y el acceso al agua (18%), infraestructura (14%), precios y cobros (14%), control del agua (13%) y contaminación (7%). Estos datos indican que las necesidades

elementales por agua y usos consuntivos son aún los principales motivos de los conflictos, aun cuando existen evidencias de las causas ambientales que las generan (Agüero, 2010).

En el tema del manejo de conflictos en México, la CONAGUA es la encargada de la aplicación de los mecanismos de prevención, conciliación y arbitraje de conflictos en materia de agua. Esta disposición la comparte con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), que es la encargada de los delitos por contaminación de cuerpos de agua. Así como con la Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), que evalúa los riesgos y daños a la salud humana. La resolución de los conflictos es complicada debido a que los gobiernos carecen de capacidad y de recursos financieros para implementar medidas para prevenir y reducir el impacto de éste problema.

2.5.3 Conflictos entre los usos ambientales y antropocéntricos del agua

Ávila (2002) plantea que al incluir el ambiente en la vida social, el cuidado de éste pertenece al hombre y no a la naturaleza. Sin agua los ecosistemas y la sociedad no funcionan. Esta realidad es planteada como un conflicto de competencias entre el ser humano y el ecosistema por el recurso hídrico.

Por otro lado, Rockstrom y Gordon (2001) muestran que los problemas del agua se deben a la mala gestión del recurso. Es común que la cantidad de agua extraída del ecosistema sea mayor a su tasa de renovación. Además, después de utilizarla se devuelve contaminada, generando cambios en la estructura y funcionamiento de los sistemas naturales. El uso del agua está produciendo una degradación alarmante de los ecosistemas hídricos. Desde los años 50 un número muy importante de especies de estos ecosistemas se han extinguido y otras se encuentran amenazadas (Revenge, 2006).

Aunque el aspecto ambiental comienza a incluirse en la conciencia social no es suficiente para cambiar las actitudes en favor del ambiente. Respetar el valor de los ecosistemas implica dejar agua suficiente en los cauces. La extracción de agua para los usos consuntivos debe condicionarse por la disponibilidad de la fuente. El dilema radica en establecer cuál es el caudal necesario que debe dejarse en determinado cauce.

2.6 Los caudales ambientales o ecológicos como elementos del manejo integral del agua

2.6.1 Definición de caudal ambiental

En las últimas décadas se ha desarrollado el concepto de caudal ecológico bajo diferentes enfoques. La literatura presenta términos sinónimos tales como caudales ambientales, caudales de compensación, caudales de mantenimiento, caudales mínimos, caudales de reserva. Para fines de la presente investigación se opta por el término de caudal ecológico conforme lo establece la Ley de Aguas Nacionales en México. El Davis e Hirji (2003) definen a los caudales ecológicos como el agua que se deja correr en un ecosistema hídrico o el caudal que se libera dentro de él, cuyo propósito es manejar la condición del ecosistema. Para Baeza y García (2003) los caudales ecológicos tienen la finalidad de ser capaces de mantener el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial, que ese cauce contiene en condiciones similares a las naturales. Por otra parte, en la Declaración de Brisbane, Australia, durante el décimo simposio sobre ríos y conferencia internacional International de caudales ecológicos (River symposium and International Environmental Flows Conference) celebrada en septiembre de 2007, se señaló a los caudales ecológicos como aquellos que suministran de los caudales necesarios para sostener a los ecosistemas hídricos en coexistencia con la agricultura, la industria y las ciudades. La Ley de Aguas Nacionales (LAN) de México define el uso ambiental del agua, o caudal ecológico, como el caudal necesario en cuerpos receptores que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del ecosistema.

La evolución conceptual del caudal ecológico se ha perfilado a un término integral considerando elementos sociales, económicos y ambientales, con el propósito de encontrar el equilibrio entre el uso y la protección de los recursos hídricos naturales. La evaluación del caudal ecológico es un proceso social y científico, en el que la sociedad es quien decide los servicios que espera de los ríos y las condiciones que desea mantener de éstos. Para poder determinar el caudal ambiental es necesario tener en cuenta su régimen hidrológico y la competencia entre los usuarios.

2.6.2 Antecedentes u origen del concepto de caudal ecológico

El término caudal ecológico tiene su origen en Estados Unidos, donde se le denominó “instreamflow”. Surgió como una preocupación por conservar los sistemas acuáticos de los salmones, una especie importante desde el punto de vista económico. Su definición estaba dada por un caudal necesario para mantener en un río o tramo las condiciones adecuadas para algunas especies acuáticas indicadoras, con algún valor para conservación, manejo y reproducción (Cachón, 2002). Esta definición se fue ampliando para abarcar los componentes del ecosistema hidrológico. Por lo tanto, el término «instreamflow» se puede entender como un caudal específico a mantener dentro de un cauce para cumplir determinados objetivos de conservación y manejo de una cuenca. Posteriormente, la tendencia mundial de incorporar los caudales ecológicos en el manejo integrado de recursos hídricos llevó a la incorporación del concepto en la normatividad y las políticas de los países.

Tharme (2003) menciona que las experiencias sobre manejo de caudales ecológicos comenzaron en los años 40 en Estados Unidos. A partir de los años 70's se da un rápido desarrollo de diferentes metodologías, considerando una variedad de criterios. Cada país presenta diferencias en el concepto de caudal ecológico en relación a los objetivos de gestión. En Estados Unidos y Canadá el concepto de caudal ecológico en un principio fue concebido para mantener las poblaciones de peces, para posteriormente orientarse hacia la conservación de los ecosistemas. Países de

América latina, como Colombia, Costa Rica, Brasil y Chile, proponen un caudal ecológico para la conservación y restauración de un ecosistema. En México, la CONAGUA ha desarrollado de una Norma Mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Esta norma es parte del cumplimiento de la Ley de Aguas nacionales del 2004, que establece la obligatoriedad de destinar parte de los caudales de los ríos de México para el uso ambiental (caudal ecológico), con el fin de equilibrar la demanda de agua para los usos consuntivos y la subsistencia de los ecosistemas. La SEMARNAT ha realizado una recopilación de aplicaciones de caudales ambientales en el país (Alonso - Eguía *et al.*, 2007).

En cuanto al marco internacional, la Unión Europea, a través de la Directiva Marco del Agua 2000, obliga a sus estados a vincular la dimensión ambiental a la política de aguas. España incorporó el concepto de caudal ambiental en su reforma de la Ley de Aguas en 2001, para cuantificar las restricciones de uso del recurso (Baeza y Vizcaino 2008). En Sudáfrica, las normas sobre el agua establecen que la autoridad nacional debe velar por el manejo del recurso en beneficio público, pero sin comprometer el funcionamiento natural del ambiente. Asimismo, determina que en los ríos debe establecerse una Reserva Ecológica de agua para mantener necesidades humanas básicas y el funcionamiento ecológico del ecosistema y que tiene prioridades sobre los restantes usos (Brown *et al.*, 2006). Australia integró a su política nacional de gestión de recursos hídricos el concepto de requerimientos ambientales de agua (ARMCANZ y ANZECC, 1996).

2.6.3 Métodos para estimar los caudales ecológicos

Se han desarrollado diversas metodologías para definir los caudales ecológicos en ríos con regímenes de caudales naturales o alterados. Tharme (2003) recopiló 207 métodos que determinan caudales ecológicos y los agrupa en cuatro categorías: hidrológicos, hidráulicos, de simulación de hábitat y holísticos. Otros métodos abarcan una combinación de estos diferentes tipos de métodos.

Los métodos hidrológicos se basan en el análisis de información de series de tiempo de los caudales a diversas escalas. Estas series son el resultado del registro histórico en estaciones de aforos o estimaciones obtenidas mediante regionalización hidrológica. La viabilidad de aplicación de un método hidrológico está condicionada con la disponibilidad de información para el cauce que se desee estimar el caudal ambiental. Se caracterizan por ser rápidos, de bajo costo, utilizan pocos parámetros para interrelacionar los componentes hidrológicos y biológicos. Acreman y Dunbar (2004), señalan que debe tenerse en cuenta la imprecisión que puede significar su utilización, ya que su extrapolación a otra región con diferentes características de donde se originó no es válida ecológicamente. Los métodos hidrológicos se agrupan en categorías en función del tipo de régimen de caudal ambiental que establecen. Se consideran tres métodos hidrológicos principales:

1. Métodos que establecen un único valor de caudal ecológico para todo el año. Este valor puede estar asociado a un porcentaje del caudal medio anual del curso (método de Montana -Tennant 1976). Puede determinarse también de acuerdo a la curva de permanencia de caudales diarios (Método Hoppe). Una tercera opción es fijarlo en forma proporcional al área de la cuenca (Método de Robinson). Por último, se puede determinar el caudal mínimo semanal asociado a un determinado período de retorno (Métodos "7Q").

2. Métodos que establecen un valor de caudal ambiental para cada mes del año. Se determina como un porcentaje del caudal medio mensual o en función de la curva de permanencia de caudales diarios para cada mes del año.

3. Métodos que proporcionan un régimen completo de caudales ecológicos. Se consideran los cinco componentes del régimen de caudales (magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio). Dentro de estos métodos el de mayor relevancia es el método de aproximación por rangos de variabilidad (RVA) que utiliza una serie de indicadores de alteración hidrológica. El método RVA (Richter *et al.*, 1997)

es un enfoque metodológico que propone establecer los objetivos de gestión de los ríos regulados y sus ecosistemas asociados. Se basa en la variabilidad hidrológica y su influencia en la ecología acuática. Asocia las características de frecuencia, duración, momento y tasas de cambio con el mantenimiento de los ecosistemas. El método consiste en calcular a partir de la serie de caudales medios diarios, una serie de indicadores de alteración hidrológica (IHA) predefinidos.

En México el método de mayor aplicación es el Tennat modificado. se utiliza principalmente para establecer caudales recomendados en evaluaciones de impacto ambiental en presas (Gomez *et al.*, 2007).

Los métodos hidráulicos son similares a los métodos hidrológicos, con la diferencia de que estos involucran el conocimiento de parámetros hidráulicos, tales como velocidad, profundidad, perímetro mojado, entre otros. Utilizan dos criterios para determinar los requerimientos mínimos de caudal: 1) el perímetro mojado se incrementa al aumentar el caudal, y puede ser considerado como umbral del caudal mínimo, 2) el porcentaje de reserva de hábitat definido por un límite mínimo de la anchura o del perímetro mojado con un determinado valor de caudal (caudal medio). Son los precursores de los llamados métodos de simulación del hábitat (Tharme, 1996). Los más destacados son el método del perímetro mojado, método de Idaho y el método R2Cross.

Los métodos de simulación de hábitat o de preferencia de hábitat utilizan los análisis hidráulicos a mayor detalle y modelan la cantidad y capacidad de hábitat acuático para un organismo objetivo bajo diferentes regímenes hidrológicos, de acuerdo a distintos escenarios. Para su aplicación requieren información batimétrica y topográfica del curso de agua, información ecológica y son costosos (Acreman y Dunbar, 2004). La metodología más conocida es la llamada Instream Flow Incremental Methodology (IFIM). Esta metodología basa sus resultados en un modelo de simulación del hábitat llamado Physical Habitat Simulation System (PHABSIM). El Instream Flow Incremental Methodology (IFIM), es un sistema de soporte de decisiones de gestión para determinar los beneficios y consecuencias de las diferentes alternativas de manejo del

agua, según la variabilidad de hábitat natural en el tiempo y el espacio (Bovee *et al.*, 1998).

Los métodos holistas permiten determinar regímenes hidrológicos para el mantenimiento del ecosistema y además incluyen aspectos socioeconómicos. Las metodologías holistas son interdisciplinarias. Cada especialista entiende la relación entre el régimen hidrológico y los componentes del ecosistema e interactúa con otros especialistas para relacionar las variables. Existen 16 metodologías aplicadas en Sudáfrica, Australia, Reino Unido y recientemente en Costa Rica (Rodríguez, 2007). De acuerdo con MAVDT (2008), las metodologías de mayor importancia son la Metodología de Construcción en Bloques (BBM) y la metodología Downstream Response to Imposed Flow Transformation (DRIFT).

La metodología holista más utilizada es DRIFT. Esta metodología tiene cuatro módulos: biofísico, sociológico, desarrollo de escenarios y económico. El biofísico involucra la descripción de la naturaleza y el funcionamiento del río, y establece las bases para predecir cambios relacionados con modificaciones de caudal. El módulo sociológico identifica la población en riesgo, describe los usos del agua y desarrolla las bases para predecir los impactos sociales de los cambios en el río. El tercer módulo identifica escenarios posibles y describe las consecuencias ecológicas, sociales y económicas de cada uno de éstos. Por último, el cuarto módulo calcula costos de compensación y mitigación de impactos para cada escenario. El resultado es una serie de escenarios descritos que se presentan al tomador de decisión (King *et al.*, 2003).

Con base a la revisión de los métodos disponibles para determinar el caudal ecológico, se considera que para México la primera opción pueden ser los métodos hidrológicos, en su variante de régimen completo de caudales ecológicos. Esto de acuerdo a la disponibilidad de datos, tiempos y costos requeridos, y por incluir componentes del régimen de caudales como magnitud, frecuencia, duración, momento y tasas de cambio, permitiendo prever escenarios de variabilidad.

2.6.4 Criterios para elegir el método de caudal ecológico

La elección de la metodología para la determinación de caudales depende de lo que se desea estudiar. Por ejemplo, si se quiere establecer un caudal en base a los requerimientos de una especie o si se desea la conservación de la biodiversidad y asegurar las funciones ecológicas del ecosistema. Los enfoques teóricos de las metodologías se pueden basar en información existente, hasta aquellos que requieren una extensiva recopilación de información y el uso de un software especializado. La metodología también se elige con base a si el río es regulado o no. En México, factores que condicionan el uso de una metodología se basan en la disponibilidad de recursos económicos, información hidrológica y de hábitats.

2.6.5 Normatividad sobre los caudales ecológicos en México

En la gestión de recurso agua existe la norma para la conservación del recurso denominada NOM-011-CNA-2000. Esta establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales e incorpora en el caso de las aguas subterráneas una variable llamada descarga natural comprometida. La importancia de esta recarga radica en que considera los volúmenes que deben conservarse para prevenir efectos negativos a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad al acuífero. Sin embargo, esta variable es subjetiva debido a la imprecisión de los cálculos de volumen de agua superficial comprometidos para los usos consuntivos.

El concepto de caudal ecológico es considerado en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) como uso ambiental o uso para conservación ecológica. Sin embargo, al ser un concepto de reciente introducción el contenido y el alcance de éste aún no está claramente definido. Su definición fue introducida en la Reforma de Ley del año 2004 (DOF, 2004). El artículo Décimo Quinto transitorio de la LAN establece el uso para conservación ecológica o ambiental, en quinto lugar en orden de prioridad para el

otorgamiento de concesiones del agua. El Reglamento de la LAN considera al uso ambiental como un usuario. Complementariamente, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente establece que para el aprovechamiento sustentable del agua y los ecosistemas acuáticos se tomarán como criterios la protección de suelos y áreas boscosas y selváticas, así como el mantenimiento de caudales básicos de corrientes de agua y la capacidad de recarga de los acuíferos.

En México el proyecto de norma PROY-NMX-AA-159-SCFI-2011 sobre el caudal ecológico se sometió a consulta pública el 17 de Enero del 2012 (DOF, 2012). El 20 de septiembre del 2012, en el Diario Oficial de la Federación, se declara vigente la Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012. En ella se establecen los lineamientos para determinar el caudal ecológico en cuencas hidrológicas. La entrada en vigor y su aplicación da la pauta para la gestión y conservación de los ecosistemas hidrológicos superficiales en México. En ella se encuentran los lineamientos para determinar el caudal ecológico en cuencas hidrológicas.

2.7 La valoración económica del agua, métodos y aplicación en el usuario agrícola

2.7.1 Valoración económica del agua

El cuarto principio de la Declaración de Dublín de 1992 señala que el agua tiene un valor económico en sus diversos usos a los que se destina y que por lo tanto debe reconocerse como un bien económico. Robinson y Eatwell (1992) mencionan que el agua se considera como bien económico por su carácter de escaso. Caballer y Guadalajara (1998), por su parte, señalan que el agua en un principio se consideró como un bien sin valor económico por su abundancia teórica y que a medida que aumentó la intensidad de uso disminuyó su disponibilidad y por tanto se convirtió paulatinamente en un bien susceptible de asignarles un valor económico y proceder a su valoración.

El uso y la disposición del agua por diversos usuarios comprometen la disponibilidad del bien, ya sea para ese mismo uso o para otro, lo cual genera efectos externos negativos. El agua como bien económico debe estar sujeta a regulaciones que aseguren un adecuado suministro y frenen su desperdicio. Un precio eficiente de mercado estimula a los usuarios del agua a ser eficientes en su utilización. La teoría económica plantea que la asignación eficiente de recursos escasos en diferentes sectores requiere de una idea del valor y la ganancia que genera en cada uno de ellos (Samuelson y Nordhaus, 2002).

La eficiencia económica es el equilibrio entre el valor de lo que se produce y el valor de lo que se consume para generar la producción (Field and Field, 1997). La eficiencia económica se basa en el principio de optimización de Pareto. Young (1996) menciona que este principio ocurre cuando el beneficio marginal de usar un bien o servicio es igual al costo marginal de proveerlo. Existen dos aspectos fundamentales en el estudio de la eficiencia económica en relación al recurso hídrico: los valores eficientes resuelven conflictos bajo condiciones de escasez y competencia gradual entre los usuarios del agua, además reflejan costos de oportunidad al evaluar alternativas de un mismo objetivo.

Garrido *et al.* (2004) señalan que el valor del agua supone obtener el valor del beneficio marginal del agua en un determinado uso. La cantidad máxima que el usuario está dispuesto a pagar por el agua se considera el beneficio marginal. Young (1996) indica que el beneficio marginal debe igualarse con el costo marginal de aprovechar el recurso hídrico, de esta manera se facilita la asignación óptima. El mismo autor menciona que el análisis beneficio costo es de suma importancia en la toma de decisión en las asignaciones del recurso hídrico y que éstas decisiones conduzcan hacia la eficiencia de Pareto.

En la Figura 5 se muestra la comparación de Eficiencia de Pareto y el de Beneficio-Costo. La curva $B(W)$ contiene los beneficios de cierto servicio de agua, donde estos se

incrementan a una tasa decreciente a medida que se aumenta la cantidad del recurso. La curva $C(W)$ presenta los costos de proveer dicho servicio, a medida que se aumenta la cantidad de agua los costos crecen. Ambas curvas representan la medición del bienestar social.

La solución eficiente de Pareto (punto de eficiencia económica) se observa en la cantidad de agua denominada W^* , la cual es la distancia máxima vertical entre $B(W)$ y $C(W)$, el punto donde se interceptan el beneficio marginal es igual al costo marginal. Por su parte el criterio de Beneficio-Costo analiza si el cambio en una condición representa un cambio deseable. Por ejemplo, en la figura se muestra el incremento en beneficio GH contra el incremento en los costos EF , en donde el beneficio es superior al costo, por tanto se considera un cambio deseable y una mejora de Pareto.

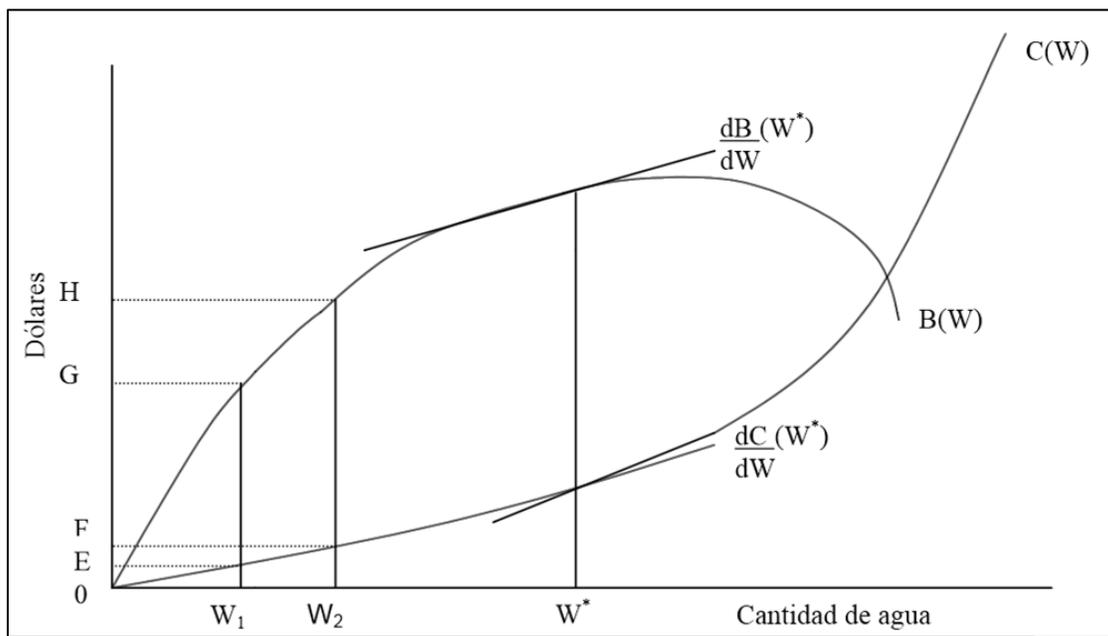


Figura 5. Criterios de eficiencia de Pareto y el de Beneficio-Costo.

2.7.2 Métodos de valoración económica del agua

Los métodos de valoración del agua presentan diferentes enfoques en relación al uso que se otorga al recurso hídrico. Dixon (1999) menciona que la selección de la técnica

apropiada depende de varios factores, como la disponibilidad de datos, recursos financieros, tiempo y el efecto a valorar. Azqueta (2002) y el Committee on Assessing and Valuing the the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems (2005) distinguen tres tipos de valores del agua: valores de uso, valores de no uso y valores intrínsecos. Young (2005) y Azqueta (2002) distinguen al recurso hídrico como un input intermedio, de consumo privado o como proveedor de recursos hídricos. También dividen el valor del agua por el valor de uso actual y por el valor de opción (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valor del agua y sus relaciones por diferente tipo de bien.

Valor	Uso y no uso del agua		
	Agua como bien intermedio	Agua de consumo privado	Agua como proveedor de servicios públicos
Uso directo	Riego Industria Electricidad	Industria Urbano	Recreación
Uso indirecto	-----	Desechos industriales, urbanos	Hábitat de especies
Opción	Uso futuro (riego, industria, electricidad)	Uso futuro para consumo privado	Hábitat para conservación de la biodiversidad
intrínseco (legado y existencia)	-----	-----	Sitios culturales, históricos

Fuente: Young (2005).

