

MODELO DE ASIGNACIÓN DE AGUA CONSIDERANDO UN CAUDAL AMBIENTAL MÍNIMO EN LA CUENCA DEL RÍO METZTITLÁN EN HIDALGO, MÉXICO

WATER ALLOCATION MODEL CONSIDERING A MINIMUM ENVIRONMENTAL FLOW IN THE METZTITLÁN RIVER BASIN IN HIDALGO, MÉXICO

Ruperto Ortiz-Gómez^{1*}, Juan M. González-Camacho², Jesús Chávez-Morales³

¹Unidad Académica de Ingeniería. Universidad Autónoma de Zacatecas. 98000. Zacatecas, Zacatecas. México. (ortizgr@uaz.edu.mx). ²Socioeconomía, Estadística e Informática.

³Hidrociencia. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (jmgc@colpos.mx), (chavezje@colpos.mx).

RESUMEN

La asignación óptima del agua en una cuenca es esencial para mejorar el aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos. Al respecto, el análisis de sistemas es la herramienta principal para la asignación del agua, aunque por lo general dicho análisis no considera la demanda del medioambiente. Por ello, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo de optimización lineal para evaluar diferentes escenarios de asignación mensual de aguas superficiales en la cuenca del río Metztitlán en Hidalgo, México, considerando la reserva de caudales ambientales mínimos. Los escenarios de asignación de agua consideran los derechos de agua de cada uso en la cuenca, dos reglas de asignación y tres niveles de confiabilidad (50, 70 y 90 %) de los escurrimientos superficiales. Para los escenarios analizados, se constató que sólo los usos público urbano y pecuario cubren totalmente sus requerimientos hídricos; mientras que los usos agrícola, ambiental, industrial y múltiple presentaron diferentes déficits mensuales y anuales para las dos reglas de asignación utilizadas. En condiciones normales de disponibilidad de agua, los escurrimientos en la cuenca son insuficientes para cubrir la demanda de agua cuando se reserva un caudal ambiental mínimo. El déficit anual máximo del uso ambiental ocurre en la parte baja de la cuenca; éste varía de 31 a 33 % para un escenario de sequía ligera y de 62 a 66 % para un escenario de sequía severa.

Palabras clave: Caudal ambiental, curva de duración de caudales, derechos de agua, método de Tennant, sequía.

ABSTRACT

Optimal water allocation in a basin is essential to improve sustainable use of water resources. In this respect, systems analysis is the principal tool used in water allocation, although generally, this analysis does not consider environmental demand. Therefore, the objective of this research was to develop a model of linear optimization to evaluate different monthly surface water allocation scenarios in the Metztitlán River Basin in Hidalgo, Mexico, considering the reserve of minimum environmental flows. The water allocation scenarios take into account the water rights of each use in the basin, two allocation rules and three confidence levels (50, 70 and 90 %) of surface runoff. For the analyzed scenarios, it was confirmed that the requirements of only the public urban and livestock sectors are totally met, while agricultural, environmental, industrial and other multiple uses have different monthly and yearly deficits for the two allocation rules used. In normal conditions of water availability, runoffs in the basin are insufficient to cover the demand even when a minimum environmental flow is reserved. The highest annual deficit for environmental use occurs in the lower part of the basin, varying from 31 to 33 % for a scenario of light drought and 62 to 66 % for a scenario of severe drought.

Key words: Environmental flow, flow duration curve, water rights, Tennant method, drought.

INTRODUCTION

In recent decades, competition for water resources among the different economic sectors is acute due to population growth and their water demands. This has caused water shortages and environmental degradation by pollution of sources

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: marzo, 2015. Aprobado: junio, 2015.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 49: 703-721. 2015.

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes, la competencia por los recursos hídricos entre los diferentes sectores económicos es aguda debido al aumento de la población y sus demandas de agua. Esto originó desabasto de agua y deterioro ambiental por la contaminación de las fuentes de abastecimiento y sobreexplotación de los recursos hídricos. Los usos urbano, industrial, agrícola e hidroeléctrico compiten por volúmenes suficientes de agua de buena calidad. Los proyectos de aprovechamiento de los recursos hídricos no consideran el ambiente, ni los efectos negativos sobre éste (Matondo, 2001). Esto genera un problema adicional en la planeación y manejo del agua, y acentúa los conflictos entre los usuarios del agua local y regional. Para reducir estos conflictos es esencial tomar en cuenta la equidad, eficiencia y sustentabilidad en la gestión del recurso hídrico (Wang *et al.*, 2008).

La asignación del agua en una cuenca puede realizarse mediante modelos de optimización o simulación desde varias perspectivas que incluyen aspectos legales, económicos y derechos de agua (Salman *et al.*, 2001; Doppler *et al.*, 2002; Devi *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2011), y además, la asignación de caudales ambientales (Draper *et al.*, 2003; Shiau y Wu, 2010). En un sistema de agua multisectorial, la incorporación del ambiente como un uso más, a través de caudales ambientales, implica la reasignación equitativa de los recursos hídricos entre los diferentes usos, para una distribución eficaz del agua entre la sociedad y los ecosistemas (Wallace *et al.*, 2003). En este estudio, el término de asignación de agua se refiere al procedimiento mediante el cual los recursos hídricos disponibles se distribuyen entre los diferentes usos del agua.

Poco más de 200 métodos se han propuesto para estimar caudales ambientales mínimos o cuantificar los regímenes de caudales para preservar los ecosistemas fluviales (Tharme, 2003; Shiau y Wu, 2009). Entre ellos, los métodos de Tennant, Tessmann, el enfoque de variabilidad del rango, indicadores de alteración hidrológica, estadísticos de frecuencia de caudales mínimos, de simulación de hábitat físico, método incremental para el cálculo del caudal, método de bloques de construcción, y límites ecológicos de alteración hidrológica (Tharme, 2003; Caissie *et al.*, 2014; Pastor *et al.*, 2014). Los métodos para estimar caudales ambientales mínimos se agrupan en cuatro categorías: hidrológicas, hidráulicas, simulación de hábitat y holísticas (Arthington *et al.*, 2003;

of supply and overexploitation of water resources. Urban, industrial, agricultural and hydroelectric uses compete to have sufficient volumes of good quality water. Water use projects do not consider the negative effects they may have on the environment (Matondo, 2001). This situation involves an additional problem for planning and management of water use and accentuates the conflicts among water users on a local and regional. To reduce these conflicts, it is essential to take into account equity, efficiency and sustainability in administration of water resources (Wang *et al.*, 2008).

Water allocation in a basin can be carry out using optimization or simulation models from several perspectives that include legal, economic and water rights aspects (Salman *et al.*, 2001; Doppler *et al.*, 2002; Devi *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2011), as well as allocation of environmental flows (Draper *et al.*, 2003; Shiau and Wu, 2010). In a multisectorial water system, incorporating the environment, as one more use, in the form of environmental flows, involves equitable re-allocation of water resources among the different uses for effective distribution of water among society and ecosystems (Wallace *et al.*, 2003). In this study, the term water allocation refers to the procedure through which available water resources are distributed among different water uses.