Young (2005), distingue siete métodos de valoración económica: método residual y sus variantes, métodos basados en funciones de producción, uso de modelación econométrica, modelación de la producción mediante programación matemática, métodos de valoración contingente, métodos de precios hedónicos, método de costo alternativo. Por su parte, Field y Field (2003) distinguen tres grupos de métodos de valoración económica del agua. En el primer grupo se encuentran los métodos basados en precios de mercado (evalúan cambios en la productividad o estiman los ingresos que se dejan de percibir o se ganan a causa de cambios en los medios de producción por ausencia o presencia de un recurso. En el segundo grupo se sitúan los métodos basados en precios indirectos, en los que se consideran costos de reemplazo y costos

de oportunidad. Por último se hallan los mercados hipotéticos, a base de encuestas que determinan la disposición a pagar o ser compensado, dependiendo de los derechos de propiedad de los servicios ambientales, por un bien o servicio; consideran costos de viaje, precios hedónicos y valoración contingente.

Bishop (1999) considera cinco categorías de métodos de valoración económica. La primera categoría son los métodos de precio de mercados y estiman los beneficios en el consumo y la producción. Se basan en precios del mercado, consideran la oferta y la demanda de bienes y servicios. En la segunda categoría se incluyen los métodos de mercados sustitutos, método de costo de viaje, precios hedónicos y método de bienes sustitutos. Asumen que los beneficios de los servicios ambientales son reflejados de manera indirecta en el gasto del consumidor, precios de mercado o nivel de productividad. La base teórica de este enfoque es una función de utilidad o bienestar en la cual el consumidor busca maximizar su bienestar en tiempo y recurso en diferentes actividades. Por ejemplo, el método del costo de viaje supone que los consumidores valoran un bien o servicio en relación a los costos incurridos en la visita para disfrutar de dicho bien, también lo valoran por el costo de oportunidad del tiempo gastado en viajar al sitio. La tercera categoría corresponde al método en función de la producción (método insumo-producto o dosis-respuesta). Relacionan el bienestar de las personas con un cambio medible en calidad o cantidad de un recurso natural. La cuarta categoría es la del método de preferencias expresadas, el método más usado es el de valoración contingente, que cuantifica el valor a través de entrevistas, las cuales plantean una situación hipotética de un aumento o disminución en la calidad o cantidad de un servicio ambiental. Por último, se encuentra el método basado en costos, por ejemplo el método de costos de reposición. Asumen que la provisión, mantenimiento y restauración de bienes y servicios ambientales tiene un costo, esta técnica se utiliza cuando existe una limitación en tiempo y recursos. Los métodos conocidos son el método de costo de remplazo, que estima los costos de reproducir los niveles originales de determinando beneficio ambiental. El método de gastos preventivos estima costos anticipados en contra de la degradación de los servicios ambientales.

Por último, el método de costo de oportunidad considera los costos de producción para dar un valor a los servicios ambientales.

2.7.3 Método de valoración económica del agua en función de la productividad marginal

La productividad es la relación entre la unidad de producto y la unidad de insumo. Molden *et al.* (2003) señalan que la productividad del agua se basa en obtener una mayor cosecha por volumen de agua aplicado o mayor producción de alimento por volumen de agua. El uso de este método se basa en la utilización de funciones de producción (en cultivos) estimadas a partir de datos de campo, en las que la cantidad total de agua aplicada al cultivo es la variable explicativa. Garrido *et al.* (2004) mencionan que dicha función se multiplica por el precio del producto para obtener una función de ingresos, y al derivar con respecto a la cantidad de agua utilizada se obtiene el ingreso marginal, el cual se considera el valor marginal del agua. Por lo tanto, el ingreso marginal con respecto al agua se determina $\partial \text{Ingreso marginal} / \partial \text{Factor Agua}$.

El valor marginal representa el incremento en el valor total debido a una unidad adicional de agua. De acuerdo con la Ley de los Rendimientos Decrecientes, decrece conforme se incrementa la cantidad usada. La eficiencia económica se alcanza cuando el ingreso marginal es igual al costo marginal (Field y Field, 2003).

Romo (1990) menciona que la función de producción es un modelo utilizado para analizar la relación entre los insumos empleados en un proceso productivo y el producto final. Además describe la tasa a la cual los recursos son transformados en un producto. La describe de la siguiente manera:

$$Y = F(x_1, x_2, x_3, x_n)$$

Dónde:

Y: Es el producto (producción)

X_i: Los diferentes insumos considerados. Con i = 1,2,3...n

Caballer y Guadalajara (1998) señalan que el valor del agua se puede determinar en el sentido del valor máximo obtenido como un costo marginal y representa el desembolso máximo que una empresa realiza sin que le genere pérdidas. Para el cálculo de dicho valor, se parte de la función de beneficios la cual se estima de la siguiente manera:

$$B = I - C$$

Dónde:

B=Beneficio para la empresa

I=Ingreso Total

C=Costo total

El ingreso es el resultado de multiplicar el precio de la cosecha (p) por la producción (q). Por otro lado, estos autores asumen que q, se puede expresar como una función de producción que depende de varios factores y al sustituir se tiene:

$$I = p * q = p * f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

El costo total lo expresan como la suma de los precios de los factores por las dosis de los mismos, más el costo fijo. Es decir:

$$C = r_1 * x_1 + r_2 * x_2 + r_3 * x_3 + \dots + r_n * x_{n1} + K$$

Al sustituir en la ecuación base de la función de beneficios se obtiene:

$$B = p * f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) - (r_1 * x_1 + r_2 * x_2 + r_3 * x_3 + \dots + r_n * x_{n1} + K)$$

Si se toma en cuenta que el beneficio máximo se obtiene cuando se cumple la condición de que la $\partial B = 0$, entonces:

$$\partial B / \partial X_i = 0 \rightarrow p * \partial f / \partial x_i - r_i = 0$$

En donde se deriva:

$$r_i = p * \partial f / \partial X_i$$

Garrido *et al.* (2004) y Caballer y Guadalajara (1998) coinciden en que el precio del agua resulta de multiplicar el precio de la cosecha por la productividad marginal del agua en cierto cultivo (ingreso marginal). De igual forma asumen que la productividad marginal del agua varía según los cultivos, la localización, temporada, método de irrigación, precio de la cosecha, entre otros. Para calcular la productividad marginal del agua en un cultivo, se debe conocer las funciones de producción en las cuales la cantidad de producto obtenido depende de la cantidad de agua aplicada y otros factores. A excepción del agua los demás factores se consideran constantes, la función de rendimiento y el rendimiento marginal es equivalente a la productividad marginal a consecuencia del cálculo del óptimo económico.

Caballer y Guadalajara (1998) mencionan ejemplos de funciones empleadas para calcular la productividad, tales como la Función Cobb Douglas, Mitscherlich-Spillman y funciones polinomiales con sus respectivas clasificaciones (función lineal, cuadrática, raíz cuadrada, polinomial). Para que una función de producción sea correcta se deben reunir varias condiciones:

- Identificar y cuantificar todos los insumos importantes.
- Estimar adecuadamente la función y nivel de producción asociada con los insumos a considerar.
- Tener cuidado cuando el agua contribuye en una pequeña fracción al valor de la producción

La función de producción además debe ser diferenciable para cantidades positivas de los insumos, con un producto marginal positivo, y a mayores dosis de un insumo se

genere un incremento en el producto. Debe también ser cóncava, es decir que a medida que se aumenta el uso del insumo el producto marginal es decreciente.

2.7.4 Función de producción translog y el valor marginal del agua

La función de producción logarítmica trascendental, conocida como translog (Christensen *et al*, 1973), asume que la producción (Y) está relacionada con la disponibilidad de insumos tales como capital de trabajo, agua, energía, otros factores. Se caracteriza por rendimientos constantes a escala y se denota de la siguiente forma (considera 5 factores de producción):

$$\begin{aligned} \ln Y = & \beta_0 + \beta_1 \ln K + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln W + \beta_4 \ln E + \beta_5 \ln M + \beta_6 \frac{\ln^2 K}{2} + \beta_7 \frac{\ln^2 L}{2} + \beta_8 \frac{\ln^2 W}{2} + \\ & \beta_9 \frac{\ln^2 E}{2} + \beta_{10} \frac{\ln^2 M}{2} + \beta_{11} \ln K \ln L + \beta_{12} \ln K \ln W + \beta_{13} \ln K \ln E + \beta_{14} \ln K \ln M + \\ & \beta_{15} \ln L \ln W + \beta_{16} \ln L \ln E + \beta_{17} \ln L \ln M + \beta_{18} \ln W \ln E + \beta_{19} \ln W \ln M + \beta_{20} \ln E \ln M + \epsilon \end{aligned}$$

La función translogarítmica es más general que la Cobb-Douglas. Se caracteriza por rendimientos constantes a escala. La función translog es una respuesta a problemas de aditividad y homogeneidad que presenta la función Cobb-Douglas. Éstas propiedades implican que las porciones de los factores son constantes y la elasticidad de sustitución es limitada, es decir todas las elasticidades entre factores son iguales a 1 (Berbel y Gómez-Limón, 2005). Wan y Lall (1995) utilizaron la función de producción trans-log para estimar el valor de la productividad marginal del agua en la industria China. El factor agua se introduce como un insumo más junto al capital de trabajo, energía y materias primas. Encontraron que las tarifas establecidas por el uso del agua se encuentran por debajo del verdadero valor del agua (valor marginal del agua).

Wan y Lall (1995) señalan que el cálculo de la elasticidad de la producción denotado por σ , con respecto a cada factor que interviene en la producción (Y), se obtiene

mediante la derivada parcial de la producción con respecto al factor que se requiere estimar. Para este caso el factor agua (W) la elasticidad es la siguiente:

$$\sigma = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln W} = \beta_3 + \beta_8 \ln W + \beta_{12} \ln K + \beta_{13} \ln K \ln E + \beta_{15} \ln L + \beta_{18} \ln E + \beta_{19} \ln M$$

El valor marginal (ρ) del agua en la producción es:

$$\rho = \frac{\partial Y}{\partial W} = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln W} * \frac{Y}{W} = \sigma \frac{Y}{W}$$

El precio del agua P es igual al costo marginal del uso del agua. Cuando las empresas maximizan sus beneficios, el valor marginal del producto es igual al costo marginal. Por tanto el precio del agua P es igual al valor marginal del agua (Caballer y Guadalajara, 1998).

La elasticidad del precio (γ) del uso del agua se obtiene al derivar la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{\partial \ln W}{\partial \ln P} = \frac{\partial \ln W}{\partial \ln \rho} = - \frac{\sigma}{\sigma - \sigma^2 - \beta_8}$$

Bajo este modelo de elasticidad del precio de la demanda asociado con la productividad marginal. La elasticidad no se encuentra restringida a ser constante sino que puede variar con la participación de costos de cada factor. La estimación de las elasticidades supone un comportamiento racional de los factores que intervienen en la producción, los cuales minimizan los costos de producción (Usawa, 1964).

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Ubicación de la zona de estudio

El área de estudio se localiza en la zona centro del país, la cual tiene fuertes problemas de abastecimiento de agua, debido a la población que concentra y por su intensa actividad económica. Pertenece a la subcuenca hidrográfica RH18Fc del Río Yautepec (Figura 6), dentro de la cuenca del Río Grande de Amacuzac, región hidrológica del Río Balsas. Comprende parte de los territorios de los estados de Morelos y Estado de México y del Distrito Federal. De éstos últimos solo contiene una pequeña extensión territorial (Figura 6). La superficie de la cuenca de estudio es de 1 533.2 km² y representa el 25 por ciento del territorio del estado de Morelos. Comprende los municipios de Atlatlahucan, Ayala, Cuautla, Cuernavaca, Emiliano Zapata, Huitzilac, Jiutepec, Jojutla, Tepoztlan, Tlalnepantla, Tlaltizapan, Tlaquiltenango, Tlayacapan, Totolapan, Xochitepec, Yautepec y Zacatepec, del estado de Morelos. También abarca parte de los municipios de Amecameca, Atlautla, Ayapango, Juchitepec, Ozumba, Tepetlixpa, en el Estado de México. Del Distrito Federal, se encuentra en la cuenca una porción de las delegaciones de Tlalpan y Milpa Alta.

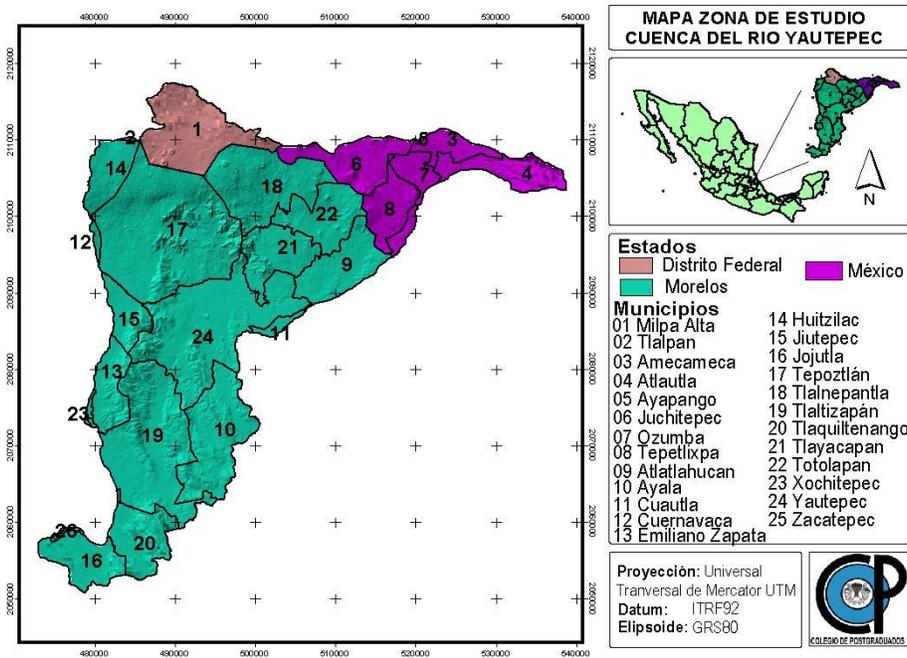


Figura 6. Localización de la subcuenca del Río Yautepec. Fuente: elaboración propia a partir de información de INEGI (2010).

3.2 Clima

De acuerdo con el Sistema de Koppen modificado por García (2004), el clima con mayor abundancia en el área de estudio es el (A)C(w1), Semicálido subhúmedo, con una temperatura media anual mayor de 18°C, la temperatura del mes más frío menor de 18°C y la temperatura del mes más caliente mayor de 22°C (Figura 7). La precipitación del mes más seco es menor de 40 mm, con lluvias de verano y con índice precipitación/temperatura (P/T) entre 43.2 y 55 (grupo de los subhúmedos intermedios y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual) (CONABIO, 1998). Ocupa el 32.6% de la superficie de la cuenca, lo que corresponde a 50047.9 ha, y se encuentra en la parte media de la cuenca.

En segundo lugar, por su extensión geográfica, se encuentra el clima C(w2); clima templado que se caracteriza por ser subhúmedo con temperatura media anual entre

12°C y 18°C, la temperatura del mes más frío es entre -3°C y 18°C y la temperatura del mes más caliente menor de 22°C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; tiene lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 (grupo de los más húmedos de los climas subhúmedos), y el porcentaje de lluvia invernal es del 5 al 10.2% del total anual. Se encuentra en el 19.7% del área de la cuenca, lo que equivale a 30129.6 ha.

El clima cálido subhúmedo (Awo) ocupa el 16.7% de la superficie de la cuenca (25534.2 ha). Presenta una temperatura media anual mayor de 22°C y la temperatura del mes más frío mayor de 18°C. La precipitación del mes más seco está entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice P/T menor de 43.2 (pertenece al grupo de los semiáridos) y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Su distribución es en la parte baja de la cuenca.

El clima semifrío subhúmedo con verano fresco largo (Cb'(w2)) comprende el 15.3% de extensión de la cuenca, lo cual corresponde a 23 480.6 ha. Se caracteriza por una temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente menor a 22°C. La precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Esta distribuido en los extremos de la parte alta de la cuenca, específicamente en la zona del corredor biológico del Chichinautzin y en la zona de los volcanes.

El clima semicálido subhúmedo del grupo C ((A)C(w2)) abarca el 13.4% del área de la cuenca, lo cual recae en 20 507.3 ha. Presenta una temperatura media anual mayor de 18°C, la temperatura del mes más frío menor de 18°C, la temperatura del mes más caliente mayor de 22 °C. La precipitación del mes más seco es menor a 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 (grupo de los más húmedos de los subhúmedos) y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. Se encuentra entre la parte alta y media de la cuenca. Asimismo se encuentra, en menos del 2.5% de la superficie de la cuenca, el clima (A)C(wo) el cual es un semicálido subhúmedo del grupo C; se localiza al este de la parte media de la cuenca. En la parte alta de la

cuenca se localiza un clima C(w1), templado subhúmedo. En la parte alta este de la cuenca se ubica una pequeña porción con clima E(T)CHw, el cual es frío, con temperatura media anual entre -2°C y 5°C.

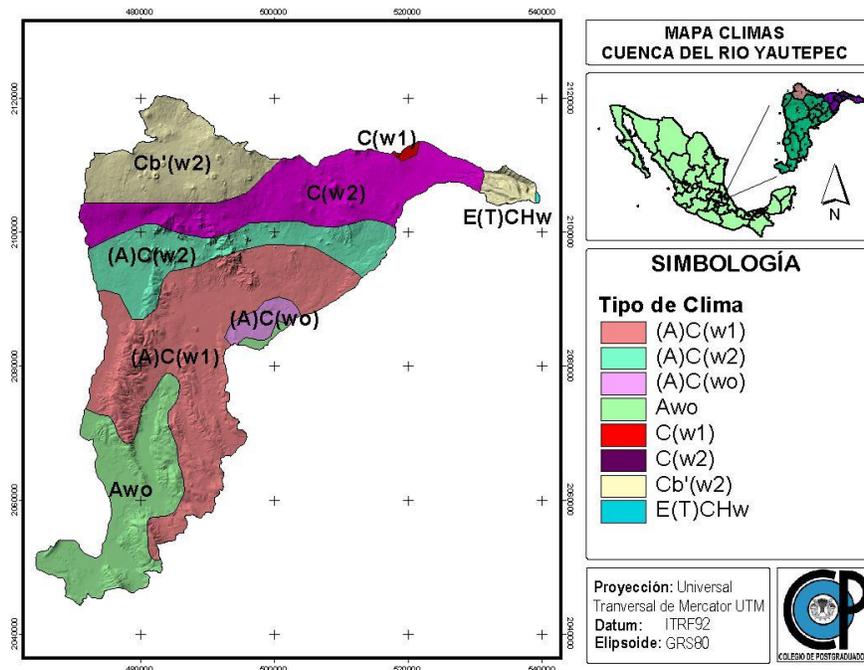


Figura 7. Tipo de clima de la subcuenca del río Yautepec. Fuente: elaboración propia a partir de información de CONABIO (1998).

3.3 Tipos de suelo

Los tipos de suelo presentes en la cuenca de estudio por orden de importancia son el Leptosol, Andosol, Vertisol, Regosol, Phaozem, Arenosol, Fluvisol y Umbrisol (INEGI, 2008) (Figura 8). El suelo Leptosol es el más abundante y se encuentra en el 31.7% de la superficie de la cuenca (45 583.1 ha). Se distribuye en la parte media y alta de la cuenca. El Leptosol, también conocido en clasificaciones anteriores como Litosol y Redzina, es un suelo limitado en profundidad por roca dura continua dentro de los primeros 25 cm desde la superficie hasta límite con el estrato rocoso. Se relaciona con paisajes accidentados de sierras y cañadas. Su espesor es una limitante para el uso en agricultura, siendo su uso potencial el forestal. Este tipo de suelo está compuesto

básicamente por sedimentos lacustres muy compactados del terciario y arena migajosa limosa.

El suelo Andosol está presente en el 26.1% de la extensión de la cuenca, lo que corresponde a 40 002.8 ha. Se localiza en la parte alta de la cuenca y se caracteriza por ser un suelo oscuro, ligero, con alto contenido de ceniza y otros materiales de origen volcánico (originado a partir de vidrio volcánico). Es rico en materia orgánica y nutrientes, su textura puede ser franca o de migajón arenoso. Su vocación es forestal, sin embargo en algunas zonas se asocian a la agricultura.

El suelo Vertisol ocupa el 13.2% de la superficie (20 183.3 ha). Se ubica en la parte baja y media de la cuenca. Es un suelo que tiene más del 30% de arcilla en todas sus capas dentro de los primeros 100 cm de espesor, puede ser de color negro o gris. Cuando está seco es muy duro y presenta grietas a menos de 50 cm de profundidad y es pegajoso cuando se humedece. Tienen alto contenido de carbono orgánico en la capa arable. Su vocación es agrícola, aunque presenta problemas para su manejo debido a su dureza y problemas de inundación y drenaje. En este tipo de suelo se produce la mayor cantidad de la caña de azúcar, arroz y sorgo, todos ellos con buenos rendimientos.

El suelo Regosol comprende el 9.1% del área de la cuenca (13 994.6 ha), distribuido en una pequeña porción en la parte alta y baja de la cuenca. Este tipo de suelo no tiene horizonte de diagnóstico, es de color claro, poco desarrollado, parecido al material de origen (roca madre). Presenta aptitud forestal o pecuaria y en ocasiones se utilizan para la agricultura de temporal con bajo rendimiento.

El Phaozem ocupa el 8.2% lo que corresponde a 12 641.4 ha. Se encuentra en la parte media de la cuenca, en terrenos planos o montañosos. Se caracteriza por presentar una capa superficial de color oscuro, rica en materia orgánica y libre de carbonatos de calcio por lo menos a una profundidad de 100 cm. Su vocación es agrícola. El 9.4% de la superficie de la cuenca (14 469 ha) está cubierto por suelos

como el Kastañozem, el cual se caracteriza por ser de color oscuro, con una capa superficial oscura, rico en materia orgánica; el suelo Arenosol (muy arenoso); el Fluvisol formado con depósitos aluviales recientes, y el Umbrisol (capa superficial de color oscuro, rico en materia orgánica, asociado a regiones frías y húmedas).

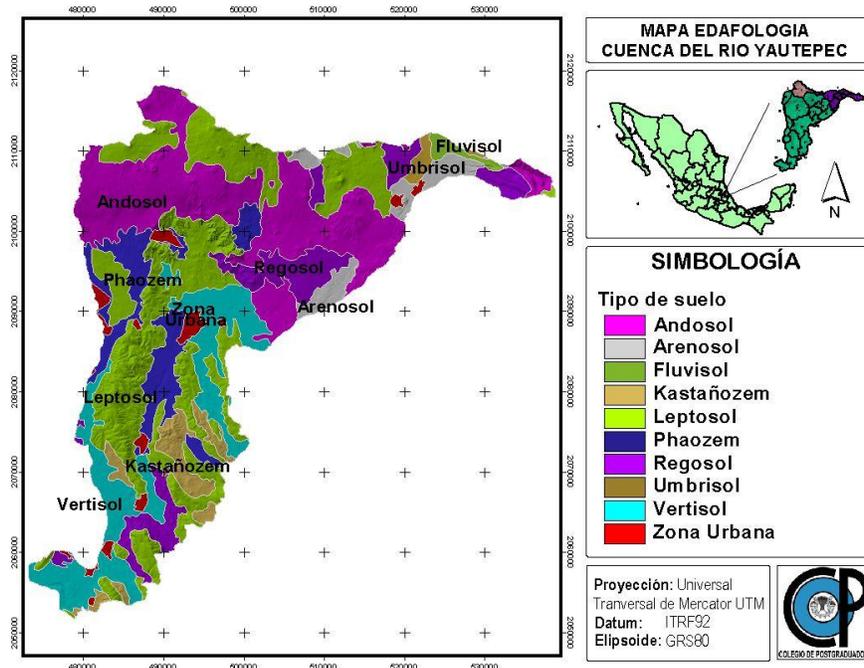


Figura 8. Tipos de suelo de la subcuenca del río Yautepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2008).

3.4 Uso de suelo y vegetación

La información de la carta de uso de suelo y vegetación serie IV elaborada en los años 2007 y 2008, hace referencia a 19 tipos de uso de suelo y vegetación presentes en la cuenca de estudio (Figura 9). Estos tipos se agrupan en categorías de bosque, selva, matorral, pradera de alta montaña, pastizal inducido, agricultura de temporal y de riego (INEGI, 2010). Por orden de importancia, la agricultura de temporal concentra 50 615.6 ha, equivalente al 33% de la superficie de la cuenca (Figura 10) y se localiza en la parte alta de la cuenca. La selva baja caducifolia ocupa el 23.2% (35 541.1 ha) en la parte

media y baja. El bosque se presenta en el 20.4% (31 217.6 ha) y se concentra en la parte alta de la cuenca. La agricultura de riego ocupa el 14.3% (21 987.1 ha) en la parte media y baja de la cuenca. El pastizal inducido se encuentra en la parte alta de la cuenca y abarca el 3.3% de la superficie de la cuenca (5 083.4 ha). Los demás usos del suelo y vegetación se encuentran presentes en un porcentaje menor al 3% cada uno.

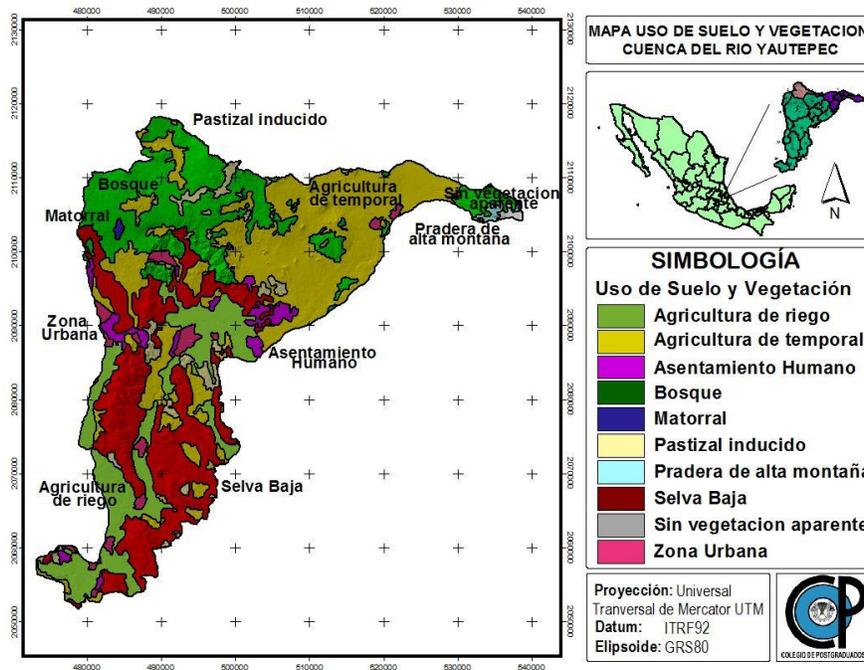


Figura 9. Uso de suelo y vegetación de la subcuenca del río Yautepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2010).

cambiar en dirección al sur, es aquí en donde recorre el tramo más largo. Pasa por los municipios de Tlaltizapan, Tlaquiltenango y Jojutla y confluye al Río Apatlaco en la cuenca del Amacuzac. El río Yautepec tiene una longitud de 95 Km con una pendiente promedio de 4.3%, la cota mayor alcanza los 4 940 msnm y la cota menor de 860 msnm (Figura 11). En el Anexo 1 se muestran imágenes del cauce en diversos puntos de su recorrido.

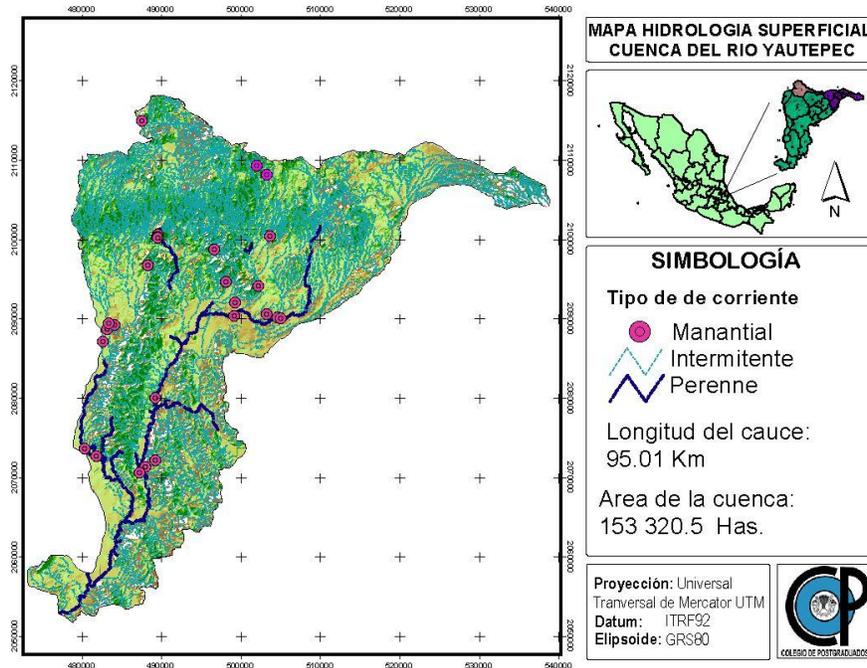


Figura 11. Hidrología superficial de la subcuenca del río Yautepec. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2012).

3.6 Información hidrométrica

Para la gestión del recurso hídrico el manejo de información hidrométrica es de suma importancia. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ha integrado una red hidrométrica nacional, la cual registra en forma continua el nivel y la cantidad de agua que pasa en una determinada sección en cierto tiempo, en los cauces principales del país. De esta manera se obtiene un registro histórico de datos que permiten caracterizar el régimen hidrológico de un cauce. En la cuenca se identifican 7 estaciones hidrométricas

operadas por la CONAGUA (IMTA, 2011). En el Cuadro 2 se muestran los cauces aforados y el periodo de registro.

Cuadro 2. Estaciones hidrométricas.

Clave	Periodo de datos registrados	Nombre de la Estación	Control de Corriente	Objeto de su instalación
18200	1949-1995,1998-2000,2003-2006	Cocoyoc	Canal Primera Toma	Conocer el caudal que se deriva por el Canal Primera Toma para estudios de control y aprovechamiento.
18199	1949-1987,1995-2005	Oaxtepec	Canal Segunda Toma	Conocer los volúmenes derivados por el Canal Segunda Toma.
18197	1949-2006	Itzamatitlan	Canal Tercera Toma	Conocer los volúmenes derivados del río Yautepec por el canal Tercera Toma.
18175	1948-2006	Oacalco	Canal Cuarta Toma	Conocer los volúmenes derivados para riego por el Canal Cuarta Toma.
18193	1949-1979,1981-1987,1995-2006	Yautepec	Rio Yautepec	Conocer el volumen escurrido para aprovecharlo en obras de riego.
18223	1951-1985,1987-1999,2001-2002,2006	Ticuman	Rio Yautepec	Estudio y conocimiento de los posibles escurrimientos del río y afluentes, para el uso futuro en aprovechamientos hidráulicos.
18406	1968-2006	Las Estacas	Canal Las Estacas	Conocer el gasto que brota de los manantiales y que pasa por el canal como aportación al río Yautepec.

Fuente: IMTA (2011).

3.7 Disponibilidad media anual de agua

En un río, para el otorgamiento de concesiones debe tomarse en consideración la disponibilidad media anual del recurso. En la cuenca del río Yautepec la mayor parte del agua superficial se encuentra comprometida, por lo cual se considera con una alta presión del recurso hídrico y con un déficit. Por lo tanto, no se pueden conceder nuevas asignaciones (DOF, 2013). El volumen de agua que produce la cuenca en promedio al año es de 361 735.1 miles de m³ (361.7 hm³) el cual ha sido cuantificado por tramo en cada estación hidrométrica (Cuadro 3).

Cuadro 3. Volumen anual de escurrimiento.

Clave estación	Volumen anual de escurrimiento (Miles de m ³ /año)	Descripción
18200	17 927.7	Desde el manantial Oaxtepec hasta el Canal Primera Toma
18199	9 525.6	Tramo Canal Primera toma hasta Canal de la Segunda toma (900 m. aguas abajo s de la estación 18200)
18197	20 976.6	Tramo Canal Segunda Toma hasta Canal Tercera Toma (4.5 Km aguas abajo de la estación 18199)
18175	23 028.7	Tramo Canal de la tercera toma hasta Canal Cuarta Toma (3 Km aguas abajo de la estación 18197)
18193	38 884.7	Desde el nacimiento del río hasta el Municipio de Yautepec
18223	29 839.2	Desde la estación 18193 hasta la localidad de Ticumán (12 kilómetros al sureste de Yautepec)
18406	221 552.4	El Canal Las Estacas se deriva del manantial conocido con el mismo nombre, el cual aflora dentro del balneario "Las Estacas" a 38 Km al sur-sureste de Ticumán, Mor.
TOTAL	361 735.1 miles de m³/año	

Fuente: Estaciones hidrométricas (IMTA, 2011).

3.8 Aprovechamiento del agua

Los principales usuarios del agua superficial en la cuenca del río Yautepec son los agricultores agrupados en asociaciones (ejidos y propiedades privadas), que conforman el Distrito de Riego 016 (DR016) estado de Morelos. La superficie que comprende el DR016 en el Estado es de 33 654 ha y 18 530 usuarios, constituidos en ocho asociaciones civiles, una para cada módulo en la que se divide el Distrito de Riego. El volumen de agua anual utilizado en el DR016 es de 772 Hm³ (CONAGUA, 2007). Del total de los módulos del Distrito de Riego, cinco de ellos están reconocidos por CONAGUA, los tres módulos restantes no aceptaron las condiciones del proceso de transferencia para la descentralización de la grande irrigación y en el año de 1992 se les entregó sus títulos de concesión.

En la cuenca el Río Yautepec se encuentran cuatro módulos de riego (Cuadro 4): el Alto Yautepec, a cargo de Campos Unidos A.C.; el Bajo Yautepec, administrado por Emperador Moctezuma A.C.; el módulo Agrosiglo XXI o Bajo Apatlaco, representado por la Asociación de usuarios Agrosiglo XXI, A.C., y el Módulo Cuautla, conducido por General Eufemio Zapata Salazar, A.C. Los dos últimos módulos se encuentran de manera parcial en la cuenca.

Cuadro 4. Módulos de riego presentes en la cuenca.

Módulo	Superficie (ha)	Número de usuarios	Volumen (Hm ³)
Agrosiglo XXI*	7 682	3 878	214
Alto Yautepec	2 291	1 133	40
Bajo Yautepec	1 530	798	22
Río Cuautla*	102	47	2
Total	11 605	5 856	278

Fuente: Actas de constitución de Asociaciones. Archivo de la Jefatura de Distrito de Riego 016 año 2012.

En la cuenca del río Yautepec la infraestructura para riego y abastecimiento público comprende 13 presas derivadoras (Figura 12). (Anexo 2 y 3). Las Asociaciones de

cada módulo se encargan de actividades de mantenimiento, operación, administración y entrega de agua a cada usuario. El espacio hidráulico que administra cada asociación son los campos que comparten el riego a través de un canal general, canales laterales y ramales (Figura 13). La CONAGUA es la responsable del control de las obras de cabecera y la normatividad y entrega el agua a través del Distrito de Riego 016 a los usuarios.

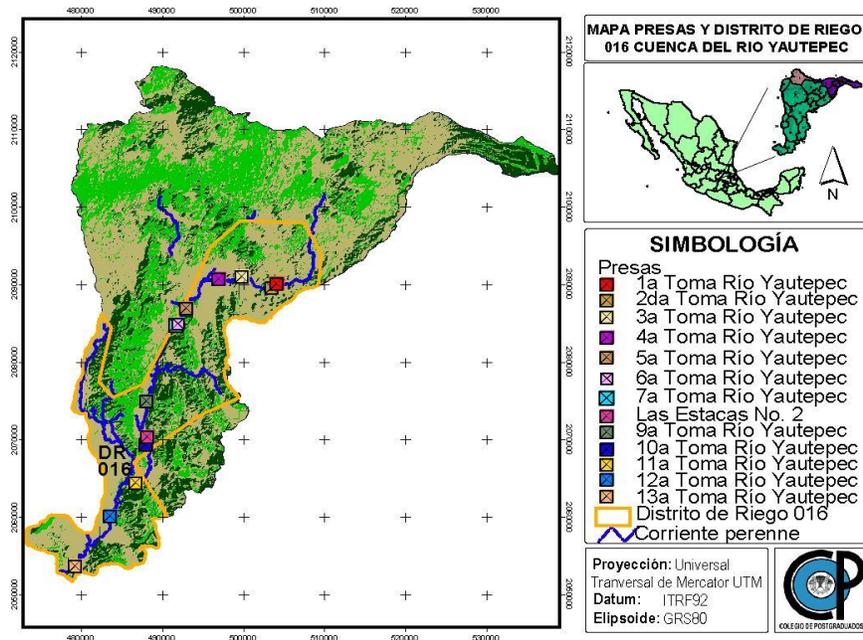


Figura 12 Presas derivadoras y colindancias del DR 016 Morelos. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la jefatura del Distrito de Riego 016.



Figura 12. Canal general de la presa Toma 1 Río Yautepec.

Además del agua usada en los módulos de riego, se tiene una zona de la cuenca, no comprendida en el Distrito de Riego 016, para la que el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) registra un volumen de extracción anual de agua de 12 Hm³ (REPDA, 2012). Por lo tanto, el volumen de extracción total anual asciende a los 290 hm³, el 97% del agua es para uso agrícola y el 3% para uso público urbano.

3.9 Población

De acuerdo al conteo de población del año 2010 del INEGI, en la cuenca se concentra una población de 385 151 habitantes, en 499 localidades. El 83% se encuentra en el estado de Morelos y el 17% en el Estado de México. En el área del Distrito Federal no hay asentamientos humanos. Los municipios con mayor extensión territorial en la cuenca son Tepoztlán, Yautepec, Tlaltizapan, Tlalnepantla, Milpa Alta, Ayala y Atlatlahucan. Los municipios que concentran mayor población son Tepoztlán Yautepec, Tlaltizapan, Jiutepec, Jojutla y Tlaquiltenango. De los 25 municipios que comprende la cuenca sólo 21 cuentan con asentamientos humanos y en el resto no hay localidades (Figura 14).

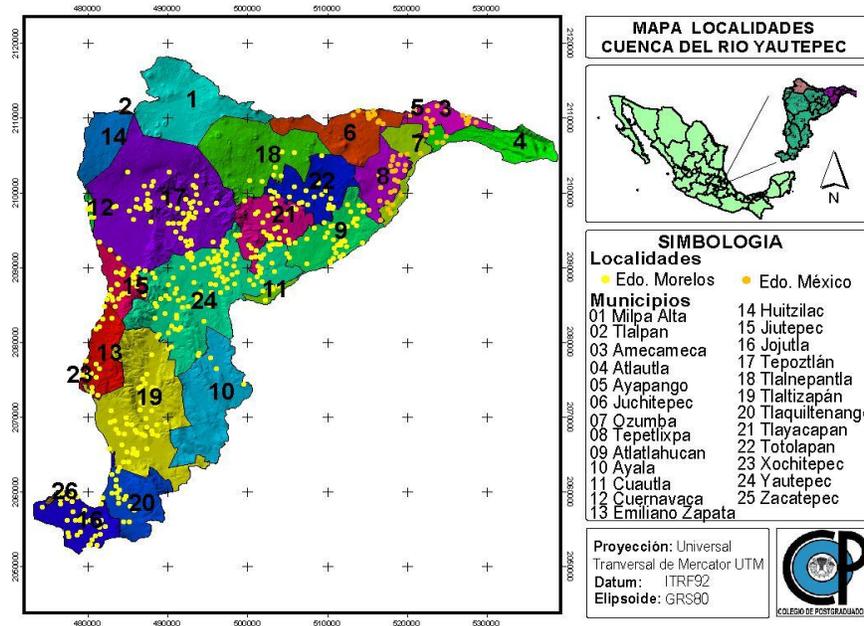


Figura 13. Localidades de la subcuenca. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la CONABIO (2012).

3.10 Agrodiversidad

Las parcelas irrigadas por el río Yautepec en su mayoría pertenecen a los Municipios de Jojutla, Tlaquiltenango, Tlaltizapan y Yautepec, los cuales están ubicados al centro y sur de la cuenca y forman parte del Distrito de Riego. Los cultivos principales son caña de azúcar, arroz palay, maíz en grano, jícama, elote y okra (hortaliza rica en fibra destinada para sopas enlatadas o como sustituto para la elaboración de café). El cultivo principal es la caña de azúcar (Figura 15, Cuadro 5).

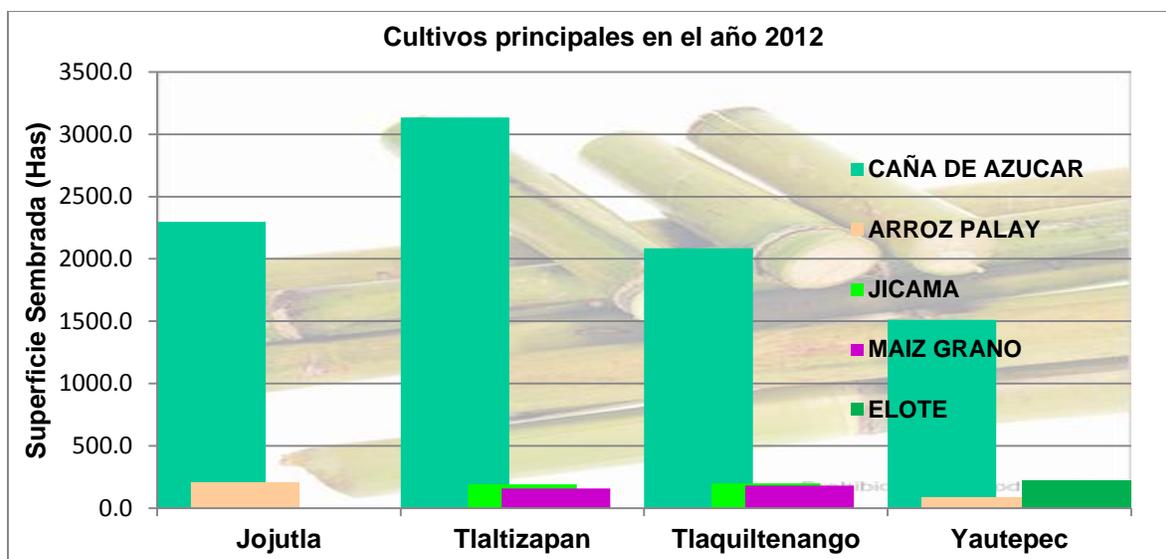


Figura 14. Cultivos principales de la subcuenca. Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAP (2012).

Cuadro 5. Superficie sembrada en hectáreas de los principales cultivos.

	Caña de azúcar	Okra (angu o gombo)	Arroz palay	Jícama	Maíz grano	Elote	Caña azúcar para otro uso
2011							
Jojutla	2 296.3	449.0	210.0	-	-	-	-
Tlaltizapan	3 134.0	-	-	192.00	158.0	-	-
Tlaquiltenango	2 085.9	-	-	200.00	180.0	-	-
Yautepec	1 510.0	-	88.0	-	-	224.0	-
2010							
Jojutla	1 874.3	445.0	200.0	-	-	-	-
Tlaltizapan	2 251.2	-	-	195.00	161.0	-	-
Tlaquiltenango	1 764.1	-	-	210.00	197.0	-	-
Yautepec	1 510.0	-	-	-	-	222.0	227.0
2009							
Jojutla	1 934.3	-	245.6	-	89.0	-	-
Tlaltizapan	2 351.2	-	114.1	-	124.2	-	-
Tlaquiltenango	1 764.1	-	-	110.0	121.0	-	-
Yautepec	1 583.0	-	-	-	-	122.00	70.00

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) (2012).

En la parte norte de la cuenca, en la región conocida como los Altos de Morelos, la agricultura es de temporal (Figura 16) y los cultivos que se siembran son maíz en grano, tomate rojo, tomate verde, avena forrajera, sorgo en grano y nopalitos.