Slightly above 200 methods have been proposed to estimate minimum flows or to quantify flow regimes to preserve river ecosystems (Tharme, 2003; Shiau and Wu, 2009). Among these are the Tennant method, the Tessmann method, the range of variability approach, indicators of hydrological alteration, statistical low-flow frequency methods, physical habitat simulation, instream flow incremental methodologies, building block model, and ecological limits of hydrological alteration (Tharme, 2003; Caissie *et al.*, 2014; Pastor *et al.*, 2014). The methods for estimating minimum environmental flows are grouped into four categories: hydrological, hydraulic, habitat simulation and holistic (Arthington *et al.*, 2003; Brown and King, 2003). Of these, the hydrological methods are the simplest because they are based on historical records of daily and monthly runoff. Mazvimavi *et al.* (2007) state that estimations of environmental flows with a hydrological approach are suitable for water resources planning on the basin scale.

Therefore, the objective of this study was to develop a model of linear optimization to evaluate

Brown y King, 2003). De éstos, los métodos hidrológicos son los más sencillos porque se basan en registros históricos de escurrimientos diarios o mensuales. Mazvimavi *et al.* (2007) señalan que las estimaciones de los caudales ambientales con un enfoque hidrológico son adecuadas para una planificación de los recursos hídricos a escala de cuenca.

Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo de optimización lineal para evaluar escenarios diferentes de asignación mensual del agua superficial en la cuenca del río Metztlán en Hidalgo, México y maximizar la dotación mensual de agua a cada uso del agua bajo la restricción de un caudal ambiental mínimo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica y datos del área de estudio

La cuenca del río Metztlán se localiza en el estado de Hidalgo, México, en el centro del Altiplano Mexicano, con un área aproximada de 2920 km² hasta la desembocadura con el río Amajac y pertenece a la cuenca alta del río Pánuco (Región Hidrológica 26) (Figura 1). Las altitudes varían de 3100 m en la Sierra de Singuilucan a 1250 m en la Laguna de Metztlán. De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen, la cuenca tiene un clima templado subhúmedo (Cb(w₂)(w)) en la parte sur, y un clima semiseco templado (BS₁ kw(w)) en el centro y norte (García, 2004). La precipitación media anual en la cuenca es 690 mm, con precipitaciones menores a 400 mm en el norte y mayores a 1500 mm en el noreste. La precipitación se concentra de mayo a octubre (84 %); y la mayor es en septiembre (Ortiz, 2007). Los principales usos del suelo en la cuenca del río Metztlán son la agricultura de temporal y de riego, con 36.7 y 11.3 % del total de la superficie, respectivamente. Las principales coberturas vegetales en la cuenca son: bosques, vegetación secundaria y pastizales, 17.7, 13.9 y 10.6 %, respectivamente (Figura 2) según INEGI (2012). La infraestructura hidráulica principal se compone de la presa de almacenamiento La Esperanza que suministra agua al distrito de riego (DR) 028 Tulancingo y cinco presas derivadoras a lo largo del río Metztlán que abastecen el DR 008 Metztlán.

Los escurrimientos superficiales en la cuenca se estimaron con los registros hidrométricos históricos de las estaciones Venados (26042) de 1937-2005 y El Álamo (26282) de 1960-2005, obtenidos del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) (IMTA, 2006). Los registros históricos de los volúmenes de aguas superficiales concesionados en la cuenca se obtuvieron del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) publicados por CONAGUA (2006a)

different scenarios of monthly allocation of surface water in the Metztlán River Basin in Hidalgo, Mexico, and to maximize monthly water allocation to each water use under the restriction of a minimum environmental flow.

MATERIALS AND METHODS

Geographic location and data of the study area

The Metztlán River Basin is located in the state of Hidalgo on the Mexican central high plateau. It has an area of approximately 2920 km² up to where it joins the Amajac River and belongs to the upper Pánuco River Basin (Hydrological Region 26) (Figure 1). Altitudes vary from 3100 m, in the Sierra de Singuilucan, to 1250 m, in the Laguna de Metztlán. According to the Köppen climate classification system, the basin has a subhumid temperate climate (Cb(w₂)(w)) in the southern part and semiarid temperate climate (BS₁kw(w)) in the central and northern part (García, 2004). Mean annual rainfall in the basin is 690 mm, with rainfall below 400 mm in the north and above 1500 mm in the northeast. Precipitation (84 %) is concentrated in the months from May to October; September has the highest rainfall (Ortiz, 2007). The main land use in the Metztlán River Basin are rainfed and irrigated agriculture, 36.7 and 11.3 % of the total area, respectively. The main vegetation cover in the basin are forest, secondary vegetation and grasslands, 17.7, 13.9 and 10.6 %, respectively (Figure 2), according to INEGI (2012). The main hydraulic infrastructure comprises the La Esperanza reservoir that supplies water to irrigation district DR 028 Tulancingo and five diversion dams located along the Metztlán River that supply DR 008 Metztlán.

Surface runoff in the basin was estimated from historical hydrometric records of the Venados station (26042) with records from 1937 to 2005 and El Álamo (26282), with records from 1960 to 2005, obtained from the National Bank of Surface Waters (BANDAS, for its acronym in Spanish) (IMTA, 2006). The historical records of surface water volumes concessioned in the basin were obtained from the Public Register of Water Rights (REPDa, for its acronym in Spanish) published by CONAGUA (2006a) and the historical registers of water volumes used in the irrigation districts were provided by the management of irrigation districts DR 008 and DR 028 (CONAGUA, 2005; CONAGUA, 2006b). The Venados station is located upstream from DR 008 and measures the water drained from two thirds of the basin (1962 km²). This station records the behavior of the middle and upper parts of the basin, where most of the farming area and the most important city, Tulancingo, are found, and where the population is about 120 000 inhabitants.