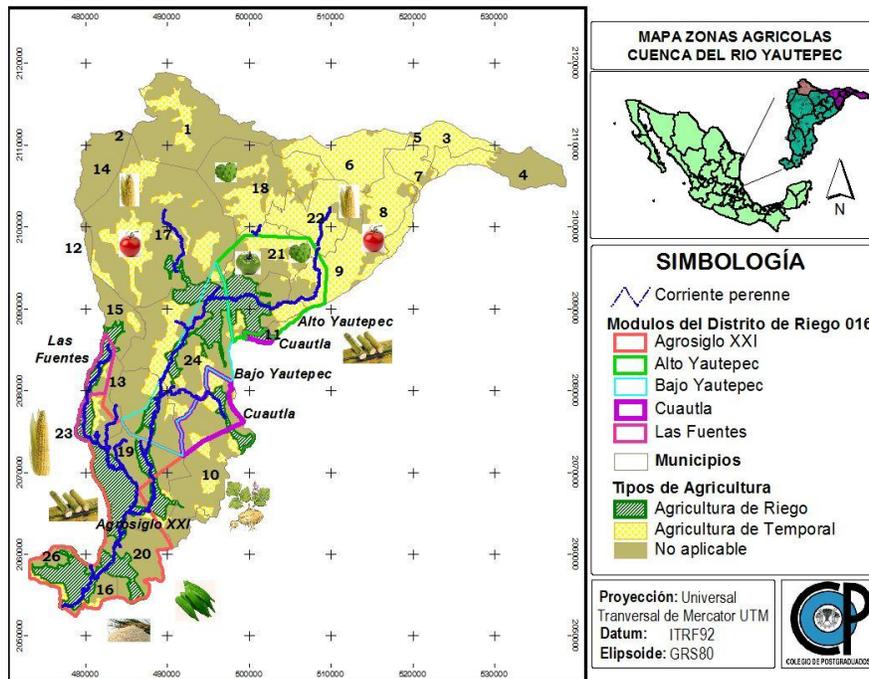


Figura 15. Zonas agrícolas de riego y temporal de la subcuenca. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INEGI (2008).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Determinación del caudal ecológico

4.1.1 Selección de las estaciones hidrométricas para el análisis

Se identificaron siete estaciones hidrométricas en la cuenca de estudio (Figura 17). Cuatro estaciones (18200, 18199, 18197, 18175) están localizadas en los canales de derivación, 20 a 30 m después de las tomas principales de las presas derivadoras, en la parte alta de la cuenca. En éstas se mide la extracción del recurso para actividades agrícolas (hay una presa derivadora sin estación hidrométrica). La estación 18193 Yautepec se localiza en la parte media de la cuenca y mide el caudal del río principal aguas abajo de las cinco presas derivadoras. La estación 18223, Ticumán, se localiza en la parte media-baja de la cuenca, sobre el cauce principal. La estación 18406, las Estacas, mide el aporte de agua del manantial denominado las Estacas hacia el Río Yautepec, en la parte baja de la cuenca.

Debido a lo limitado en la serie de tiempo de datos de caudal de la estación 18406, ésta no se utilizó en el análisis. La estación 18193 Yautepec se utilizó para el análisis de caudales ecológicos, con registros de 57 años (1949 a 2006). Debido a que no se tienen datos de registro de caudal diarios previos a la alteración del cauce por construcción de las presas derivadoras, se tomó el registro de caudal en la estación como el caudal posterior a la intervención. Como una aproximación del régimen hidrológico de caudal no alterado (previo a la alteración del cauce), se sumaron los registros de caudales diarios de las estaciones de los canales de derivación (estaciones 18200, 18199, 18197, 18175) a la de la estación 18193 Yautepec, ya que si esos caudales no fueran desviados serían parte del caudal registrado en dicha estación. Además en la literatura no se encontraron fechas ni registros que muestren una condición de referencia natural del régimen hidrológico del cauce.

La metodología del IHA señala que cuando la corriente ha sufrido constantes alteraciones y no existen registros que muestren una condición de referencia anterior al impacto, es conveniente hacer un análisis de tendencia de caudal. Esto se hizo para la estación 18223, con registros de 54 años (1952-2006), debido a que no existen estaciones de aforo en el tramo aguas arriba (entre la estación 18193 Yautepec y la estación 18223 Ticumán), que cuantifiquen el volumen utilizado para el riego. Esto sirve para observar si la tendencia del caudal es a mantenerse o disminuir en ese punto.

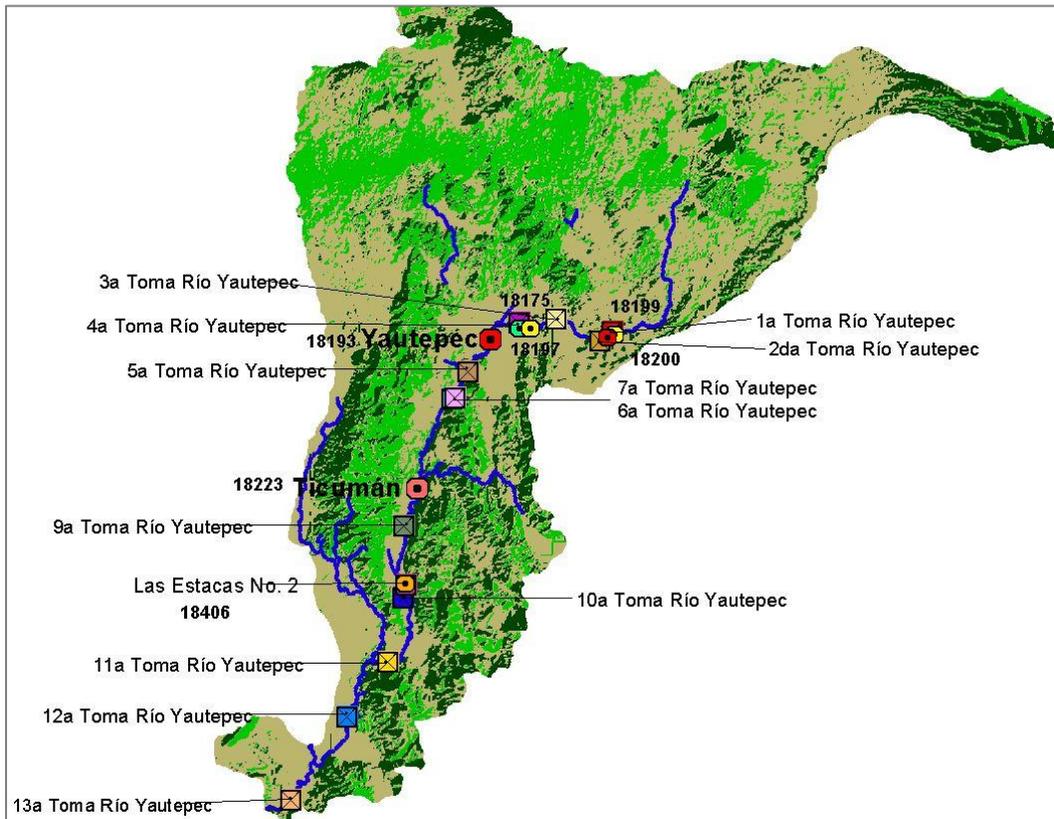


Figura 16. Ubicación de estaciones hidrométricas de la subcuenca.

4.1.2 Estimación de los caudales ecológicos

Estimación de los parámetros IHA

Para la determinación del caudal ecológico se utilizó el método hidrológico Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) desarrollado por Ritcher et al. (1996, 1997, 1998) y adaptado por The Nature Conservancy como software IHA-V. 7 (The Nature Conservancy, 2009). Este programa permite el procesamiento de registros hidrológicos diarios que caracterizan las condiciones naturales de los caudales y la evaluación de los cambios inducidos por el ser humano, cuyo fin es proteger la integridad ecológica de los ecosistemas degradados, al mismo tiempo satisfacer las necesidades humanas de agua.

La información requerida por el software, registros hidrométricos de caudal diario de las estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca, se obtuvo del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), disponible en línea. Los registros de caudal diario se exportaron a Excel 2010 para ponerlos en el formato requerido por el programa y se guardaron en formato de texto delimitado por comas (.csv). El análisis de datos se hizo considerando como año hidrológico del 01 de mayo al 30 de abril.

Con el software IHA V. 7.1 se calcularon los 33 parámetros hidrológicos Indicadores de Alteración Hidrológica IHA categorizados en cinco grupos, cuya influencia en el ecosistema se describe en el Cuadro 6. Se seleccionó la opción de análisis no paramétrico, por la distribución no normal de los datos hidrológicos. Los resultados del análisis están en percentiles y medianas mensuales (The Nature Conservancy, 2009). Los parámetros se obtuvieron para la condición de la estación 18193 sin extracción de agua (datos registrados en la estación más los registros de las estaciones aguas arriba) y con extracción (registros de la estación 18193). También se calcularon para la estación 18223.

Cuadro 6. Parámetros hidrológicos que definen el régimen de caudal.

Grupo de parámetros	Parámetros hidrológicos	Influencias del ecosistema
1. Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales	Disponibilidad del hábitat para organismos acuáticos Disponibilidad de humedad del suelo para las plantas Disponibilidad de agua para los animales terrestres Disponibilidad de alimentos Confiabilidad del abastecimiento de agua para los animales terrestres Acceso de los depredadores a los sitios de anidación Influye en la temperatura del agua, los niveles de oxígeno y la fotosíntesis en la columna de agua
	Subtotal 12 parámetros	
2. Magnitud y duración de las condiciones hidrológicas extremas anuales	<ul style="list-style-type: none"> • Mínimos anuales, media de 1 día • Mínimos anuales, medias de 3 días • Mínimos anuales, medias de 7 días • Mínimos anuales, medias de 30 días • Mínimos anuales, medias de 90 días • Máximos anuales, media de 1 día • Máximos anuales, medias de 3 días • Máximos anuales, medias de 7 días • Máximos anuales, medias de 30 días • Máximos anuales, medias de 90 días • Cantidad de días con caudal cero • Índice de flujo de base: caudal mínimo de 7 días/caudal medio anual 	Equilibrio de organismos competitivos, y tolerantes a las presiones Creación de sitios para la colonización de plantas Estructuración de la morfología del canal del río y las condiciones físicas del hábitat Estrés de la humedad del suelo en las plantas Deshidratación en los animales Volumen del intercambio de nutrientes entre los ríos y las planicies de inundación Duración de las condiciones de presión tales como bajo nivel de oxígeno y concentración de químicos en los ambientes acuáticos Distribución de las comunidades de plantas en lagos, estanques y planicies de inundación Duración de los caudales altos para la eliminación de residuos, aeración de los lechos de desove en los sedimentos del canal
	Subtotal 12 parámetros	

Continuación Cuadro 6

3. Momento de las condiciones hidrológicas extremas anuales	<ul style="list-style-type: none"> • Fecha juliana de cada máximo anual de 1 día • Fecha juliana de cada mínimo anual de 1 día 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Compatibilidad con los ciclos de vida de los organismos ➢ Predictibilidad/evitabilidad del estrés en los organismos ➢ Acceso a hábitats especiales durante la reproducción o para evitar la depredación ➢ Indicios para el desove de los peces migratorios
Subtotal 2 parámetros		<ul style="list-style-type: none"> ➢ Evolución de las estrategias de los ciclos biológicos, mecanismos de comportamiento
4. Frecuencia y duración de los pulsos altos y bajos	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de pulsos bajos en cada año hidrológico • Media o mediana de la duración de los pulsos bajos (días) • Cantidad de pulsos altos en cada año hidrológico • Media o mediana de la duración de los pulsos altos (días) 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Frecuencia y magnitud del estrés de la humedad del suelo sobre las plantas ➢ Frecuencia y magnitud del estrés anaeróbico sobre las plantas ➢ Disponibilidad de hábitats en las planicies de inundación para organismos acuáticos ➢ Intercambios de nutrientes y de materia orgánica entre el río y las planicies de inundación ➢ Disponibilidad de minerales del suelo ➢ Acceso a sitios de alimentación, descanso y reproducción para las aves acuáticas ➢ Influye en el transporte de las cargas del fondo, la textura de los sedimentos del canal y la duración de las perturbaciones del sustrato (pulsos altos)
Subtotal 4 parámetros		
5. Tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas	<ul style="list-style-type: none"> • Tasas de ascenso: Media o mediana de todas las diferencias positivas entre valores diarios consecutivos • Tasas de descenso: Media o mediana de todas las diferencias negativas entre valores diarios consecutivos • Cantidad de inversiones Hidrológicas 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Estrés de la sequía en las plantas (niveles decrecientes) ➢ Atrapamiento de los organismos en las islas, planicies de inundación (niveles crecientes) ➢ Estrés por la desecación de los organismos de baja movilidad en el borde de la corriente
Subtotal 3 parámetros		
		Total 33 parámetros

Fuente: The Nature Conservancy (2009).

Análisis de los rangos de variabilidad (RVA)

El análisis de rangos de variabilidad se realizó para las magnitudes de las condiciones hidrológicas mensuales (12 meses) del grupo de parámetros de IHA de magnitud de condiciones hidrológicas mensuales de la estación 18193, debido a que el interés se centró en establecer un caudal ecológico mensual. Se tomó como referencia la variación natural de los valores de los parámetros IHA anterior a un impacto (en este caso la condición de no extracción del recurso hídrico, que corresponde a los caudales registrados en la estación 18193 más los caudales registrados en las presas derivadoras aguas arriba de la estación), para determinar el alcance de las alteraciones a los regímenes naturales de caudales. Esta variación puede usarse para definir metas de caudal ecológico, ya que los encargados del manejo del agua deben mantener la distribución de los valores anuales cercanos a las distribuciones de los valores no alterados como sea posible (Richter *et al.*, 1997). En este caso, se debería destinar los caudales desviados para riego de cultivos en las presas derivadoras para cumplir con la meta de caudal ecológico, para acercarse a la condición natural del río. Los rangos de variabilidad marcan las condiciones iniciales para definir las metas del caudal, por lo cual la diferencia de medianas mensuales se considera el déficit de agua del caudal ecológico y por tanto, la cantidad de agua a reducir en el usuario agrícola.

La configuración predeterminada del software Indicadores de Alteración Hidrológica Versión 7.1, en el análisis de RVA no paramétrico, establece los límites de las categorías a +-17 percentiles de la mediana, de tal forma que la categoría baja contiene los valores menores o iguales al percentil 33, la categoría media contiene los valores dentro del percentil 34 y 67 y la categoría alta incluye a los valores mayores que el percentil 67. Al usar los percentiles 33 y 67 se asegura que en la mayor parte de las situaciones el número de valores anteriores al impacto que cae en cada categoría sea el mismo y se facilite la interpretación de los resultados (The Nature Conservancy, 2009). En cambio, Richter *et al.* (1997), recomiendan que el umbral para la variabilidad natural, debe estar entre los percentiles 25 a 75, qué en una distribución normal

correspondería a mantenerse dentro de un intervalo de más/menos una desviación estándar. Este intervalo de variación permite evaluar el desempeño de la asignación de caudales ecológicos en una corriente regulada estableciendo las metas de cumplimiento. Por esto, en este estudio se utilizó el rango de los percentiles 25 a 75 para delimitar las categorías.

El análisis RVA divide los valores de los parámetros en tres categorías con base en los percentiles seleccionados. Posteriormente, se calcula la frecuencia observada de los parámetros IHA que caen en estas categorías. Se estima la frecuencia esperada con la cual los valores “bajo impacto y no impacto” de los parámetros de IHA deberían caer dentro de cada categoría. La frecuencia esperada es igual a la cantidad de valores en la categoría durante el período anterior al impacto multiplicada por la razón entre el número de años posteriores al impacto y al número de años anteriores al impacto. El factor de alteración hidrológica para cada una de las categorías se determina mediante la fórmula:

$$HA = (\text{Frecuencia observada} - \text{frecuencia esperada}) / \text{frecuencia esperada}$$

Un valor positivo de alteración hidrológica significa que la frecuencia de los valores en la categoría ha aumentado entre el período sin impacto (valor máximo infinito) y el período con impacto. Ocurre lo contrario cuando se presenta un valor negativo (valor mínimo de -1).

Estimación de los componentes del caudal ecológico

Posteriormente se calcularon, para las estaciones 18193 y 18223, los 34 parámetros de los componentes del caudal ecológico (EFC) de los cinco grupos que considera el programa: caudales bajos, caudales extremadamente bajos, pulsos de caudal alto, pequeñas inundaciones y grandes inundaciones (Cuadro 7). Los umbrales establecidos para los EFC en la estación 18193 fueron: para caudales altos se consideraron todos los valores igual o mayores al percentil 75; los caudales bajos como aquellos valores

iguales o menores al percentil 50; para el pico mínimo de las pequeñas inundaciones los valores de caudales mayores al valor correspondiente a un periodo de retorno de 2 años, y el de las grandes inundaciones los valores de caudales mayores al valor correspondiente a un periodo de retorno de 10 años. Estos componentes están dados a través de la observación de los ecólogos investigadores de que los hidrogramas de los ríos pueden dividirse en un conjunto de modelos hidrográficos ecológicamente relevantes que se repiten. Para que se mantenga la integridad ecológica de un cauce se deben mantener las condiciones de caudal para que estos cinco componentes se reproduzcan.

Cuadro 7. Componentes del caudal ecológico y sus influencias en el ecosistema.

Tipo de EFC	Parámetros hidrológicos	Influencias en el ecosistema
1. Caudales bajos mensuales	<ul style="list-style-type: none"> • Valores de la media o la mediana de los caudales bajos durante cada mes calendario 	<ul style="list-style-type: none"> > Proporcionan hábitat adecuado para los organismos acuáticos > Mantienen temperaturas del agua, oxígeno disuelto y química del agua apropiados > Mantienen el nivel freático en las planicies de inundación, y la humedad del suelo para las plantas > Proporcionan agua potable para los animales terrestres > Mantienen los huevos de peces y anfibios en suspensión > Permiten a los peces moverse a áreas de alimentación y desove
	Subtotal 12 parámetros	
2. Caudales extremadamente bajos	<ul style="list-style-type: none"> • Frecuencia de los caudales extremadamente bajos durante cada año hidrológico o estación • Valores de la media o la mediana de eventos de caudal extremadamente bajo: <ul style="list-style-type: none"> -Duración (días) -Pico del caudal (caudal mínimo durante el evento) -Momento (fecha juliana del pico del caudal) 	<ul style="list-style-type: none"> > Permiten el reclutamiento de ciertas especies de plantas en las planicies de inundación > Eliminan especies invasoras introducidas de las comunidades acuáticas y riparias > Concentran las presas en áreas limitadas para beneficiar a los depredadores
	Subtotal 4 parámetros	

Continuación cuadro 7

3. Pulsos de caudal alto	<ul style="list-style-type: none"> · Frecuencia de los pulsos de caudal alto durante cada año hidrológico o estación · Valores de la media o la mediana de eventos de pulso de caudal alto: <ul style="list-style-type: none"> - Duración (días) - Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) - Momento (fecha juliana del pico del caudal) - Tasas de crecimiento y decrecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ Modelan las características físicas del cauce del río, incluidos remansos y rápidos ➢ Determinan el tamaño de los sustratos del lecho de las corrientes (arena, piedras) ➢ Impiden la invasión de vegetación riparia en el cauce ➢ Restauran las condiciones de calidad normal del agua después de caudales bajos prolongados, arrastrando productos de desechos y contaminantes ➢ Mantienen condiciones adecuadas de salinidad en los estuarios
Subtotal 6 parámetros		
4. Inundaciones pequeñas	<ul style="list-style-type: none"> · Frecuencia de las pequeñas inundaciones durante cada año hidrológico o estación · Valores de la media o la mediana de eventos de pequeñas inundaciones: <ul style="list-style-type: none"> - Duración (días) - Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) - Momento (fecha juliana del pico del caudal) - Tasas de crecimiento y decrecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> Se aplica a pequeñas y grandes inundaciones: ➢ Proporcionan indicios de migración y desove de los peces ➢ Provocan una nueva fase en el ciclo biológico ➢ Permiten que los peces desoven en las planicies de inundación, proporcionando áreas de cría para los peces juveniles ➢ Proporcionan nuevas oportunidades de alimentación a los peces y aves acuáticas ➢ Recargan el nivel freático de las planicies de inundación ➢ Mantienen la diversidad de los tipos de bosque en las planicies de inundación mediante inundaciones prolongadas (es decir, diferentes especies de plantas tienen tolerancias diferentes) ➢ Controlan la distribución y la abundancia de las plantas en las planicies de inundación ➢ Depositán nutrientes en las planicies de inundación
Subtotal 6 parámetros		

Continuación cuadro 7

5. Grandes inundaciones	<ul style="list-style-type: none"> · Frecuencia de las grandes inundaciones durante cada año hidrológico o estación · Valores de la media o la mediana de eventos de grandes inundaciones: -Duración (días) -Pico del caudal (caudal máximo durante el evento) -Momento (fecha juliana del pico del caudal) -Tasas de crecimiento y Decrecimiento 	<p>Se aplica a pequeñas y grandes inundaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤Mantienen el balance de especies en las comunidades acuáticas y riparias ➤Crean sitios para el reclutamiento de plantas colonizadoras ➤Dan forma a los hábitats físicos de las planicies de inundación ➤Depositán grava y piedras en las áreas de desove ➤Empujan material orgánico (alimentos) y desechos de madera (estructuras de hábitat) al cauce ➤Eliminan especies invasoras e introducidas en las comunidades acuáticas y riparias ➤Esparcen semillas y frutas de plantas riparias ➤Impulsan movimientos laterales del cauce del río, formando nuevos hábitats (cauces secundarios, meandros abandonados) ➤Proporcionan a las plántulas acceso prolongado a la humedad del suelo
Subtotal 6 parámetros		Total 34 parámetros

Fuente: The Nature Conservancy (2009).

Una vez obtenido el régimen de variabilidad natural del cauce y los componentes y los componentes de caudal ecológico, se identifican los umbrales de variabilidad que se presentan en el río en los diferentes periodos y se diseña una estrategia de asignación de caudal ecológico.

4.2 Estimación del impacto económico de la determinación del caudal ecológico en el usuario agrícola

4.2.1 Identificación de los principales cultivos en la cuenca

De la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) se obtuvo información para el año 2012 sobre los cultivos de riego, superficie sembrada, rendimientos por hectárea y valor de la producción. Esta información fue utilizada para determinar la importancia relativa de los cultivos de los módulos de riego del área de estudio. De esta forma se identificó que la mayor cantidad de agua del río (aguas arriba de la estación 18193) se usa para el cultivo de caña de azúcar, y este cultivo es el de mayor valor económico. Se tomó la decisión de utilizar al cultivo de caña de azúcar para evaluar los impactos de la disminución en la oferta de agua para la agricultura, con el fin de destinarla como caudal ecológico.

4.2.2 Estimación de los impactos

Para estimar el impacto económico en el usuario agrícola en un escenario de reducción de oferta del recurso agua para la agricultura, para destinarla al uso ambiental o ecológico, se utilizó el método de valoración económica del agua en función de la productividad marginal. Se generó una función de producción translog, la cual considera dos factores de producción: agua (W) y jornales agrícolas (J). Se encontró la relación del tipo:

$$Y = f(J, W)$$

Dónde:

Y=Producción

J=Jornales agrícolas

W=Volumen de agua

Esta relación permite observar el efecto de una unidad adicional de un factor de la producción en el beneficio neto de los agricultores y en la generación de jornales agrícolas, de esta manera se obtiene el costo marginal de ambos precios y rendimientos constantes. Se tomó como año base de la estimación el 2012. El patrón de cultivo seleccionado fue el cultivo de la caña de azúcar que es el que representa más del 90% de la producción cosechada en la cuenca.

Se obtuvo información sobre el número de usuarios y superficie regable para los módulos de riego alto y bajo Yautepec a través de entrevista al personal del Distrito de Riego 016 Morelos y reportes de la Comisión Nacional del Agua. La base de datos de los agricultores cañeros se obtuvo del Ingenio de Zacatepec, Morelos. Para obtener las cantidades de los factores utilizados se aplicó un cuestionario a 35 usuarios agrícolas dedicados a la producción del cultivo de caña de azúcar. Una de las variables fue la cantidad de agua utilizada por hectárea para el cultivo de caña de azúcar, en metros cúbicos de agua por hectárea por ciclo de cultivo. En la entrevista se obtuvo información para calcular costos de producción y el valor de la producción. Los jornales se cuantificaron como el número de jornales por hectárea en un ciclo de cultivo. El valor de la producción se determinó mediante el rendimiento promedio y el precio medio observado en el año 2012. Los costos marginales se obtuvieron de los datos recopilados con el cuestionario.

Para calcular los logaritmos naturales de la producción y de los factores de la producción se utilizó el programa Stata V. 11. Los coeficientes β_1 y β_2 representan los valores en logaritmo de las variables mencionadas. La función de producción translog estimada fue:

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln J + \beta_2 \ln W$$

Solamente se estimó la primera parte de la ecuación para disminuir problemas de multicolinealidad (Canizales y Bravo, 2011).

La elasticidad se obtuvo mediante la derivada parcial de la producción con respecto al factor agua (W), como:

$$\sigma = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln W} = \beta_2$$

El valor marginal (ρ) del agua en la producción se sustituyó en la siguiente ecuación:

$$\rho = \sigma \frac{Y}{W}$$

El precio del agua (PW) de cada metro cúbico se determinó multiplicando el precio de la cosecha (PY) por la productividad marginal del agua del cultivo (Garrido *et al.*, 2004).

$$PW = PY * \rho$$

Una vez obtenido el precio real del agua, se multiplicó el volumen de agua a reducir del uso agrícola, con la finalidad de conservar la cantidad de agua en el cauce del río para mantener sus funciones ecológicas (caudal ecológico). Se asumió que el resultado es el impacto económico que implica la reducción del volumen de agua a la agricultura para devolverlo al caudal ecológico.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Análisis histórico de los caudales del río

El hidrograma de los valores medios diarios de caudal del río para la estación 18193 (con y sin extracción de agua aguas arriba) y de la estación 18223 muestran una tendencia similar durante el año hidrológico (Figura 18). La gráfica nos da un primer acercamiento sobre cómo disminuyen los caudales a través del río debido a la alteración de los caudales por la extracción de agua.

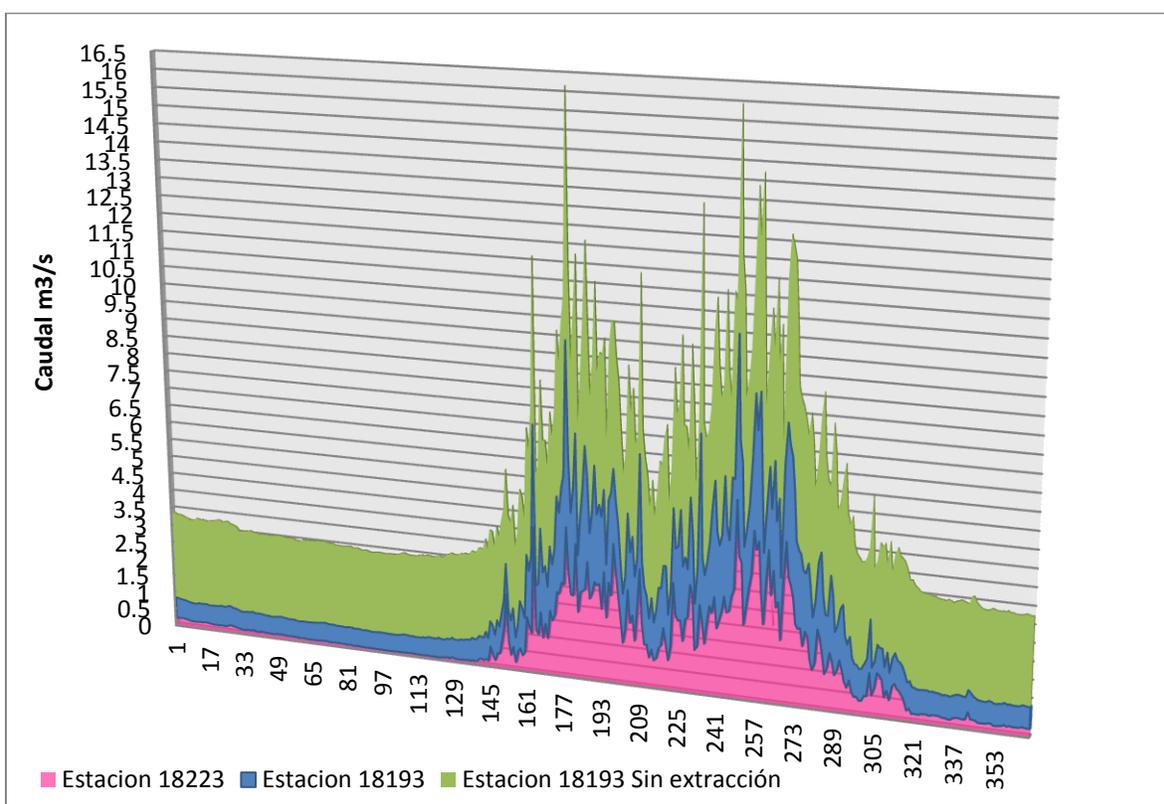


Figura 17. Variación de los valores medios diarios en las estaciones hidrométricas del cauce analizadas.

Los valores de las medianas mensuales de los valores de caudal (Figura 19) muestran el comportamiento del cauce durante el año hidrológico. En la Figura 19 se observa la estacionalidad (lluvias-estiaje). En las dos estaciones se observa un comportamiento

hidrológico similar y la variación en los valores de caudal es menor en la estación 18223, conocida como Ticumán.

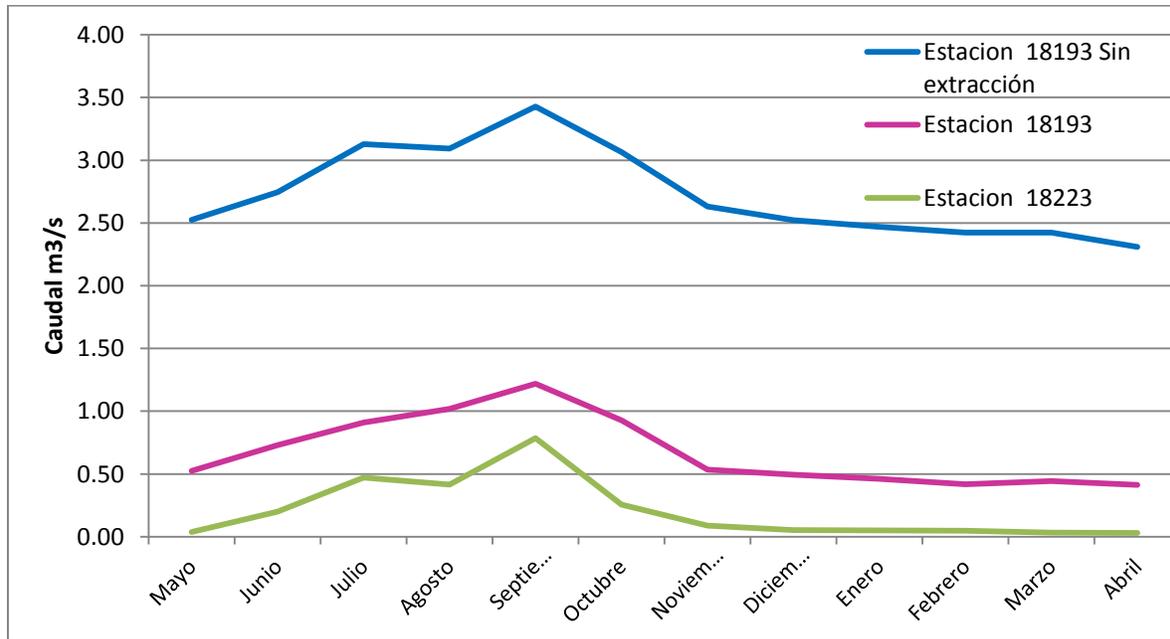


Figura 18. Variación de la mediana de los caudales mensuales las dos estaciones analizadas.

La variación inter-anual (comportamiento histórico del río por cada año), fue alta en las dos estaciones (Figura 20, 21 y 22). Se observan algunos años con caudales particularmente altos y otros de bajo caudal. Esto se relaciona con la cantidad y distribución de las lluvias ocurrida en cada año.

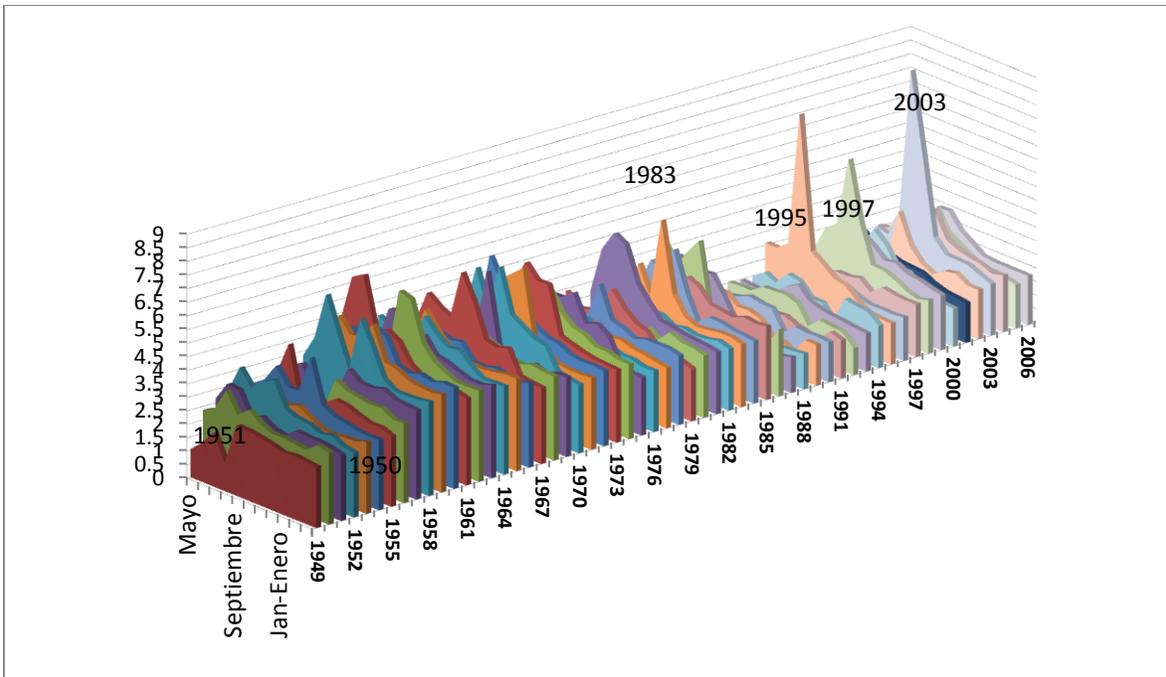


Figura 19. Variación inter-anual en la estación 18193 sin extracción de agua.

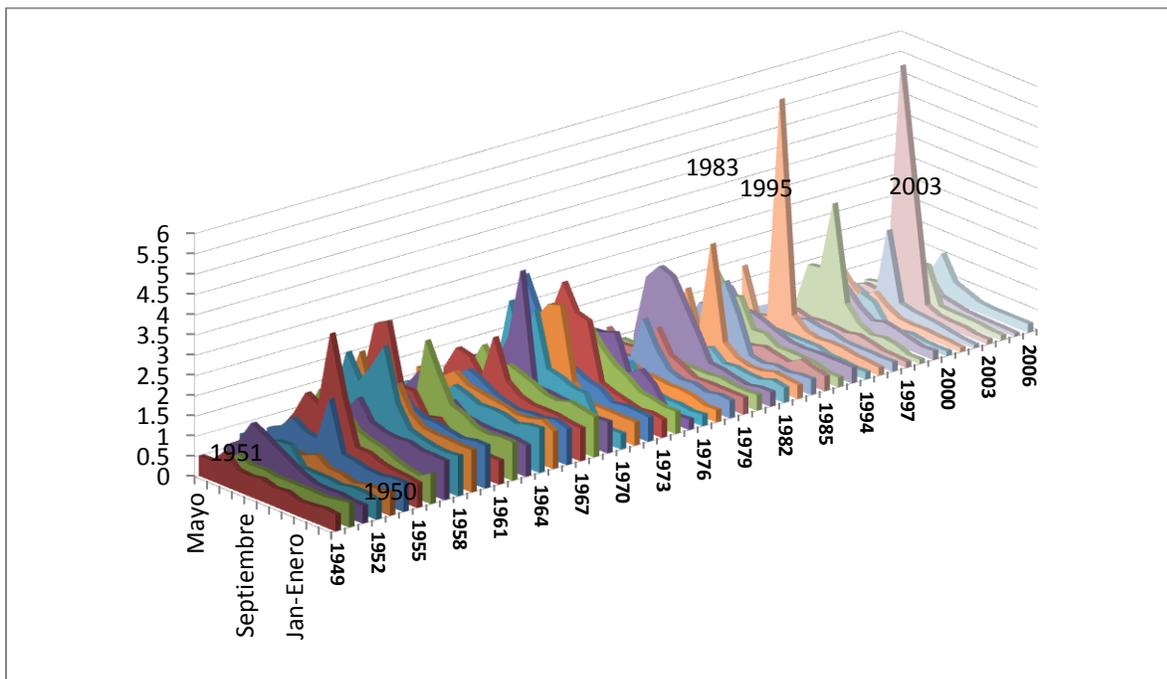


Figura 20. Variación inter-anual en la estación 18193 con extracción de agua.

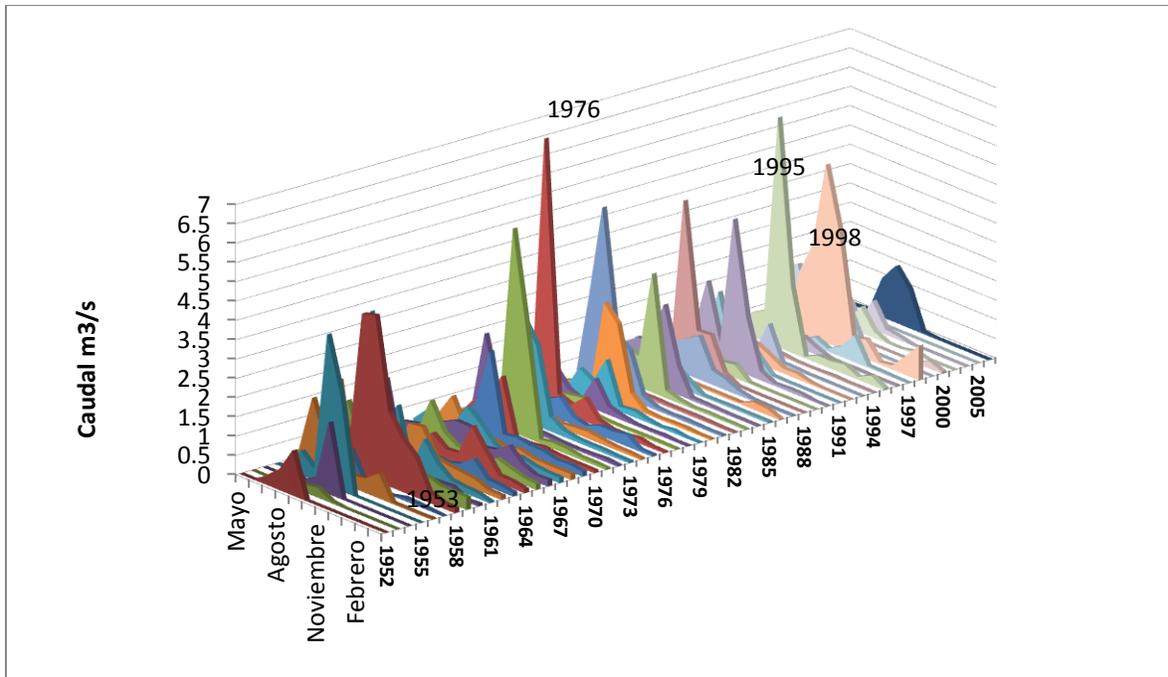


Figura 21. Variación inter-anual en la estación 18223

5.2 Indicadores de Alteración Hidrológica (IHA) con base en la estación hidrométrica 18193

5.2.2 Condición hidrológica mensual

El grupo de parámetros IHA de magnitud de las condiciones hidrológicas mensuales es el que determina la disponibilidad de agua en el ecosistema. El caudal medio anual determinado bajo la condición de no extracción del recurso hídrico es de $3.13 \text{ m}^3/\text{s}$ y de $1.22 \text{ m}^3/\text{s}$ bajo la condición de extracción (Cuadro 8). Los caudales mensuales de la cuenca, registrados en la estación 18193, han sido fuertemente alterados (Figura 23). Las extracciones de agua mensual promedio para regar las tierras agrícolas aguas arriba de la estación 18193 es de un 39% del caudal del río.

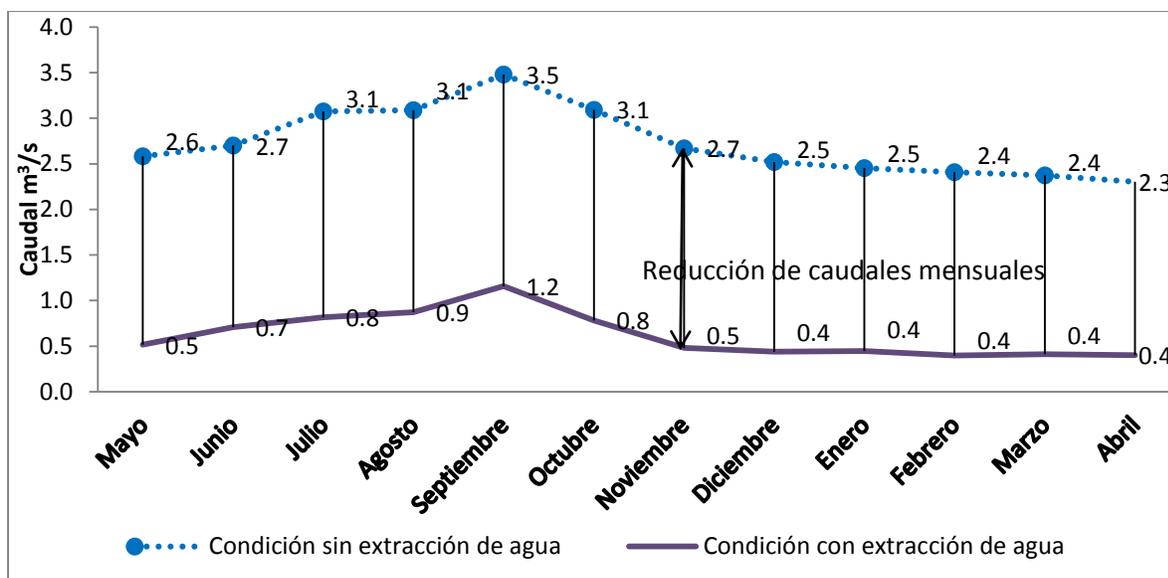


Figura 22. Efectos de la extracción de agua sobre los caudales mensuales.

En el mes de septiembre se tiene la mayor disponibilidad de agua. La mediana del caudal mensual sin extracción de aguas arriba es de $3.48 \text{ m}^3/\text{s}$ sin extracción y de $1.16 \text{ m}^3/\text{s}$ para la condición con extracción. Los meses con la menor aportación de agua son febrero, marzo y abril.

Cuadro 8. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) para la estación hidrométrica 18913.

Parámetros IHA	Sin extracción del recurso hídrico	Con extracción del recurso hídrico
	(m^3/s)	(m^3/s)
Mayo	2.6	0.5
Junio	2.7	0.7
Julio	3.1	0.8
Agosto	3.1	0.9
Septiembre	3.5	1.2
Octubre	3.1	0.8
Noviembre	2.7	0.5
Diciembre	2.5	0.4
Enero	2.5	0.4
Febrero	2.4	0.4
Marzo	2.4	0.4
Abril	2.3	0.4

5.2.2 Caudales mínimos y máximos

El promedio de los caudales mínimos para el Río Yautepec oscila entre 1.8 m³/s y 2.3 m³/s, para la condición sin extracción del recurso para riego, con periodos de un día hasta noventa días. En la condición de extracción del recurso hídrico para riego los caudales mínimos se encuentran entre 0.2 m³/s y 0.5 m³/s (Cuadro 9). Los caudales mínimo y máximo para un periodo determinado se relacionan con condiciones de estrés y perturbaciones durante el año (Richter *et al.*, 1996). En algunos ríos de España se han sugerido caudales mínimos de 0.5 m³/s a 5.0 m³/s (Confederación Hidrológica del Duero, 2007). Se observa que en la condición actual (con extracción de agua para la agricultura), en la cuenca los caudales mínimos son muy pequeños y difícilmente se asegura un caudal ecológico suficiente.