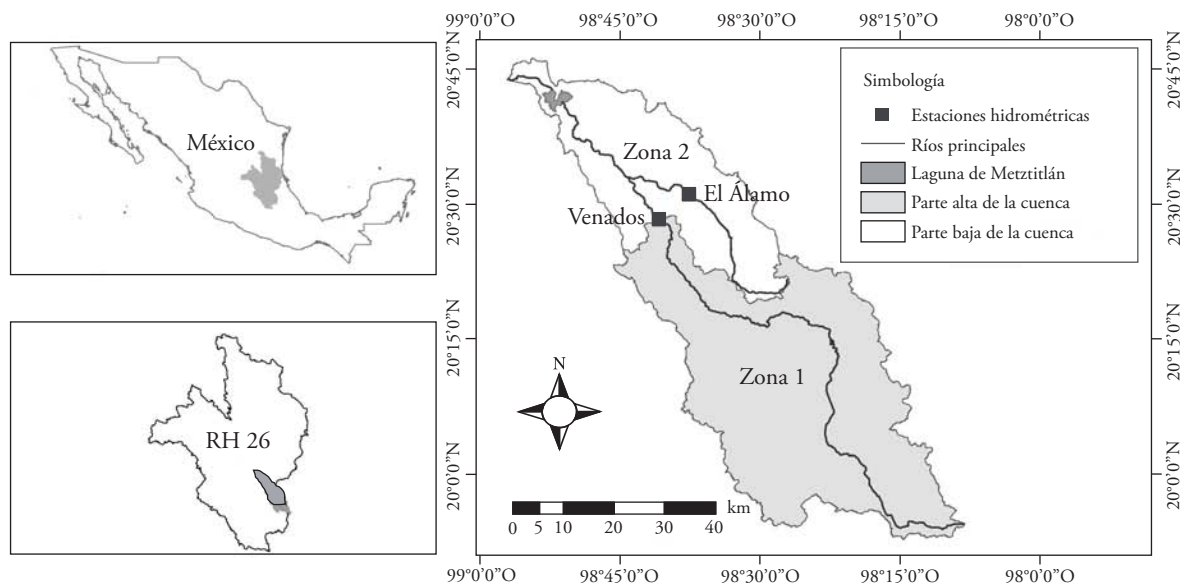


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México.

Figure 1. Geographic location of the Metztitlán River Basin, Hidalgo, Mexico.

y los registros históricos de volúmenes de agua utilizados en los distritos de riego fueron proporcionados por la gerencia de los distritos de riego DR 008 y DR 028 (CONAGUA, 2005; CONAGUA, 2006b). La estación Venados se localiza aguas arriba del DR 008 y mide el agua que drena dos terceras partes de la cuenca (1964 km²). Esta estación registra el comportamiento de las partes media y alta de la cuenca, donde se encuentra la mayoría de las zonas agrícolas y la ciudad más importante, Tulancingo, con unos 120 000 habitantes.

Análisis temporal de los escurrimientos superficiales

Un análisis temporal de los escurrimientos superficiales fue realizado para determinar la frecuencia y duración de los periodos de sequía en la región con base en la clasificación de severidad de sequías del Servicio Geológico de EE.UU. (USGS, sus siglas en inglés) (Cuadro 1). Este análisis se aplicó a los escurrimientos anuales de la estación Venados. Los percentiles se definieron mediante un análisis de frecuencias, con un ajuste de las funciones de distribución de probabilidades (fdp's) Normal, Log Normal y Gamma de 2 y 3 parámetros, Gumbel y General de Valores Extremos. La fdp de mejor ajuste se seleccionó con base en las pruebas de bondad de ajuste Ji cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y el error estándar (Kite, 1988).

Disponibilidad mensual de agua en periodos de sequía

El modelo de asignación propuesto requiere como datos de entrada la disponibilidad mensual de agua en la cuenca para cada escenario estudiado, y esta disponibilidad se determinó mediante un análisis frecuencial en las estaciones 26042 y 26282. Los

Temporal analysis of surface runoff

A temporal analysis of surface runoff was performed to determine the frequency and duration of drought periods that have occurred in the region, based on the US Geological Service (USGS) classification of drought severity (Table 1). This analysis was applied to annual runoff recorded in the Venados hydrometric station. To estimate the percentiles, a frequency analysis was performed on the series of annual runoff, fitting the probability distribution functions (pdf) Normal, two- and three-parameter Log Normal and Gamma, Gumbel, and General of Extreme Values. The selection of the best fitting pdf was based on goodness of fit, Chi-square and Kolmogorov-Smirnov tests, as well as standard error (Kite, 1988).

Monthly availability of water in periods of drought

The allocation model proposed requires monthly water availability in the basin as entry data for each of the scenarios studied. Availability was determined by a frequency analysis (stations 26043 and 26282), calculating monthly flows for the percentiles 50, 30 and 10 %, which represent normal, abnormally dry and severe drought conditions of water availability, respectively.

Reference environmental flow volumes

Reference environmental flows were determined by joint use of two hydrological methods, the Tennant method and the flow duration curve, considering the following. 1) Dry