Cuadro 9. Parámetros de IHA (mediana) del grupo 2 para la estación 18193.

Parámetros IHA	Sin extracción del recurso hídrico	Con extracción del recurso hídrico
1-día mínimo (m ³ /s)	1.8	0.2
3-días mínimo (m ³ /s)	1.8	0.3
7-días mínimo (m ³ /s)	1.9	0.3
30-días mínimo (m ³ /s)	2.1	0.4
90-días mínimo (m ³ /s)	2.3	0.5
1-día máximo (m ³ /s)	23.3	24.9
3-días máximo (m ³ /s)	15.5	12.7
7-días máximo (m ³ /s)	9.7	7.0
30-días máximo (m ³ /s)	6.1	2.9
90-días máximo (m ³ /s)	4.8	2.1
Número de días con cero caudal (días)	0	0
Índice caudal base (m ³ /s)	0.6	0.3

El caudal máximo de un día es de 23.3 m³/s en condiciones de no extracción de agua y de 24.9 m³/s utilizando el recurso hídrico. Para un periodo de tres días, el caudal máximo es de 15.5 y 12.7 para condiciones de no extracción y con extracción, respectivamente (Cuadro 9). Par aun periodo de 30 días, los caudales fueron de 6.1

m^3/s y $2.9 \text{ m}^3/\text{s}$ para las condiciones anteriormente referidas. Para 90 días es $4.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en condiciones de no extracción y $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ para condiciones con extracción de agua para riego. Los caudales máximos son relativamente pequeños comparados con cuencas de regiones lluviosas como la del Río Valles, donde los caudales máximos mensuales (comparados con el de 30 días de este estudio) varían de 7.08 a $227.69 \text{ m}^3/\text{s}$ (Santacruz y Aguilar-Robledo, 2009). En la cuenca de estudio, se observa que en los caudales máximos para periodos de tiempo corto (uno y tres días) no se muestran efectos significativos por la extracción de agua. Esto se hace más evidente para periodos más largos (30 días).

La curva de recesión, en el hidrograma de caudales de un río, es la parte de la curva justo después de la cresta del hidrograma y el periodo de recesión dura hasta que el hidrograma vuelve a aumentar. Representa la disminución del caudal durante periodos secos o después de episodios de precipitación importantes (IGME, 2008). El índice de caudal base que define el primer nivel del caudal descrito por Poff *et al.* (1997). Cuando disminuye o cesa la lluvia se inicia la recesión, culminando en la tasa mínima o flujo base, lo que mantiene los caudales en el periodo sin lluvias para este tramo del cauce corresponde a $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en el escenario de no uso del recurso y de $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ si se usa el recurso hídrico. Son caudales bajos registrados en la estación y se asocia a caudales comprometidos aguas abajo, para regadío.

5.2.3 Condiciones hidrológicas extremas

Los parámetros de IHA de las condiciones hidrológicas extremas del año hidrológico son importantes, porque la magnitud y frecuencia de los caudales extremos regulan varios procesos ecológicos (Poff *et al.*, 1997). Estos parámetros indican el momento en que ocurren las condiciones hidrológicas extremas anuales. El caudal mínimo anual histórico se registró el 17 de mayo (día juliano 138) y el caudal máximo anual el 20 de agosto (día juliano 233) en condiciones de no extracción (Cuadro 10). Con utilización del recurso hídrico, el caudal mínimo anual se presentó el día 5 de mayo (día juliano 126) y el caudal máximo anual el 21 de agosto (día juliano 234). Aunque en ambas

condiciones fueron fechas diferentes, los valores históricos extremos se presentaron en los mismos meses.

Cuadro 10. Parámetros de IHA de los grupos 3, 4 y 5 para la estación 18193.

Parámetros IHA	Sin extracción del recurso hídrico	Con extracción del recurso hídrico
Grupo 3		
Fecha de caudal mínimo (día juliano)	138	126.5
Fecha de caudal máximo (día juliano)	233	234
Grupo 4 (Cantidad y mediana)		
Conteo pulsos bajos (número de pulsos)	2	18.5
Duración pulsos bajo (días)	5	10
Conteo pulsos altos (número de pulsos)	11	12
Duración pulsos alto (días)	2.5	1
Umbral de pulso bajo (m ³ /s)	2	2
Umbral de pulso alto (m ³ /s)	3.4	3.4
Grupo 5 (Cantidad y mediana)		
Tasa de subida	0.04	0.1
Tasa de bajada	-0.04	-0.1
Número de inversiones	149	179.5

5.2.4 Pulsos altos y bajos

En la condición de no extracción de agua del río, se presentaron dos pulsos bajos, número de ocurrencias anuales durante el cual la magnitud de los caudales diarios fue igual o menor al percentil 50 (2 m³/s), con una duración de cinco días (Cuadro 10). Para esta condición se tuvo 11 pulsos altos, caudales diarios mayores al percentil 75 (3.4 m³/s), con una duración de 2.5 días. En la condición de extracción de agua del río, se presentan 12 pulsos altos con una duración de un día y 18.5 pulsos bajos con una duración de 10 días.

5.2.5 Tasa y frecuencia de los cambios en las condiciones hidrológicas

La tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas, cambios de crecimiento o disminución de los caudales diarios, es alta para el Rió Yautepec. La cantidad de inversiones hidrológicas en condiciones de no extracción del recurso hídrico es de 149 y en condiciones de uso del recurso es de 179.5 (Cuadro 10). Esto indica que la alteración de los caudales (extracción para uso agrícola) aumenta los cambios en la tendencia del caudal diario durante el año, tanto en aumento del caudal como en su disminución. Esto modifica las condiciones de hábitat, por estrés o por exceso de agua.

5.3 Componentes del Caudal Ecológico (EFC) de la estación 18193

5.3.1 Caudales bajos

Los caudales bajos marcan la condición de caudal dominante en el río. Su valor umbral fue $3.4 \text{ m}^3/\text{s}$, con una variación de los caudales bajos mensuales entre $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Cuadro 11), en la condición de no uso del recurso hídrico. En la condición de extracción del agua para riego, los caudales bajos varían entre $1.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Los meses que presentan un menor caudal corresponden a los de la época de estiaje, principalmente febrero, marzo y abril en la condición de no extracción (Figura 22). Para la condición de extracción de agua del río, los caudales bajos se presentan tanto en los meses de enero, febrero, marzo y abril, como en los meses de julio a octubre. Es notorio que el río en su condición natural tendría caudales no bajos, por lo menos en la temporada de lluvias.

Cuadro 11. Parámetros de los componentes de caudal ecológico (EFC) del grupo 1 para la estación 18193.

Parámetros EFC	Sin extracción del recurso hídrico (m ³ /s)	Con extracción del recurso hídrico (m ³ /s)
Grupo 1 Caudales bajos (hasta el percentil 25%)		
Mayo	2.4	2
Junio	2.4	2
Julio	2.7	1.9
Agosto	2.6	1.9
Septiembre	2.7	1.9
Octubre	2.7	1.9
Noviembre	2.5	2
Diciembre	2.4	2
Enero	2.3	1.9
Febrero	2.3	1.9
Marzo	2.2	1.9
Abril	2.3	1.9

5.3.2 Caudales extremadamente bajos

El valor del umbral para el parámetro de caudal extremadamente bajo fue 2.7 m³/s. Los caudales extremadamente bajos se presentan en los últimos días del periodo de sequía, en el mes de marzo, en los que el cauce alcanza niveles muy bajos de agua hasta de 1.4 m³/s en condiciones de no extracción del recurso y de 0.4 m³/s si se hace uso del recurso (Cuadro 12).

Cuadro 12. Parámetros de EFC de los grupos 2 y 3 para la estación 18193.

Parámetros EFC	Sin extracción del recurso hídrico	Con extracción del recurso hídrico
Grupo 2 Caudales extremadamente bajos		
<i>(límite inferior y superior del percentil 10%)</i>		
Picos extremos (m ³ /s)	1.4	0.4
Duración (días)	4	8
Momento (Fecha juliana)	83	84
Grupo 3 Pulsos de caudal alto (entre los percentiles 50% y 75%)		
Picos de caudal alto (m ³ /s)	5.4	5.8
Duración (días)	4	1
Momento (fecha juliana)	225	228
Frecuencia	6	14
Tasa de crecimiento	1.2	4.1
Tasa de decrecimiento	-0.8	-4.1

5.3.3 Pulso de caudal alto

El valor umbral para los caudales extremadamente bajos fue 2.7 m³/s. El pico de caudal alto, que usualmente se produce durante las tormentas con precipitaciones abundantes y los niveles de agua suben por encima de los niveles de caudal bajo, pero no sobrepasan las orillas del cauce, fue de 5.4 m³/s, con una duración de 3 días en escenarios de no extracción de agua. Este pico se presentó el día 12 de agosto. En condiciones de utilización del recurso hídrico, el pico de caudal alto fue de 5.8 m³/s, con una duración de un día. Se presenta el día 15 de agosto.

5.3.4 Pequeñas inundaciones

El umbral para las pequeñas inundaciones fue de 23.3 m³/s. Las pequeñas inundaciones, aquellas crecidas del río que sobrepasan el cauce pero no incluyen inundaciones extremas de menor frecuencia, tuvieron una magnitud promedio de 31.5 m³/s. Su duración fue de 15.5 días y se presentan el día 25 de julio en condición de no

extracción de agua (Cuadro 13). En la condición de extracción, las pequeñas inundaciones fueron de 29.4 m³/s, con una duración de dos días y se presentan el día 10 de agosto.

Cuadro 13. Parámetros de EFC de los grupos 4 y 5 para la estación 18193.

Parámetros EFC	Sin extracción del recurso hídrico	Con extracción del recurso hídrico
Grupo 4 Pequeñas inundaciones		
(inundaciones con período de retorno de 2 años)		
Pico (m ³ /s)	31.5	29.4
Duración (días)	16	2
Momento (día juliano)	208	223
Tasa de crecimiento	5.9	22.9
Tasa de decrecimiento	-3.2	-23.5
Grupo 5 Grandes inundaciones		
(inundaciones con período de retorno de 10 años)		
Pico grandes (m ³ /s)	60.7	57.5
Duración (días)	30.5	5
Momento (día juliano)	209	218
Tasa de crecimiento	13	31.7
Tasa de decrecimiento	-6.9	-13.9

5.3.5 Grandes inundaciones

El umbral para las grandes inundaciones fue 23.3 m³/s. Las grandes inundaciones, eventos extremos que cambian la estructura biológica y física de un río y su planicie de inundación, en el escenario de no extracción del recurso tuvieron una magnitud promedio de 60.7 m³/s, con una duración de 30.5 días. Se presentó el día 27 de julio (día juliano 209). En el escenario de extracción de agua, las grandes inundaciones tienen una magnitud promedio de 57.7 m³/s, con una duración de cinco días. Se presentan el día juliano 218, que corresponde al 5 de agosto.

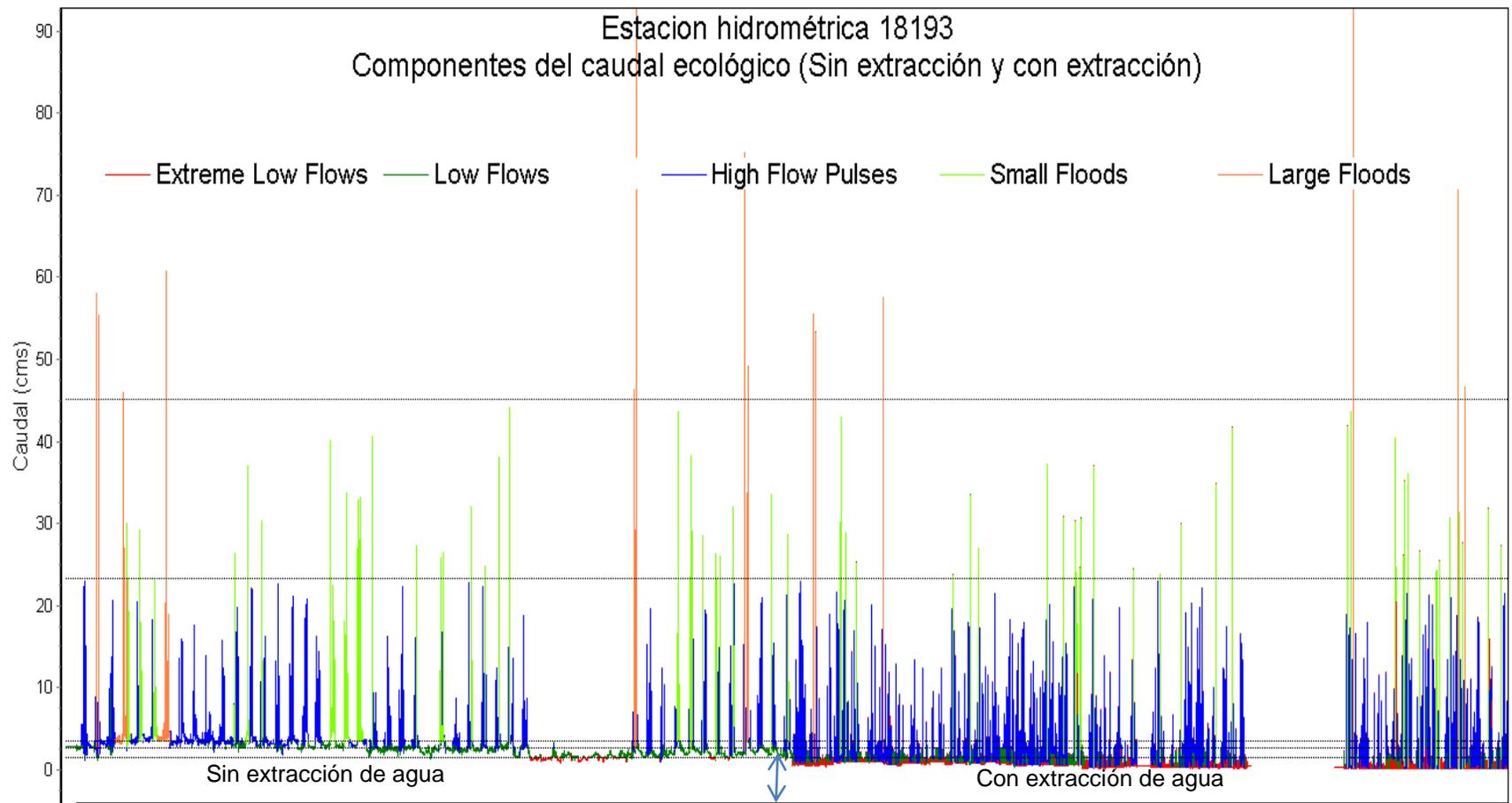


Figura 23. Componentes del caudal ecológico para la estación hidrométrica 18193.

5.4 Análisis de rangos de variabilidad (RVA) y caudal ecológico para la estación 18193

En el Río Yautepec, tomando como referencia la estación 18193, el caudal natural ha sido fuertemente alterado por las extracciones de agua para regar los cultivos agrícolas. Los caudales mensuales actuales que pasan por la estación son de una magnitud mucha más pequeña (Figura 25) que el límite bajo del rango de variabilidad anual de los caudales estimados como caudales naturales (sin extracción de agua, o caudales registrados en la estación 18193 más los caudales registrados en las estaciones de las presas derivadoras).

Los valores obtenidos de los rangos de variabilidad del régimen hidrológico que permiten que el caudal cumpla con las funciones ecológicas del ecosistema, en cada mes es el siguiente: Para el mes de mayo el límite del umbral bajo es de $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$, el umbral alto es de hasta $3 \text{ m}^3/\text{s}$, en el mes de junio el rango de umbrales va de $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$, en julio los umbrales oscilan entre $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3.8 \text{ m}^3/\text{s}$, en agosto los umbrales toman valores que van de los $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$ a $3.9 \text{ m}^3/\text{s}$, para el mes de septiembre los límites de umbral varían de $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ a $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$, para los meses siguientes los valores de los umbrales son menores y no sobrepasan los $4 \text{ m}^3/\text{s}$.

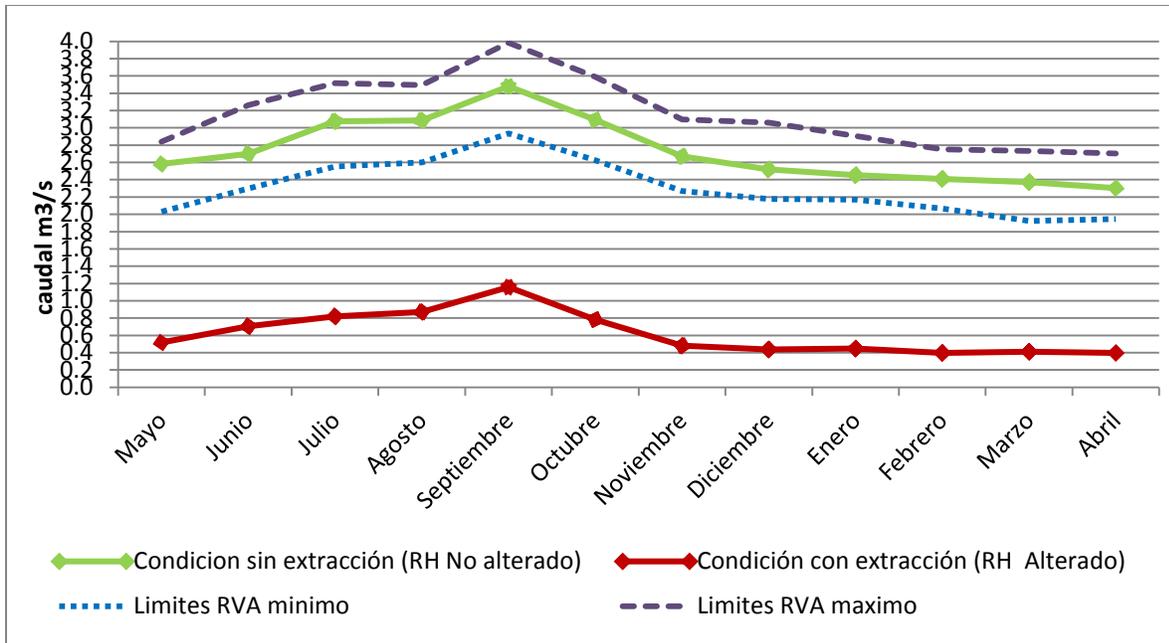


Figura 24. Rangos de variabilidad anual (RVA) para la estación 18193.

De acuerdo al análisis de RVA, el caudal de reserva registrado en la estación 18193 es del 22% y el 78% está siendo utilizado por el usuario agrícola aguas arriba de la estación. Aún ese 22% de agua en el río se encuentra comprometido aguas abajo (RH-18_DOF-07/Dic/07).

Los resultados de los rangos de variabilidad arrojan que del régimen hidrológico natural, el umbral mínimo que hay que dejar de caudal ecológico es del 36.7% y la cantidad máxima de agua es del 62.7% en promedio. Actualmente, se está dejando poco más del 20% del volumen de agua superficial que oferta la zona de estudio. Por lo tanto, no se cumple con la cantidad necesaria para el caudal ecológico.

El caudal ecológico mínimo mensual para el Río Yautepec corresponde al límite bajo de RVA (Cuadro 14). El rango de caudal ecológico está dado por los límites bajo y alto de RVA. El déficit anual de agua para mantener los caudales ecológicos es de 43.2 hm³ a 65.6 hm³. Para cumplir con el mandato de dejar un caudal ecológico, como lo estable la modificación de la Ley de Aguas Nacionales de 2004 (Ley de Aguas Nacionales, 2004), se requiere descontar esta cantidad de las concesiones de agua actuales de los usuarios agrícolas, principalmente a los productores de caña, quienes son los que están usando la mayor cantidad de agua en la parte alta y media de la cuenca.

Cuadro 14. Déficit mensual de agua para el caudal ecológico.

Mes	Caudal promedio m ³ /s (pre impacto)	Caudal promedio m ³ /s (post impacto)	Limite bajo RVA	Limite alto RVA	RVA medio		Limite RVA bajo déficit	
					Déficit de agua del caudal (m ³ /s)	déficit de agua en hm ³	de agua del caudal (m ³ /s)	déficit de agua en hm ³
Mayo	2.6	0.5	1.8	3.0	-2.1	-5.4	-1.3	-3.3
Junio	2.7	0.7	2.1	3.5	-2.0	-5.2	-1.4	-3.6
Julio	3.1	0.8	2.2	3.8	-2.3	-5.9	-1.4	-3.6
Agosto	3.1	0.9	2.3	3.9	-2.2	-5.7	-1.4	-3.7
Septiembre	3.5	1.2	2.6	4.5	-2.3	-6.0	-1.5	-3.8
Octubre	3.1	0.8	2.4	4.0	-2.3	-6.0	-1.6	-4.3
Noviembre	2.7	0.5	2.1	3.3	-2.2	-5.7	-1.6	-4.1
Diciembre	2.5	0.4	1.9	3.2	-2.1	-5.4	-1.4	-3.7
Enero	2.5	0.4	1.8	3.2	-2.0	-5.2	-1.3	-3.4
Febrero	2.4	0.4	1.7	2.9	-2.0	-5.2	-1.3	-3.3
Marzo	2.4	0.4	1.7	2.9	-2.0	-5.1	-1.3	-3.4
Abril	2.3	0.4	1.6	2.9	-1.9	-4.9	-1.2	-3.1
Déficit anual de caudal ecológico						-65.6		-43.2

5.5 Análisis del régimen de caudal alterado del Río Yautepec (estación hidrométrica 18223)

5.5.1 Análisis de la serie histórica de caudales de la estación 18223

Los caudales mensuales de la estación 18223 muestran la estacionalidad de la disponibilidad de caudales en la parte baja de la cuenca. Se presenta un periodo de mayores caudales del río en el periodo mayo a octubre y un periodo de menores caudales en el periodo de noviembre a abril (Figura 26). Es en el primer periodo también en el que se observa una mayor variabilidad de caudales intra-anual (Cuadro 15).

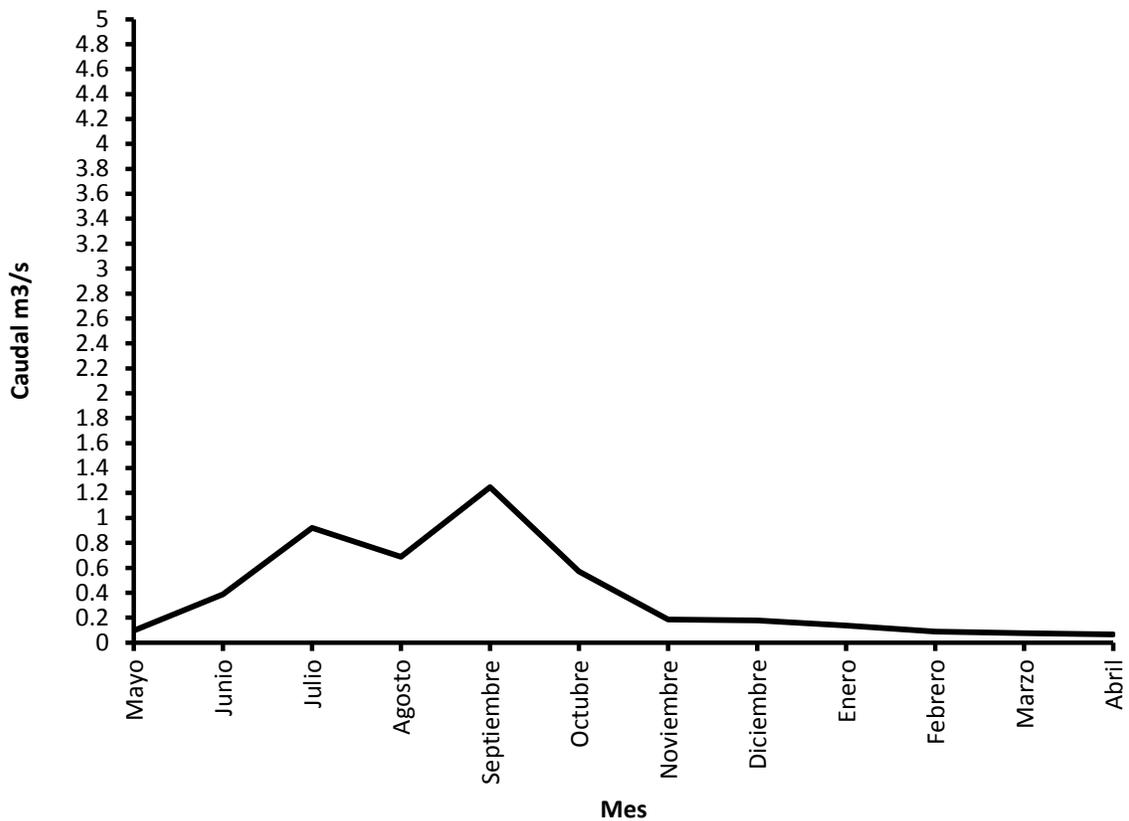


Figura 25. Caudales medios mensuales para la estación 18223.

Cuadro 15. Caudales medios mensuales para la estación 19223.

Mes	Caudal	Desviación estándar
Mayo	0.0955	0.1916
Junio	0.3879	0.5022
Julio	0.9213	1.2917
Agosto	0.6879	0.9501
Septiembre	1.2472	1.2685
Octubre	0.5712	0.8686
Noviembre	0.1851	0.2986
Diciembre	0.1767	0.2763
Enero	0.1359	0.2045
Febrero	0.0879	0.0951
Marzo	0.0750	0.0932
Abril	0.0653	0.1300

En la parte baja de la cuenca del Río Yautepec se observa una tendencia decreciente de los caudales base (Figura 27). Esta tendencia decreciente inicia en el año de 1969. Esto puede estar relacionado con el periodo en el que se empezó a modificar el régimen de caudal del río debido a la construcción de obras de infraestructura para el riego de los cultivos. Los caudales base son importantes para determinar los caudales ecológicos porque son los que mantienen el caudal del río en la época no lluviosa.

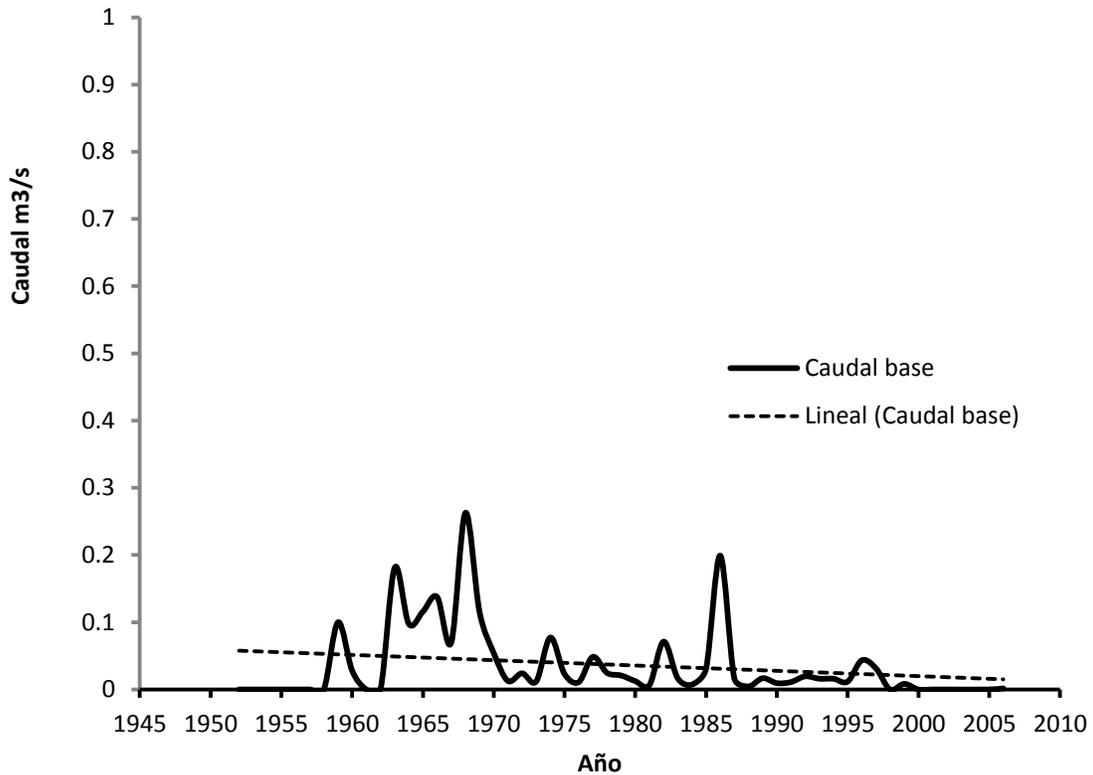


Figura 26. Tendencia del caudal base para la estación 18223.

5.5.2 Parámetros de IHA para la estación 18223

El caudal medio anual obtenido para la estación 18223 es de $0.91 \text{ m}^3/\text{s}$. De acuerdo a los parámetros del grupo 1 de IHA (Cuadro 16), el mes de septiembre presenta la mayor disponibilidad de agua, con una mediana de $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$. El periodo de enero a mayo es el que presenta la menor disponibilidad de agua.

Cuadro 16. Parámetros de IHA del grupo 1 (medianas de la serie) para la estación hidrométrica 18223.

Parámetros IHA	Caudal (m ³ /s)	Coefficiente de dispersión (m ³ /s)
Mayo	0.04	2.5
Junio	0.2	2.1
Julio	0.5	1.4
Agosto	0.4	1.6
Septiembre	0.8	1.8
Octubre	0.3	2.2
Noviembre	0.1	2.5
Diciembre	0.1	3.9
Enero	0.1	3.0
Febrero	0.05	2.8
Marzo	0.03	3.6
Abril	0.03	1.5

Las condiciones hidrológicas extremas del año hidrológico promedio en esta sección alterada del río indican que los caudales mínimos oscilan entre 0.01 m³/s y 0.04 m³/s, para periodos de un día hasta noventa días (Cuadro 17). El caudal máximo de 1 día es de 25.4 m³/s y de 90 días es de 2.3 m³/s. El índice de caudal base es de 0.02 m³/s, un valor bajo, lo que indica baja disponibilidad de caudal en la época sin lluvias.

Cuadro 17. Parámetros del grupo 2 de IHA (mediana) para la estación hidrométrica 18223.

Parámetros IHA	Valor	Coefficiente de dispersión
Grupo 2		
1-día mínimo (m ³ /s)	0.01	1.9
3-días mínimo (m ³ /s)	0.01	1.8
7-días mínimo (m ³ /s)	0.01	2
30-días mínimo (m ³ /s)	0.02	1.6
90-días mínimo (m ³ /s)	0.04	2.7
1-día máximo (m ³ /s)	25.4	1
3-días máximo (m ³ /s)	15.2	1.2
7-días máximo (m ³ /s)	9.4	1.2
30-días máximo (m ³ /s)	4.0	1.2
90-días máximo (m ³ /s)	2.3	1.2
Número de días cero caudal	0.0	0
Índice caudal base (m ³ /s)	0.02	2.9

Dentro de las condiciones hidrológicas extremas anuales del régimen del caudal, el caudal mínimo anual se presentó el 1 de Mayo (día juliano 122) y el caudal máximo anual se registró históricamente el 11 de agosto (día juliano 224) (Cuadro 17). Esto es típico para las condiciones de la región, donde se tiene un periodo marcado de lluvias y otros sin lluvias.

Los parámetros del grupo 4 de IHA indican una incidencia de 13 pulsos de caudal alto (caudales mayores al percentil 75%, que corresponden en esta estación a caudales mayores a 0.4 m³/s), con una duración de tres días (Cuadro 18). La mediana de pulsos bajos (caudales menores al percentil 50%, que corresponde para la estación a 0.03 m³/s) fue de cuatro, con una duración de cinco días.

El grupo 5, referido a la tasa y frecuencia de los cambios de las condiciones hidrológicas, indica que el número de inversiones (número de veces que el caudal cambia de un periodo de crecimiento a decremento o viceversa) fue de 139 (Cuadro 18). Así mismo, la tasa de crecimiento fue de 0.02 y la de decrecimiento de -0.02. El

número de inversiones obtenido indica una alta variabilidad de los caudales durante el año.

Cuadro 18. Parámetros de los grupos 3, 4 y 5 de IHA (mediana) para la estación hidrométrica 18223.

Parámetros IHA	Valor	Coefficiente de dispersión
Grupo 3		
Fecha de caudal mínimo (día juliano)	122	0.2
Fecha de caudal máximo (día juliano)	224	0.2
Grupo 4		
Conteo pulsos bajos (número de pulsos)	4	2.4
Duración pulsos bajo (días)	4.8	3.1
Conteo pulsos altos (número de pulsos)	13	0.5
Duración pulsos alto (días)	3	0.7
Umbral de pulso bajo (m ³ /s)	0.03	
Umbral de pulso alto (m ³ /s)	0.41	
Grupo 5		
Tasa de subida	0.02	2.1
Tasa de bajada	-0.02	-1.4
Número de inversiones	139	0.6

No se estimaron los valores de rango de variabilidad anual (RVA) para la estación porque en el transecto entre la estación 18193 y 18223 se tiene extracción no aforada de agua para riego y no se tiene registrada la fecha de construcción de las presas derivadoras. De acuerdo con la metodología del IHA, cuando existe un cauce con acumulación de modificaciones humanas y sin registros históricos de referencia inicial se opta por determinar la tendencia.

5.5.3 Parámetros de caudal ecológico (EFC) para al estación 18223

Los caudales bajos mensuales (caudales iguales o menores al percentil 50%) tuvieron una mediana de 0.03 a 0.2 m³/s (Cuadro 19). Sobresalen, por su valores bajos, los meses de marzo, abril y mayo. En estos meses, debido a lo bajo de los caudales,

pueden esperarse efectos sobre los ecosistemas, como una baja disponibilidad de agua para la vida silvestre acuática y riparia, así como condiciones de temperaturas más altas que en el periodo de caudales más altos.

Los caudales bajos mensuales de la parte baja de la cuenca (estación 18223) son menores que los de la parte media-alta (estación 18193). Mientras que la mediana de los valores de caudales bajos registrados en la estación 18193 varían de 1.9 a 2 m³/s, en esta estación fueron menores de 0.2 m³/s. Esto muestra el efecto acumulativo de las extracciones de agua para el riego de cultivos sobre este parámetro de caudal ecológico a lo largo del río.

Cuadro 19. Caudales bajos mensuales para la estación 18223.

Parámetro	Caudal (m ³ /s) (mediana)	Coefficiente de dispersión
Mayo	0.04	1.6
Junio	0.1	1.6
Julio	0.2	1.4
Agosto	0.1	1.4
Septiembre	0.2	0.9
Octubre	0.1	1.6
Noviembre	0.1	2.0
Diciembre	0.1	2.5
Enero	0.1	2.1
Febrero	0.1	1.4
Marzo	0.04	1.7
Abril	0.03	1.1

De los parámetros de caudal ecológico del grupo 2, los picos extremadamente bajos no se presentan (Cuadro 20). Esto contrasta con el resultado para la estación 18193, para la cual si se registraron. La duración de los caudales extremadamente bajos (límite inferior y superior del percentil 10%) tuvo una mediana de 17.5, mucho mayor que la registrada para la estación 18193, que fue de 8 días. Esto se explica porque a medida

que se aleja el río de la cabecera de la cuenca, se tienen mayores extracciones de agua.

Cuadro 20. Caudales extremadamente bajos para la estación 18223.

Parámetros	Medianas	Coefficiente de dispersión
Picos extremos	No se presentan	
Duración (días)	17.5	10.5
Momento (día juliano)	316	0.4

De los parámetros para los caudales ecológicos del grupo tres, los pulsos de caudal alto (caudales con magnitudes entre los percentiles 50% y 75%), se presentaron 12 pulsos, con una duración de 4 días (Cuadro 21). Los pulsos ocurrieron más frecuentemente a mediados del mes de agosto, caso muy similar a lo registrado en la estación 18193. Estos caudales son importantes porque dan forma a condiciones de hábitat, como son los remansos y los rápidos; además de que restauran la calidad del agua del río después de la ocurrencia de caudales bajos prolongados, que en el caso de la parte media-baja de la cuenca del Río Yautepec se registraron caudales extremadamente bajos de 17 días.

Cuadro 21. Pulso de caudal alto para la estación 18223

Parámetros	Medianas	Coefficiente de dispersión
Picos de caudal alto (m ³ /s)	0.6	2.6
Duración (días)	4	0.6
Momento	230.5	0.2
Frecuencia	12.0	0.8
Tasa de crecimiento	3.7	2.3
Tasa de decrecimiento	-6.4	-1.2

El pico mínimo de las pequeñas inundaciones (inundaciones con periodo de retorno de 2 años) fue de 25.4 m³/s y el de las grandes inundaciones (inundaciones con periodo de retorno de 10 años) fue de 77 m³/s (Cuadro 22). Mientras que la ocurrencia de grandes inundaciones es más frecuente en el mes de julio, las pequeñas inundaciones

se registran en el mes de agosto. Las magnitudes del caudal máximo durante el evento son altas tanto para pequeñas inundaciones (36.6 m³/s) como para las grandes inundaciones (80.1 m³/s). La duración de las inundaciones también son importantes, ya que para ambas son mayores de 30 días.

Cuadro 22. Pequeñas y grandes inundaciones para la estación 18223.

Parámetros	Medianas	Coefficiente de dispersión
<i>Grupo 4 Pequeñas inundaciones</i>		
<i>(inundaciones con periodo de retorno de 2 años)</i>		
Pico (m ³ /s)	36.6	0.4
Duración (días)	43.5	0.9
Momento	224	0.2
Tasa de crecimiento	2.4	1.3
Tasa de decrecimiento	-1.3	-1.1
<i>Grupo 5 Grandes inundaciones</i>		
<i>(inundaciones con periodo de retorno de 10 años)</i>		
Pico grandes	80.1	0.1
Duración (días)	32	2.7
Momento	209	0.3
Tasa de crecimiento	3.7	2.3
Tasa de decrecimiento	-6.4	-1.2

5.6 Volumen de agua superficial utilizado por el usuario agrícola

El volumen de agua disponible en el área de estudio es de 110.3 hm (Cuadro 23). En el año 2012 el volumen utilizado con fines agrícolas fue de 105.7 hm³. En el programa hídrico del estado de Morelos 2007 – 2012 se estimó un volumen de agua para fines agrícolas de 76 hm³ (Gobierno del estado de Morelos, 2009). El número de usuarios es de 1978.

Cuadro 23. Volumen ofertado y volumen utilizado por el usuario agrícola.

Estación hidrométrica ^a	Vol. disponible hm ³	Presa ^b	Gasto hm ³	Sup. regable ha	Usuarios	Módulo ^c	Vol. utilizado hm ³	Sup. regable ha	Usuarios
18200	17.9	1ra toma	13.1	612.6	420	Alto Yautepec			
18199	9.5	2da toma	12.6	271.2	107	Alto Yautepec			
18197	21.0	3ra toma	22.7	852.1	443	Alto Yautepec	40	2291	1133
18175	23.0	4ta toma	17.9	1034.3	484	Bajo Yautepec			
18193	38.9	5ta toma	22.7	263.9	127	Bajo Yautepec			
		6ta toma	7.7	201.1	83	Bajo Yautepec			
		7ma toma	9.0	127.0	117.0	Bajo Yautepec	22	1530	798
						Río Cuautla ^d	2	102	47
						REPDA ^e	12		
Total	110.3		105.7	3362.2	1781		76	3923	1978

Fuente: ^a Estaciones Hidrométricas IMTA, 2011; ^b Jefatura del DDR, 2012; ^c CONAGUA, 2010.

^d El módulo Río Cuautla se encuentra fuera de la cuenca pero recibe agua de ella; ^e El Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) registra derechos de propiedad de agua de 12 hm³ que deben estar asignados a particulares.

De acuerdo a las estadísticas del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), el cultivo con mayor superficie sembrada en el área de estudio es la caña de azúcar, el cual ocupa el 87.8% de la superficie de riego (SIAP, 2012). Es de esperarse que si, para cumplir con lo dispuesto en la Ley de Aguas Nacionales, se tomara la decisión de cumplir con los requerimientos de caudales ecológicos del Río Yautepec, a quien se debe quitar agua actualmente concesionada es a los agricultores. Por su importancia en superficie cultivada, quienes serían más afectados son los productores de caña de azúcar. Por la importancia económica del cultivo y por el número de familias campesinas afectadas, debe tomarse en cuenta las consecuencias económicas y sociales de una decisión de este tipo. Debe preverse también la reacción de la población afectada y considerar opciones de políticas compensatorias o regulatorias, según se decida.

5.7 Impacto económico de la disminución de los volúmenes de agua concesionadas para la agricultura para usarse con fines ecológicos

Como resultado de los cuestionarios aplicados a los productores de caña se encontró que la totalidad de los usuarios desconoce la lámina de riego aplicada, aunque el promedio de horas riego aplicadas es de 266.6 horas. El consumo de agua en el ciclo del cultivo de caña es de 33747.3 m³/ha (de acuerdo a datos obtenidos en el Distrito de Riego 16. La tarifa de agua que pagan por hora es de 35 pesos. En promedio pagan por el agua \$9330.00 pesos en un ciclo de cultivo. La cantidad de jornales utilizados es de 58.3, con un costo promedio de \$8219. La producción media es de 120 toneladas de caña y el ingreso promedio por hectárea es de \$80447.9. La Secretaria de Agricultura, a través del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP (2012), indicó que el rendimiento promedio de caña de azúcar reportado en campo en la región de estudio es de 121 ton/ha y el precio por tonelada es de 670, por lo que se considera que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un buen rango de estimación. Se encontró que la tarifa por la que están pagando del agua es mucho menor que el verdadero valor del agua. Sepulveda (2008) estimó que la caña de azúcar tiene una productividad marginal de 3.5 dólares por cada 1000 m³/ha.

Considerando una superficie sembrada de cultivo de caña de azúcar de 2952 ha (el 87.8% de la superficie de cultivos de riego del área de estudio) y una superficie cosechada de 2919.5 ha (en el SIAP se reportó para el 2012 un porcentaje de superficie cosechada del 98.9% para los municipios de Yautepec y Tlaltizapán), con un rendimiento de 120 ton/ha (información de campo), se estima una producción de caña de azúcar de 350,344.74 ton de caña de azúcar en la zona de estudio. Con base en el precio regional de \$670/ton, se estima un ingreso regional por el cultivo de caña de azúcar de \$234,730,973.58.

La función de producción translogarítmica seleccionada para el cultivo de la caña en el área de estudio tuvo la siguiente forma:

$$\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln J + \beta_2 \ln W$$

En donde:

Y = representa el producto de la región producción en toneladas.

J = número de jornales empleados.

W = metros cúbicos de agua empleados.

El ajuste del modelo fue adecuado, ya que se obtuvo una R^2 de 0.85 (Cuadro 24).

Cuadro 24. Estimación de la función producción.

Fuente	Suma de cuadrados	g.l.	MS	Prob>F	R^2	R^2 ajustada	Raíz del cuadrado medio del error
Modelo	0.193972432	2	0.09698622	0.0000	0.8511	0.8418	0.03256
Residuales	0.033925115	32	0.00106016				

	Coefficientes	Error estándar	t	P> t	Intervalo 95% confianza	
ln_y	0.6431888	0.291666	2.21	0.035	0.0490846	1.237293
ln_j	0.835296	0.2359651	3.54	0.001	0.3546508	1.315941
Constante	-5.314894	2.205017	-2.41	0.022	-9.806366	-0.8234223

La función obtenida fue:

$$\ln Y = -5.31 + 0.835296 \ln J + 0.6431888 \ln W$$

La derivada parcial de la producción con respecto al agua, para obtener la elasticidad, fue:

$$\sigma = \frac{\partial \ln Y}{\partial \ln W} = \beta_2 = 0.6431$$

El valor marginal (ρ) del agua en la producción al sustituirse en la ecuación fue:

$$\rho = \sigma \frac{Y}{W} = 0.643 \frac{120 \text{ Ton}}{33747 \text{ m}^3} = 0.0023 \text{ ton/m}^3$$

El precio del agua (PW) de cada metro cúbico se cuantificó en:

$$PW = PY * \rho = \$670/\text{ton} * \frac{0.0023 \text{ ton}}{\text{m}^3} = \$1.541 \text{ por cada m}^3$$

Por lo tanto por cada metro cúbico que se disminuya al usuario agrícola, existirá un impacto económico de \$1.54. Con base en la estimación del caudal ecológico el déficit de volumen resultante es de 65.6 hm³, al tomar el límite medio del rango de variabilidad anual y de 43.2 hm³ si se considera el límite RVA bajo (Cuadro 25).

Cuadro 25. Volumen a reducir en el uso agrícola para fines ecológicos.