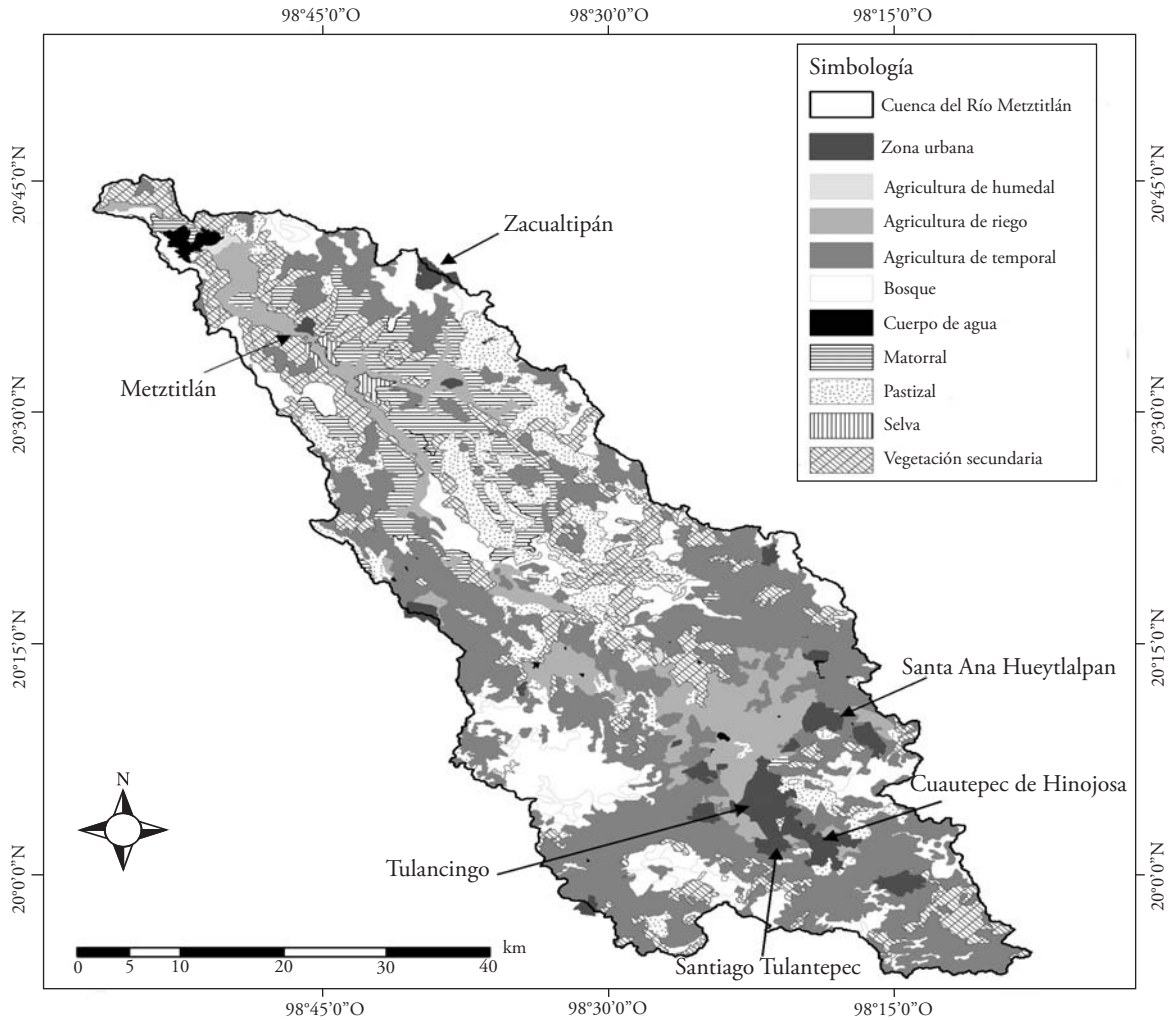


Figura 2. Uso de suelo en la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México.
Figure 2. Land use in the Metztitlán River Basin, Hidalgo, Mexico.

caudales mensuales se calcularon para los percentiles 50, 30 y 10 %, que representan condiciones de disponibilidad de agua normales, anormalmente secas y de sequía severa, respectivamente.

Caudales ambientales de referencia

Los caudales ambientales de referencia se determinaron con el uso conjunto de dos métodos hidrológicos: el método de Tennant y la curva de duración de caudales, considerando lo siguiente: 1) Las épocas de estiaje y lluvias propuestas por Tennant (1976) se ajustaron a las condiciones particulares de la cuenca del río Metztitlán; época de estiaje, de diciembre a mayo; época de lluvias, de junio a noviembre. 2) Los caudales ambientales se estimaron a nivel mensual, como un porcentaje de los caudales medios mensuales, para hacerlos coincidir con la variación natural de los caudales

and rainy seasons proposed by Tennant (1976) were adjusted to the particular conditions of the Metztitlán River Basin, the dry season from December to May and the rainy season from June to November. 2) Environmental flows were estimated each month as the percentage of mean monthly flows to match them with the natural variations of monthly flows during the year. 3) The minimum environmental flow (MEF) is 10 % of the mean monthly flow or the flow with a probability of exceedance equal to or greater than 90 %. 4) The acceptable environmental flow (AEF) is 10 % of the mean monthly flow in the dry season and 30 % in the rainy season or the flow with a probability of exceedance equal to or greater than 80 %. 5) Good environmental flow (GEF) is 20 % of the monthly flow in the dry season and 40 % in the rainy season or a flow with a probability of exceedance equal to or greater than 70 %.

Cuadro 1. Clasificación de severidad de las sequías del Servicio Geológico de EE. UU. (USD, 2013).
Table 1. Drought severity classification, US Geological Service (USD, 2013).

Categoría	Posibles impactos	Descripción	Escurrecimientos mensuales USGS (percentiles)
D0	Al entrar en sequía: falta de agua en el corto plazo, que reduce la siembra y crecimiento de los cultivos o pastos. Al salir de la sequía: persisten algunos déficits de agua; los pastos o cultivos no se han recuperado totalmente.	Anormalmente seco	21-30
D1	Algunos daños a los cultivos y pastos; niveles bajos de ríos, embalses y pozos, algo de escasez de agua en desarrollo o inminente; se solicitan restricciones voluntarias del uso del agua.	Sequía moderada	11-20
D2	Pérdidas probables de cultivos o pastos; escasez de agua común; imposición de restricciones de agua.	Sequía severa	6-10
D3	Pérdidas importantes de cultivos o pastos; restricciones o escasez generalizada de agua.	Sequía extrema	3-5
D4	Pérdidas excepcionales y generalizada de cultivos o pastos; la escasez de agua en embalses, ríos, y pozos de agua crean situaciones de emergencia.	Sequía excepcional	0-2

mensuales durante el año. 3) El caudal ambiental mínimo (CAM) corresponde a 10 % del caudal medio mensual o al caudal con una probabilidad de excedencia igual o mayor a 90 %. 4) El caudal ambiental aceptable (CAA) corresponde a 10 % del caudal medio mensual en época de estiaje y a 30 % en época de lluvias o al caudal con una probabilidad de excedencia igual o mayor a 80 %. 5) El caudal ambiental bueno (CAB) corresponde a 20 % del caudal medio mensual en época de estiaje y 40 % en época de lluvias o al caudal con una probabilidad de excedencia igual o mayor a 70 %.

Modelo de optimización para la asignación del agua

El modelo de optimización para la asignación del agua calcula el volumen de agua mensual que puede asignarse a los diferentes usos del agua en la cuenca, bajo distintas condiciones de disponibilidad y orden de prelación establecido en el Transitorio Décimo Quinto de la Ley de Aguas Nacionales (LAN) (CONAGUA, 2014). El modelo asigna la demanda total a todos los usos cuando la disponibilidad de agua es mayor que la demanda; si la disponibilidad es menor, el modelo asigna el agua de acuerdo con el orden de prelación, y garantiza por lo menos un volumen mínimo a cada uso. El modelo fue resuelto con el Sistema de Modelación Algebraico General (GAMS, sus siglas en inglés), software especializado en programación matemática y optimización (Rosenthal, 2013).

Debido a las características de la cuenca y a la ubicación de los usos del agua, para aplicar el modelo de asignación la cuenca se dividió en dos subcuencas (Figura 1) delimitadas por la estación hidrométrica Venados, y denominadas parte alta de la cuenca

Optimization model for water allocation

The optimization model calculates the monthly volume of water that can be allocated to the different uses of the basin's water, under different conditions of availability and the order of priority established in the fifteenth transitory article of the National Law on National Water (LAN for its initials in Spanish) (CONAGUA, 2014). When water availability is greater than the demand, the model allocates the total demand to all users; but when water availability is lower than the demand, the model allocates water according to the order of priority and guarantees a minimum percentage of the demand per use sector. The model was solved with the General Algebraic Modelling System (GAMS), specialized software for mathematical programming and optimization (Rosenthal, 2013).

Due to the particular characteristics of the basin and to the location of water user sectors, in order to apply the allocation model, the basin was divided into two sub-basins (Figure 1), delimited by the Venados hydrometric station. These sub-basins were denominated upper basin (zone 1) and lower basin (zone 2). Furthermore, because of information gaps, the annual concessions of each sector were considered the maximum permitted water use limits.

Objective function

The objective function consists in maximizing the total monthly allocation of surface water to each water use and is expressed as:

(zona 1) y parte baja de la cuenca (zona 2). Además, debido a la falta de información, se consideró que las concesiones anuales de cada uso del agua son los límites máximos permitidos de uso de agua.

Función objetivo

La función objetivo consiste en maximizar la asignación mensual total de agua superficial de cada uso del agua y se expresa como:

$$MAX AT = \sum_{i=1}^n f_i As_{it} + \sum_{i=1}^m f_i As_{it} \quad \forall t \quad (1)$$

donde AT es la asignación mensual total de agua en la cuenca, en m^3 ; f_i es un factor de peso de acuerdo al orden de prelación de cada uso i , adimensional; As_{it} es el agua asignada al uso i (variable de decisión) en el tiempo t , en m^3 ; n es el número de usos demandantes de agua en la zona 1, adimensional; m es el número de usos demandantes de agua en la zona 2; i es el índice de uso, adimensional; y t es el índice de tiempo (escala de tiempo en la cual se evalúa la función objetivo, en este caso mensual), adimensional, $t = 1, 2, \dots, 12$.

La función objetivo del modelo de asignación tiene tres tipos de restricciones: físicas (como disponibilidad de agua), políticas de asignación (límite inferior y superior de las variables) y variables de control del sistema (como mantener la factibilidad).

Restricciones de disponibilidad de agua

La cantidad total de agua asignada a los usos en la zona 1, debe ser menor o igual que la disponibilidad de agua en esta zona, en el mes t . De manera similar en la zona 2. Si la incertidumbre de la disponibilidad, es incorporada se tiene:

$$\sum_{i=1}^n As_{it} \leq Ds_t^{1,\alpha} \quad \forall t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m As_{it} \leq Ds_t^{2,\alpha} \quad \forall t \quad (3)$$

donde: $Ds_t^{1,\alpha}$ y $Ds_t^{2,\alpha}$ son las funciones de distribución acumulada inversas de los caudales en las zonas 1 y 2, respectivamente, con un nivel de confianza α (50, 70 y 90 %) que representa la disponibilidad mensual de agua, en m^3 , en el mes t .

$$MAX AT = \sum_{i=1}^n f_i As_{it} + \sum_{i=1}^m f_i As_{it} \quad \forall t \quad (1)$$

where AT is the total monthly water allocation in the basin, in m^3 ; f_i is the weight factor according to the order of priority of use i , non-dimensional; As_{it} is the water allocated to use i (decision variable) in time t , in m^3 ; n is the number of water-demanding uses in the upper basin, non-dimensional; m is the number of water-demanding uses in the lower basin, non-dimensional; i is the use index, non-dimensional; and t is the time index (time scale in which the objective function is assessed, in this case, monthly), non-dimensional, $t = 1, 2, \dots, 12$.

The objective function of the allocation model has three types of restrictions: physical (like, water availability), allocation policies (lower and upper limit of the variables) and control variables of the system (like maintaining feasibility).

Restrictions to water availability

The total amount of water allocated to the different uses in zone 1 should be lower than or equal to the water availability in that zone, in month t , and likewise, in zone 2. If uncertainty of the availability is incorporated, then we have:

$$\sum_{i=1}^n As_{it} \leq Ds_t^{1,\alpha} \quad \forall t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m As_{it} \leq Ds_t^{2,\alpha} \quad \forall t \quad (3)$$

where: $Ds_t^{1,\alpha}$ and $Ds_t^{2,\alpha}$ are the inverse cumulative pdf of the flows in zones 1 and 2, respectively, at a confidence level α (50, 70, and 90 %), that represent water availability, in m^3 , in month t .

Restrictions on water demand

Water allocated to each use i in month t in the upper and lower basin should be less than or equal to their water rights concession, and greater than or equal to a minimum demand to be guaranteed (proposed in this study).

$$As_{it} \leq Cs_{it}^1 \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$As_{it} \geq Dm_{it}^1 \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$As_{it} \leq Cs_{it}^2 \quad \forall i, t \quad (6)$$

Restricciones de demanda de agua

La asignación de agua a cada uso i en el mes t en las zonas 1 y 2, debe ser menor o igual a su volumen concesionado y mayor o igual que una demanda mínima a garantizar (propuesta en este estudio).

$$As_{it} \leq Cs_{it}^1 \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$As_{it} \geq Dm_{it}^1 \quad \forall i, t \quad (5)$$

$$As_{it} \leq Cs_{it}^2 \quad \forall i, t \quad (6)$$

$$As_{it} \geq Dm_{it}^2 \quad \forall i, t \quad (7)$$

donde: Cs_{it}^1 es la cantidad de agua concesionada para el uso i en la zona 1; Dm_{it}^1 es la demanda mínima a garantizar para el uso i en la zona 1; Cs_{it}^2 es la cantidad de agua concesionada para el uso i en la zona 2; y Dm_{it}^2 es la demanda mínima a garantizar para el uso i en la zona 2, todos en el mes t y en m^3 .

La demanda mínima a garantizar está dada por: $Dm = \theta Cs$, donde $\theta = 0, 10, 20, \dots, 100 \%$.

Restricciones de no negatividad

Las variables de decisión, concesiones y demandas mínimas para el mes t , no deben ser negativas.

$$As_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$Cs_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$Dm_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (10)$$

Factores de ponderación en la función objetivo

El orden de prelación de cada uso del agua fue utilizado para designar factores de importancia de cada uso. Estos factores fueron normalizados para obtener los factores de ponderación requeridos en la función objetivo de acuerdo con la ecuación (11):

$$f_i = \frac{f_i}{\sum_i f_i} \quad \forall i \quad (11)$$

donde: f_i es un factor de importancia en función del orden de prelación de cada uso i (propuesto); y n_s es el número de sectores usuarios del agua en la cuenca.

$$As_{it} \geq Dm_{it}^2 \quad \forall i, t \quad (7)$$

where: Cs_{it}^1 is the amount of water concessioned for use i in zone 1; Dm_{it}^1 is the minimum demand to be guaranteed to use i in zone 1; Cs_{it}^2 is the amount of water concessioned for use i in zone 2; and Dm_{it}^2 is the minimum demand to be guaranteed for use i in zone 2, all in month t and in m^3 .

The minimum demand to be guaranteed is given by $Dm = \theta Cs$, where $\theta = 0, 10, 20, \dots, 100 \%$.

Non-negativity restrictions

The variables of decision, concessions, and minimum demands for month t should not be negative.

$$As_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$Cs_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (9)$$

$$Dm_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (10)$$

Weighted factors in the objective function

The order of priority of each water use was used to design importance factors for each use. These factors were normalized to obtain the weighted factors required in the objective function, according to equation (11):

$$f_i = \frac{f_i}{\sum_i f_i} \quad \forall i \quad (11)$$

where: f_i is an importance factor in function of the order of priority of each use i (proposal), and n_s is the number of water user sectors in the basin.