Mes	RVA medio	Limite RVA bajo
	Déficit de agua en hm ³	Déficit de agua en hm ³
Mayo	-5.4	-3.3
Junio	-5.2	-3.6
Julio	-5.9	-3.6
Agosto	-5.7	-3.7
Septiembre	-6.0	-3.8
Octubre	-6.0	-4.3
Noviembre	-5.7	-4.1
Diciembre	-5.4	-3.7
Enero	-5.2	-3.4
Febrero	-5.2	-3.3
Marzo	-5.1	-3.4
Abril	-4.9	-3.1
Total	-65.6	-43.2

El impacto económico de la reducción de agua por la implementación del caudal ecológico depende del criterio de asignación del mismo. Con el límite bajo de RVA (esto es, dejando menos agua en el río para uso ecológico) el impacto económico para

los productores de caña de la cuenca es de %66,571,200, disminuyendo el 28.36% del ingreso regional por este cultivo. En cambio, si se asigna una mayor cantidad de agua para uso ecológico, descontada del volumen concesionado a los cañeros, el impacto es de \$101,089,200 (Cuadro 26), reduciendo un 43.07% del ingreso regional por este cultivo.

Cuadro 26. Impacto económico por reducción de agua para el cultivo de la caña.

	Limite RVA medio	Impacto económico	Limite RVA bajo	Impacto económico
Cantidad a reducir en hm ³	65.6	\$101,089,600	43.2	\$66,571,200

6. CONCLUSIONES

Con los objetivos y resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se concluye que:

Los parámetros de indicadores de alteración hidrológica (IHA) obtenidos, tanto para la estación 18193 como para la estación 18223, indicaron que el régimen de caudal del Río Yautepec presenta una gran variación en la magnitud de sus caudales a través del año, con la presencia de un periodo marcado de caudales bajos.

El análisis de rangos de variabilidad (RVA) mensual indicó que los caudales actuales del Río Yautepec han sido notablemente alterados por la extracción de agua para el riego de cultivos (principalmente para el cultivo de caña de azúcar) y el caudal registrado en las estaciones de aforo son mucho menores de los requeridos como caudales ecológicos, tomando como referencia la condición de no extracción de agua (condición de régimen natural) del río.

Para cumplir con el requerimiento de los caudales ecológicos se debe descontar del agua concesionada actualmente a los usuarios agrícolas 43.2 hm^3 , considerando un criterio de un mínimo de caudal ecológico (límite más bajo del RVA). Si se utiliza un criterio del límite medio del RVA (mayor caudal ecológico), se debe descontar 65.6 hm^3 a los usuarios agrícolas.

La producción estimada de caña de azúcar para el área de estudio fue de 350,344.74 ton, con un valor económico de \$234,730,973.58. Si se reduce el agua concesionada para destinarla como caudal ecológico, las pérdidas económicas de los productores de caña de azúcar será de \$66,571,200 para el criterio de límite bajo de RVA, o de \$101,089,600 para el criterio de límite medio de RVA. En el primer caso, se disminuirá el 28.36% del ingreso regional por producción de caña de azúcar. El segundo caso se reducirá el 43.07%.

Se concluye que en la cuenca del Río Yautepec no se dispone de caudales suficientes para cumplir con los requerimientos de caudales ecológicos, de acuerdo con el método de IHA-RVA, y a la vez cumplir con los requerimientos actuales de los usuarios agrícolas. Para asignar los caudales ecológicos mínimos requeridos se tendría que afectar económicamente a los productores agrícolas, principalmente a los productores de caña de azúcar.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aboites A., L. 2009. La decadencia del agua de la nación. Estudio sobre la desigualdad social y cambio político en México, segunda mitad del siglo XX. El Colegio de México. México. 145 p.

Achkar, M., A. Domínguez y F. Pesce. 2004. Diagnóstico socio-ambiental participativo del Uruguay. REDES-AT. Montevideo. 157 p.

Acreman, M. C. and M. J. Dunbar. 2004. Defining environmental river flow requirements a review. *Hydrology and Earth System Science* 8: 861-876

Agenda 21. 1992. Cumbre Mundial Ambiente. Río de Janeiro.
<http://www.aguaenmexico.org/>

Alonso-Eguía L., P.E., M. A. Gómez B., P. Saldaña F. (ed.). 2007. Introducción a los caudales ambientales. En: requerimientos para implementar caudal ambiental en México. IMTA, Alianza WWF/FGRA, PHI/UNESCO, SEMARNAT, WWF. México. 176 p.

AQUASTAT. 2012. Estadísticas de agua. FAO.
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/index.stm>

Ávila, P. 2002. Cambio global y recursos hídricos en México: hidropolítica y conflictos contemporáneos por el agua. Instituto Nacional de Ecología. México. 107 p.

ARMCANZ y ANZECC. 1996. National principles for the provision of water for ecosystems. Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. New Zealand Environment and Conservation Council. 14 p.

Azqueta O., D. 2002. Introducción a la economía ambiental. McGraw-Hill. Madrid. 448 p.

Baeza, S. D. y D. J. García. 2003. Avances y aspectos no resueltos en la estimación de regímenes de caudales ecológicos. E.T.S.I, Montes. España. 12 p.

Baeza, S.D. y M. P. Vizcaino. 2008. Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía. Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. *Ecosistemas* 17(1): 24-36.

Balairón, P. L. 2002. Gestión de recursos hídricos. 2a. ed. UPC, Barcelona. España. 490 p.

Banco Mundial. 1993. Water resources management. World Bank Policy Paper. World Bank. Washington, D. C. 140 p.

Berbel, J. y J. A. Gómez-Limón. 2005. Estudio económico del uso del agua. En: De la Orden G., J.A; A. Pérez Z. y J.A. López G. (eds.). El análisis económico en la Directiva Marco del Agua: incidencias e implicaciones para España. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. pp. 239-262.

Bishop, J. T. (ed.). 1999. Valuing forests: a review of methods and applications in developing countries. International Institute for Environment and Development: London. 48 p.

Bovee, K. D., B. L. Lamb, J. M. Bartholow, C. B. Stalnaker, J. Taylor and J. Henriksen. 1998. Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report USGS/BRD-1998-0004. Fort Collins, CO, U.S. 131 p.

Brown, C., C. Pemberton, A. Birkhead, A. Bok, C. Boucher, E. Dollar, W. Harding, W. Kamish, J. King, B. Paxton and S. Ratcliffe. 2006. In support of water-

resource planning – highlighting key management issues using DRIFT: a case study. *Water SA* 32(2): 181-191.

Bunn, S. E. and A. H. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30: 492–507.

Bustamante G., A. 2006. La gestión del agua en cuencas. En: Ocampo, F. I, C. J. F Escobedo y V.B. Ramírez (ed). *El agua un recurso en crisis*. Colegio de Postgraduados y Fundación Produce Puebla, A. C., Puebla, México. pp. 149 – 156.

Caballer, V. y N. Guadalajara. 1998. Valoración económica del agua de riego. *Mundi-Prensa, Madrid*. 75 p.

Cachón, D. J. 2002. Regímenes de caudales con fines ambientales. Herramienta básica en la gestión y mejora del medio ambiente. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Ministerio de Fomento. Madrid, España. 323 p

Canizales P., R. y H. M. Bravo P. 2011. Estudio sobre valoración económica y financiera del agua para el uso industrial del organismo de cuenca Lerma Santiago Pacífico. Comisión Nacional del Agua. México. 82 p.

Carabias, J. y R. Landa. 2005. Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México. El Colegio de México, UNAM, Fundación Gonzalo Río Arronte, IAP. México. 219 p.

Christensen, L. R., D. W. Jorgenson, and L. J. Lau. 1973. Transcendental logarithmic production frontiers. *Review of Economics and Statistics* 55: 28-45.

CIAMA. 1992. Declaración de Dublín sobre el agua y el desarrollo sostenible. 1992. Conferencia Internacional sobre el agua y el medio ambiente. Dublín, Irlanda.

Committee on Assessing and Valuing the the Services of Aquatic and Related Terrestrial Ecosystems. 2005. Valuing ecosystem services: toward better environmental decision making. The National Academies Press. Washington, D. C. 277 p.

CONABIO. 1998. Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

CONAFOR. 2007. Manual de obras de conservación de suelos. 3a. ed. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, México. 297 p.

CONAGUA. 2011. Estadísticas del agua en México, edición 2011. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Comisión Nacional del Agua. México. 131 p.

Davis, R. y R. Hirji (ed). 2003. Water Resources and environment. Technical Note C.1, Environmental flows: Concepts and Methods. The World Bank. Washington, D.C. 28 p.

DOF. 2004. Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación del 29 de abril del 2004.

DOF. 2013. Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de las aguas superficiales en las cuencas hidrológicas. Diario Oficial de la Federación del 28 de agosto del 2013.

DOF. 2012. Aviso de consulta pública del proyecto de Norma Mexicana PROY-NMX-AA-159-SCFI-2011. Diario Oficial de la Federación del 20 de septiembre del 2012.

Dourojeanni, A., A. Jouravlev y G. Chávez. 2002. Gestión del agua a nivel de cuencas: teoría y práctica. Naciones Unidas, CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Santiago de Chile, Chile. 83 p.

Dyson, M., G. Bergkamp , y J. Scanlon (ed). 2003. Caudal. Elementos esenciales de los caudales ambientales. UICN-ORMA. San José, C.R. 125 p.

Gobierno del estado de Morelos. 2009. Programa hídrico del estado de Morelos 2007-2012. Morelos, México. 42 p.

FAO. 2000. Informe del taller internacional sobre manejo de cuencas en zonas de montaña. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. República Dominicana. 12 p.

Field, B. and M. Field. 1997. Environmental economics: an introduction. 3rd edition. McGraw-Hill. New York, U.S. 490 p.

Field, B. y M. Field. 2003. Economía ambiental. 3a. ed. McGraw – Hill Interamericana, España. pp. 576.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema climático de Kööpen para la República Mexicana. 5a. ed. Instituto de Geografía. UNAM, México. 90 p.

Garrido C., A., E. Palacios V., J. Calatrava L., J. Chavez M., y A. Exebio G. 2004. La importancia del valor, costo y precio de los recursos hídricos en su gestión. Proyecto Regional de Cooperación Técnica para la Formación de Economía y Políticas Agrarias y de Desarrollo Rural en América Latina. 49 p.

Gomez B., M., P. Saldaña F., E. Gutiérrez L., C. Lecanda T., J. Izurieta D., y R. Huerto D. 2007. Water allocation to set environmental flows in México. Proceeding of 10

International River Symposium and Environmental Flow Conference. Brisbane, Australia.

Growns, I. O. 1998. Methods addressing the flow requirements of aquatic invertebrates. In: Arthington A. H. and J. M. Zalucki (ed). Comparative evaluation of environmental flow assessment techniques: review of methods. LWRDC Occasional Paper 27/98. Canberra, Australian. pp. 115-140.

GWP. 2000. Manejo integrado de recursos hídricos. Global Water Partnership. Estocolmo, Suecia. 80 p.

GWP. 2009. Manual para la gestión integrada de recursos hídricos en cuencas. Estocolmo, Suecia. 111 p.

Haftendorn, H. 2000. Water and international conflict. Third World Quarterly 21(1): 51-68.

IGME. 2008. Guía metodológica para la determinación de los caudales ambientales. Capítulo de aguas subterráneas. Tomo I: métodos de estimación de las aportaciones subterráneas a los caudales ambientales. Instituto Geológico y Minero de España, Ministerio de Ciencia e Innovación. España. 101 p.

IMTA. 2011. BANDAS, Banco Nacional de Datos Hidrométricos; datos hidrométricos hasta 2006. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México.

INEGI. 2008. Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1:250 000 (Continuo Nacional). México.

INEGI. 2010. Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación serie IV, escala 1:250 000. México

King, J., C. Brown, and H. Sabet. 2003. A scenario-based holistic approach to environmental flow assessments for rivers. *River Research and Applications* 19: 619-639.

Ley de Aguas Nacionales. 2004. Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*, 29 de abril de 2004.

Lytle, D. A. and Poff, N.L. 2004. Adaptation to natural flow regimes. *Trends in Ecology and Evolution* 19: 94-100.

Martin C., F.J., L. Garrote D.M. y L. Mediero O. 2007. Gestión de conflictos de compatibilidad de usos en embalses multipropósito. *Ingeniería hidráulica en México* 22(1): 81-90.

MAVDT. 2008. Metodología para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados. Universidad Nacional de Colombia - Grupo GIREH. Bogotá, Colombia. 135 p.

Molden D., H. Murray-Rust, R. Sakthivadivel, and I. Makin. 2003. A water-productivity framework for understanding and action. In: Kijne J. W., R. Barker, and D. Molden (ed). *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvements*. CABI Publishing. Cambridge, MA, USA. pp. 1-18.

Poff, N.L., J. D. Allan, M.B. Bain, J.R. Karr, K. L. Prestegard, B. D. Richter, R.E. Sparks, and J.C. Stromberg. 1997. The natural flows regime. *BioScience* 47(11): 769-784.

REPDA. 2012. Títulos y permisos de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. Aguas superficiales río Yautepec. Registro público de derechos de agua.

En línea: <http://www.conagua.gob.mx/Repda.aspx?n1=5&n2=37&n3=115>.

Revenga, C. 2006. ¿Por qué deben preocuparnos los ecosistemas de agua dulce y su biodiversidad?. Agua el desafío del siglo XXI. Vanguardia dossier 21: 80 - 90.

Richter, B. D., J. V. Baumgartner, J. Powell, and D. P. Braun. 1996. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology* 10(4): 1163-1174.

Richter, B. D., J. V. Baumgartner, R. Wiginton, and D. P. Braun. 1997. How much water does a river need?. *Freshwater Biology* 37: 231 - 249.

Richter, B. D., J. V. Baumgartner, D. P. Braun, and J. Powell. 1998. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regulated Rivers: Research and Management* 14: 329 - 340.

Robinson, J. y J. Eatwell. 1992. Introducción a la economía moderna. Fondo de Cultura Económica. México. pp. 52 – 56.

Rockstrom, J. y L. Gordon. 2000. Assessment of green water flows to sustain major biomes of the world: implications for future ecohydrological landscape management. *Phys. Chem. Earth (B)* 26(11): 843 - 851

Rodríguez, C. 2007. Determinación de una metodología para estimar el caudal de compensación en los ríos de Costa Rica con base en dos estudios de caso. Taller internacional de compensación (ambiental) en sistemas regulados por proyectos hidroeléctricos. San José, Costa Rica.

Romo L., J. L. 1990. Estudio sobre asignación óptima de recursos en los viveros forestales del estado de México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo.

73 p.

Samuelson, P. A. y W. D. Nordhaus. 2002. Economía. McGraw-Hill, Madrid. 753 p.

Santacruz D.L., G. y M. Aguilar R. 2009. Estimación de los caudales ecológicos en el Río Valles con el método Tennant. *Hidrobiologica* 19(1): 25-32.

SEMARNAT. 2010. Manejo integrado de cuencas. Subdelegación de planeación <http://www.semarnat.gob.mx//temas/Paginas/ManejoIntegradodeCuencas.aspx>.

SIAP. 2012. Estadística básica. Cultivos agrícolas. Anuario. Resumen estatal Morelos. <http://www.siap.gob.mx/> (enero del 2013).

SIATL. 2012. Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas, versión 2.1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México.

Tennant, D.L. 1976. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1(4): 359 – 375.

Tharme, R. E. 1996. Review of international methodologies for the quantification of the instream flow requirements of rivers. Water law review final report for policy development for the Department of Water Affairs and Forestry (draft report). Freshwater Research Unit, Zoology Department, University of Cape Town. Pretoria, South Africa. 116 p.

Tharme, R. E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. *River Research and Applications* 19: 397–441.

The Nature Conservancy. 2011. Manual del usuario de Indicadores de Alteración Hidrológica, Versión 7.1. 84 p.

Wang, H. y S. Lall. 1995. Valuing water for Chinese industries: a marginal productivity assessment. The World Bank. Washington, D. C. 23 p.

Young, R. 1996. Measuring economic benefits for water investment and policies. World Bank technical paper no. 338. The World Bank. Washington, D. C. 118 p.

Young, R. A. 2005. Determining the economic value of water: concepts and methods. Washington, D.C: Resources for the Future. Washington, D. C. 357 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Cauce del Río Yautepec en diversos puntos de su recorrido



Vista del cauce del Río Yautepec en la localidad de Oaxtepec, municipio de Yautepec



Vista del cauce del Río Yautepec en la localidad de Pantitlán, municipio de Yautepec



Vista del cauce del Río Yautepec en la localidad de Itzamatitlan, municipio de Yautepec



Vista del cauce del Río Yautepec en la localidad de Yautepec, municipio de Yautepec



Vista del cauce del Río Yutepec en la Col. El Rocío, municipio de Yautepec



Vista del cauce del Río Yautepec en la loc. Ticumán, municipio de Tlaltizapán

Anexo 2. Presas derivadoras



Vista de la presa 1a Toma Río Yautepec.

Ubicación: Col. Del Bosque, municipio de Yautepec

Coordenadas: latitud 18° 54' 09.45" longitud 98° 57' 39.24"



Vista de la presa 4a Toma Río Yautepec.

Ubicación: localidad Itzamatitlán. Municipio: Yautepec

Coordenadas: latitud 18° 54' 31.48", longitud 99° 01' 44.78"



Vista de la presa 5a Toma Río Yautepec.

Ubicación: localidad: Yautepec, municipio de Yautepec

Coordenadas: latitud 18° 52' 26.74", longitud 99° 04' 1.11"



Vista de la presa 6a Toma Río Yautepec.

Ubicación: Col. El Rocío, municipio de Yautepec

Coordenadas: latitud 18° 51' 21.70', longitud 99° 04' 35.92"



Vista de la presa 9a Toma Río Yautepec.

Ubicación: loc. Ticumán. municipio de Tlaltizapán

Coordenadas: latitud 18° 45' 58.58", longitud 99° 06' 48.96"



Vista de la presa Las Estacas No. 2.

Ubicación: Campo Arquillo, ejido Bonifacio García, municipio de Tlaltizapán

Coordenadas: latitud 18° 43' 28.03", longitud 99° 06' 45.17"

Anexo 3. Características de las presas y módulos que las administra

Distrito de Riego 016 "estado de Morelos"

Inventario de presas derivadoras

Módulo: "Campos Unidos A.C."

Alto Yautepec

Características	Nombre de la presa derivadora		
	Toma 1	Toma 2	Toma 3
Corriente	Rio Yautepec	Rio Yautepec	Rio Yautepec
Corriente			
Escurrimiento medio anual	1.250 m ³ /s	1.250 m ³ /s	1.250 m ³ /s
Gasto máximo registrado	51 m ³ /s	51 m ³ /s	185 m ³ /s
Presa			
Tipo	Derivadora	Derivadora	Derivadora
Altura	3.18 m	2.77 m.	2.77 m.
Longitud de cortina	30.50 m	26.00 m.	70.00 m
Materiales	Mampostería	Mampostería	Mampostería
Obra de toma			
Tipo	Guillotina	Guillotina	Guillotina
Carga máxima	2.20 m	2.20 m	2.30 m
Gasto máximo	0.620 m ³ /s	0.600 m ³ /s	1.083 m ³ /s
Superficie regable	612.6 ha	271.2 ha	852.1 ha
Nombre del canal	1a. Toma río Yautepec	2a. Toma río Yautepec	3a. Toma río Yautepec
Longitud	4.680 km	3.434 km	5.499 km
Número de usuarios	420	107	443

Módulo: "Emperador Moctezuma A.C."

Bajo Yautepec

Características	Nombre de la presa derivadora			
	Toma 4	Toma 5	Toma 6	Toma 7
Corriente	Rio Yautepec	Rio Yautepec	Rio Yautepec	Rio Yautepec
Corriente		220 m ³ /s	220 m ³ /s	220 m ³ /s
Escurrimiento medio anual	1.250 m ³ /s	1.250 m ³ /s	1.250 m ³ /s	1.250 m ³ /s
Gasto máximo registrado	187 m ³ /s	220 m ³ /s	220 m ³ /s	220 m ³ /s
Presa				
Tipo	Derivadora	Derivadora	Derivadora	Gravedad
Altura	1.50 m	2.77 m.	2.77 m.	1.20 m.
Longitud de cortina	57.00 m	26.00 m	70.00 m	60.00 m
Materiales	Mampostería	Mampostería	Mampostería	Mampostería
Obra de toma				
Tipo	Guillotina	Guillotina1 Guillotina2	Libre	Libre
Carga máxima	2.60 m	2.25 m 2.55 m.		
Gasto máximo	0.865 m ³ /s	0.664 m ³ /s 0.429m ³ /s	0.372 m ³ /s	0.433 m ³ /s
Superficie regable	1,034.3 ha.	117 ha 146.9 ha	201.1 ha.	127.7 ha.
	4a. Toma. Río		6a. Toma. Río	7a. Toma. Río
Nombre del canal	Yautepec	5a. Toma. Río Yautepec	Yautepec	Yautepec
Longitud	4.148 km	3.011 km	3.702 km	2.725 km
Número de usuarios	484	127	83	117

Anexo 4. Cultivo de la caña de azúcar, producción, rendimiento

Ciclo: cíclicos y perennes							
Modalidad: riego							
Cultivo: caña de azúcar							
Municipio	Año	Sup. sembrada (ha)	Sup. cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)	PMR (\$/ton)	Valor producción (miles de pesos)
Jojutla	2009	1934.30	1700.00	204000.00	120.00	415.00	84660.00
	2010	1874.30	1747.00	207543.60	118.80	750.00	155657.70
	2011	2296.30	1800.00	212400.00	118.00	650.00	138060.00
Tlaltizapán	2009	2351.20	2214.00	261252.00	118.00	415.00	108419.58
	2010	2251.20	2178.00	261360.00	120.00	750.00	196020.00
	2011	3134.00	2800.00	330400.00	118.00	650.00	214760.00
Tlaquiltenango	2009	1764.10	1230.00	147600.00	120.00	415.00	61254.00
	2010	1764.10	1318.00	155524.00	118.00	750.00	116643.00
	2011	2085.90	1750.00	204750.00	117.00	650.00	133087.50
Yautepec	2009	1583.00	1480.00	183520.00	124.00	415.00	76160.80
	2010	1510.00	1445.00	173400.00	120.00	750.00	130050.00
	2011	1510.00	1480.00	174640.00	118.00	650.00	113516.00

Fuente: SIAP, 2012.