Table 2 shows the water uses in the Metztitlán River Basin, their order of priority for allocating water, established in LAN, and the surface water volumes concessioned by CONAGUA. Because of its small magnitude, the volume for domestic use was grouped with urban public use, and multiple use was added to other uses (services). The non-consumptive uses of aquaculture and energy production were not considered in the optimization model, but environmental use (environmental flow) is included.

En el Cuadro 2 se presentan los usos del agua en la cuenca del río Metztitlán, su orden de prelación para la asignación del agua de acuerdo a la LAN, y el volumen de agua superficial concesionado por la CONAGUA. Debido a su magnitud pequeña, el volumen de agua para uso doméstico se agrupó dentro del uso público urbano, y el uso múltiple se agregó al uso de otros (servicios). Los usos no consuntivos de acuacultura y generación de energía no se consideran en el modelo de optimización, sin embargo, se incluye el uso ambiental (caudal ambiental).

Escenarios de modelación y reglas de asignación

El modelo de optimización se aplicó a escala mensual evaluando tres escenarios que representan diferentes condiciones de disponibilidad basados en el Monitor de Sequía de EE.UU.: 1) Escenario *ESAS-N*: el percentil 50 que representa condiciones normales de disponibilidad de agua; 2) escenario *ESAS-D0*: el percentil 30 que representa condiciones anormalmente secas (Categoría D0); y 3) escenario *ESAS-D2*: el percentil 10 que representa condiciones de sequía severa (Categoría D2).

El modelo de optimización incorpora el caudal ambiental como un uso más para analizar el comportamiento del sistema. Para el escenario *ESAS-N* se usó una demanda máxima estimada como los CAB calculados por el método de Tennant y la curva de duración de caudales. Para los escenarios *ESAS-D0* y *ESAS-D2* se consideraron los CAA y CAM, respectivamente, como referencia de los caudales ambientales obtenidos con el modelo de optimización.

Adicionalmente, para los escenarios analizados se propusieron dos reglas de asignación para cada uso del agua, que consideran el concepto de equidad: 1) La regla de asignación 1 (Ra1) utiliza para cada mes el porcentaje máximo de agua que se puede garantizar a cada uso, según los requerimientos y disponibilidad mensuales; y 2) la regla de asignación 2 (Ra2) garantiza a cada uso un porcentaje mínimo constante de la demanda mensual a lo largo del año, que corresponde al menor porcentaje mensual asignado con la aplicación de la regla Ra1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Distribución temporal del escurrimiento superficial

El patrón de escurrimientos medios mensuales en las estaciones hidrométricas Venados y El Álamo presenta variabilidad alta, concentrada de julio a octubre. En septiembre y octubre se presentan los escurrimientos superficiales mayores y de febrero a abril los menores (periodo con precipitación menor).

Modelled scenarios and allocation rules

The optimization model was applied on a monthly scale, assessing three scenarios that represent different conditions of water availability based on the United States Drought Monitor: 1) Scenario *ESAS-N*: 50th percentile representing normal conditions of water availability; 2) scenario *ESAS-D0*: 30th percentile which represents abnormally dry conditions (Category D0); and 3) scenario *ESAS-D2*: 10th percentile representing severe drought conditions (Category D2).

In the optimization model, ecological flow was incorporated as one use more for analysis of the system's behavior. For scenario *ESAS-N*, an estimated maximum demand was used as the good environmental condition (GEF) calculated by the Tennant method and the flow duration curve. For scenarios *ESAS-D0* and *ESAS-D2*, the AEF and MEF, respectively, were considered as references for environmental flows obtained using the optimization model.

Additionally, two water allocation rules for each use were proposed for the analyzed scenarios. These rules consider the concept of equity: 1) Allocation rule 1 (Ra1) uses the maximum percentage of water that can be guaranteed monthly to all uses, depending on requirements and monthly availability; and 2) allocation rule 2 (Ra2) guarantees a constant minimum percentage of the monthly demand to each use throughout the year, which corresponds to the lowest monthly percentage allocated with Ra1.

Cuadro 2. Usos del agua en la cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México.

Table 2. Water uses in the Metztitlán River Basin, Hidalgo, Mexico.

Prelación	Uso	Volumen concesionado (hm ³)
1	Doméstico	0.0828
2	Público urbano	4.9152
3	Pecuario	0.2314
4	Agrícola	101.4890
5	Uso para la conservación ecológica o uso ambiental	†
6	Industrial	1.4014
7	Acuacultura	10.5410
8	Generación de energía para servicio privado	20.8060
9	Uso múltiple	0.9001
10	Otros (servicios)	2.0791

†Calculado en esta investigación ♦ Calculated in this study.

Las fdp's Gamma y Log Normal de tres parámetros presentaron mejor ajuste a los escurrimientos anuales en las estaciones Venados y El Álamo, respectivamente. De acuerdo con el análisis de frecuencias, la mediana anual de los escurrimientos registrados en Venados es de 130.27 hm^3 ; el umbral que determina si un año es anormalmente seco corresponde a un escurrimiento menor a $93.94 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, y el de un año con sequía severa menor a $67.81 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$. De acuerdo con los escurrimientos en Venados en el periodo de 1937 a 2005, el escurrimiento interanual en la cuenca del río Metztitlán presenta 15 años con algún grado de sequía hidrológica, con 22 % de años secos (Figura 3). En estos años se presentaron tres periodos de sequía, 1949-51, 1982-83 y 1986-88; el de mayor severidad fue en el último periodo con 70.52 hm^3 (24.2 mm). El periodo de sequía más intenso ocurrió de 1982 a 1983 con 29.12 hm^3 (10.0 mm) por año. En el periodo de análisis hubo cuatro años con sequía severa, que es 6 % del periodo; la sequía más severa y de mayor intensidad fue en 1987 con 40.63 hm^3 (13.9 mm) anuales. La probabilidad de dos años consecutivos con algún grado de sequía es 5 %.

Caudales ambientales en la cuenca del río Metztitlán

El escurrimiento medio anual de la estación hidrométrica Venados, en el periodo de 1937 a 1979 fue $5.66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (178.63 hm^3); y de 1980 a 2005 fue $4.67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (147.24 hm^3), lo cual es una disminución del caudal de 17.6 %. Los mayores cambios en

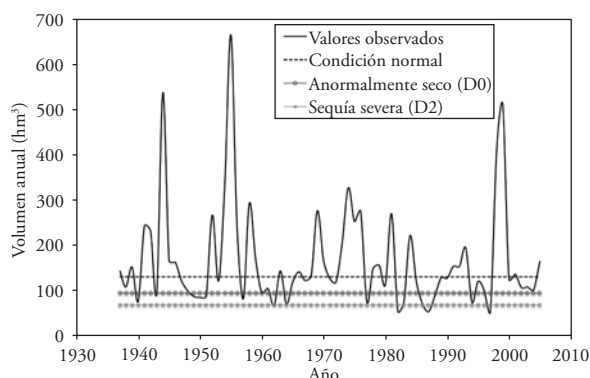


Figura 3. Clasificación de los escurrimientos anuales en la estación hidrométrica Venados.

Figure 3. Classification of yearly runoff in the hydrometric station Venados.

RESULTS AND DISCUSSION

Temporal distribution of surface runoff

The temporal pattern of mean monthly runoff in the hydrometric stations Venados and El Álamo is highly variable and concentrated in the months from July to October. In September and October the highest surface runoff occurs, while the lowest occurs from February to April (period of lowest rainfall).

The Gamma and Log Normal fdp of three-parameters had better fit to the annual runoff registers of the Venados and El Álamo stations, respectively. Frequency analysis of the runoff recorded in Venados shows that median annual runoff is 130.27 hm^3 . The threshold that determines whether a year is abnormally dry corresponds to a runoff lower than $93.94 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$, and that of a year with severe drought is $67.81 \text{ hm}^3 \text{ year}^{-1}$. The registers of inter-annual runoff in Venados over the period 1937 to 2005 show that in the Metztitlán basin there were 15 years with some degree of drought; that is, 22 % of the years were dry (Figure 3). During these years, there were three periods of drought, 1949-51, 1982-83 and 1986-88; the most severe was the last period with 70.52 hm^3 (24.2 mm). The most intense drought was that of 1982 to 1983 with 29.12 hm^3 (10.0 mm) per year. In the period analyzed, severe drought occurred in four of the years, or 6 % of the period; 1987 was the most severe and most intense, with 40.63 hm^3 (13.9 mm) yearly. The probability that some degree of drought occurs in two consecutive years is 5 %.

Environmental flows in the Metztitlán River Basin

For the period from 1937 to 1979, mean annual runoff at the Venados hydrometric station was $5.66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (178.63 hm^3), and from 1980 to 2005, it was $4.67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (147.24 hm^3); this represents a net reduction of 17.6 % in the flow. The months with greatest change in mean monthly runoff were March and April, with decreases of 48.9 and 49.6 %, respectively; July is the month with the smallest decrease (14.9 %). The reduction in flows are due, partially, to the increase in volumes of water extracted for agriculture and domestic use upstream from the hydrometric station. Because of this, environmental

el escurrimiento medio mensual fueron en marzo y abril, con reducciones de 48.9 y 49.6 %, respectivamente; en julio ocurrió la menor disminución (14.9 %). El descenso en los caudales se debe, en parte, al aumento en los volúmenes de agua extraídos para uso agrícola y doméstico aguas arriba de la estación hidrométrica Venados. Por lo tanto, los caudales ambientales en la parte alta de la cuenca fueron estimados sólo con datos del periodo de 1980 a 2005; para la estación El Álamo se usó el periodo de registros históricos disponibles de 1960-2005. El decremento en los caudales mensuales implica una seducción de los caudales ambientales; y deteriora las condiciones ecológicas del río Metztitlán, lo cual, no es favorable para la vida acuática. Los caudales ambientales estimados se presentan en la Figura 4.

Escenario de simulación ESAS-N

Los resultados obtenidos con el escenario ESAS-N y la regla de asignación Ra1 muestran que de enero a abril las demandas totales requeridas no se satisfacen para todos los usos. Los déficits mayores se presentan en marzo (13 %) y abril (12 %). En los demás meses del año los requerimientos mensuales de todos los usos del agua satisfacen 100 %. En la parte alta de la cuenca, los requerimientos anuales (aún en periodo de estiaje) de todos los usos del agua se satisfacen 100 %; es decir, el déficit anual sólo ocurre en la parte baja para los usos agrícola, múltiple y ambiental con 3, 3 y 0.5 %, respectivamente. No obstante, los requerimientos anuales para los usos público urbano y pecuario se satisfacen totalmente.

flows in the upper basin were estimated only with data of the period from 1980 to 2005. At the El Álamo station, the historical records available for the period 1960 to 2005 were used. The decrease in monthly flows implies a decrease in environmental flows and, therefore, deterioration of the ecological conditions of the Metztitlán River, which are not favorable for aquatic life. Figure 4 presents the estimated monthly environmental flows.

ESAS-N simulation scenario

The results obtained from simulation of scenario ESAS-N and allocation rule Ra1 show that from January to April the total demands required by the different uses are not met. In March and April the highest deficits occur, 13 and 12 %, respectively. The rest of the year, monthly requirements of all water users in the basin are met 100 %. In the upper basin, even in the dry season, all water uses receive 100 % of their yearly requirements; that is, annual deficits occur only in the lower basin for the agricultural, multiple and environmental uses, with 3, 3 and 0.5 %, respectively. Nevertheless, 100 % of the annual demands of the public urban and livestock uses are met.

Because the greatest deficit (13 %) took place in March with rule Ra1, to apply rule Ra2, 87 % was selected as the minimum monthly percentage to be guaranteed of the monthly volume concessioned to each use. Under rule Ra2, water uses in the upper basin receive 100 % of their yearly requirements, as with rule Ra1. However, in the lower basin, multiple,

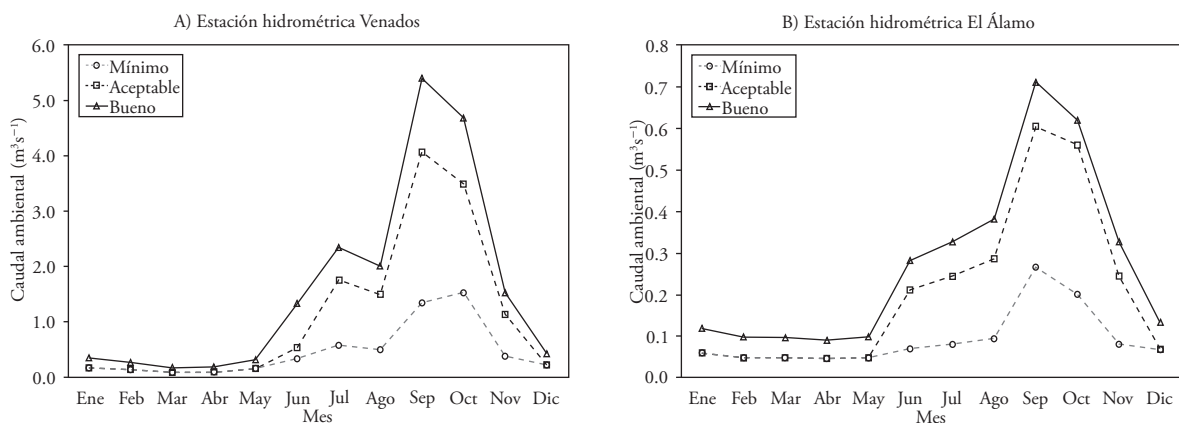


Figura 4. Caudales ambientales mensuales en las estaciones hidrométricas Venados y El Álamo.
Figure 4. Monthly environmental flows at the Venados and El Álamo hydrometric stations.

Dado que en marzo ocurrió el déficit mayor (13 %) con la regla Ra1, para aplicar la regla Ra2 se seleccionó 87 % como el porcentaje mensual mínimo a garantizar del volumen mensual concesionado a cada uso. Con la regla Ra2, los usos del agua en la parte alta de la cuenca cumplen todos sus requerimientos anuales, como con la regla Ra1. Sin embargo, en la parte baja los usos múltiple, agrícola y ambiental, presentan un déficit anual de 4, 3 y 0.7 %. Los meses de enero a abril presentan déficit, con valores similares a los obtenidos con la regla Ra1.

Con la regla Ra2, el uso agrícola en la parte baja de la cuenca presenta un déficit de febrero a abril, con un valor máximo de 12 % en marzo. Este déficit es ligeramente inferior a los presentados con la regla Ra1. Para este mismo periodo, el uso ambiental presenta un déficit de 13 %, el cual es un poco superior al obtenido con la regla Ra1.

Escenario de simulación ESAS-D0

Los resultados con el escenario ESAS-D0 y la regla Ra1 muestran que en diciembre y enero se obtuvieron los porcentajes mayores (78 y 80 %) de satisfacción de la demanda mensual total; y los déficits mayores fueron en septiembre, octubre y julio, y cubrieron sólo 48, 51 y 55 % de los requerimientos.

Debido a su orden de prelación, los usos público urbano y pecuario, en ambas zonas de la cuenca, satisfacen todas sus demandas anuales. El uso ambiental presenta el déficit anual mayor, 43 y 31 %, en las partes alta y baja de la cuenca, con relación a los requerimientos establecidos para condiciones hidrológicas buenas (CAB) (Figura 5). El uso agrícola, el uso consuntivo más demandante, presenta un déficit anual menor y sus déficits mensuales mayores son en septiembre (50 %) y abril (34 %), en las partes alta y baja de la cuenca. Esto es de suma importancia debido a los beneficios económicos que este uso aporta a la cuenca.

El déficit mensual mayor en la cuenca es en septiembre y sólo satisface 48 % de la demanda total. Este valor se seleccionó como el porcentaje mensual mínimo que garantiza la asignación a cada uso para la aplicación de la regla Ra2 durante todo el año bajo el escenario ESAS-D0.

Con el escenario ESAS-D0 y la regla Ra2, los requerimientos anuales de los usos público urbano y pecuario son satisfechos en toda la cuenca, igual

agrícola y ambiental uses have an annual deficit of 4, 3 and 0.7 %. There are deficits in the months from January to April, with values similar to those obtained with rule Ra1.

In the lower basin, with rule Ra2, agricultural use has deficits from February to April, with the highest deficit in March (12 %). This deficit is slightly lower than that occurring with rule Ra1. For the same period, environmental use has a deficit of 13 %, slightly higher than that obtained with rule Ra1.

ESAS-D0 simulation scenario

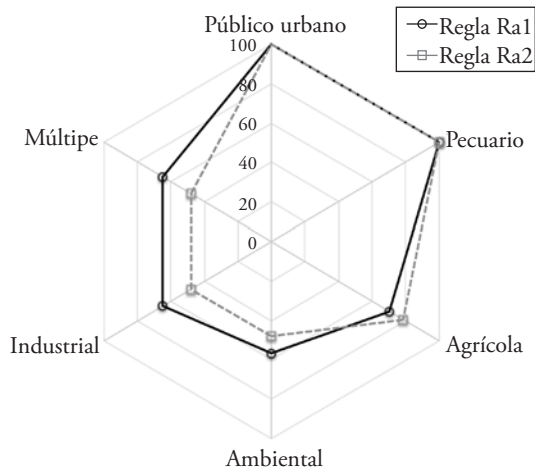
The results of scenario ESAS-D0 with rule Ra1, show that in December and January, the highest percentages of the total monthly demand are met, 78 and 80 % and the months with the highest deficits were September, October and July, satisfying only 48, 51 and 55 % of the requirements.

Because of the order of priority, the urban public and livestock uses in both the upper and lower basin receive their total annual demands. The environmental sector is the use with the highest annual deficit, 43 and 31 % in the upper and lower basin, relative to the requirements established for good hydrological conditions (GEF) (Figure 5). Agricultural use, the most demanding consumptive use, has a lower annual deficit; the highest monthly deficits are in September (50 %) and April (34 %) in the upper and lower basin. This is highly important because of the economic benefits that this sector contributes to the region.

The highest monthly deficit in the basin is in September, when only 48 % of the total demand is satisfied. This value was selected as the monthly minimum percentage to be guaranteed in the monthly allocation to each use for application of rule Ra2 throughout the year under scenario ESAS-D0.

With scenario ESAS-D0 and rule Ra2, the annual requirements of the urban public and livestock uses are met in the entire basin, as with rule Ra1, while the other users have deficits (Figure 5). In the upper basin, 48 % of the requirements of the environmental, industrial and multiple uses is covered. This percentage corresponds to the month with the lowest allocation with rule Ra1. Agricultural use has a lower annual deficit, and the highest monthly deficits occur in September (50 %) in the upper basin, and in April (31%) in the lower basin.

A) Zona 1



B) Zona 2

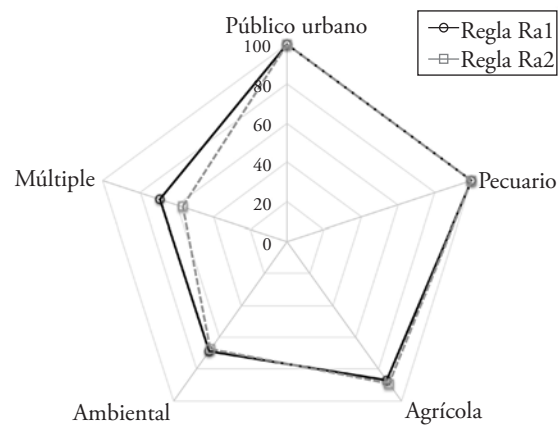


Figura 5. Asignación anual de agua (en porcentaje) de cada uso para el escenario de simulación ESAS-D0 y las reglas de asignación Ra1 y Ra2.

Figure 5. Yearly water allocation (in percentage) to each use for the ESAS-D0 simulation scenario and the allocation rules Ra1 and Ra2.

que con la regla Ra1, pero los otros usos restantes presentan un déficit (Figura 5). En la parte alta de la cuenca los usos ambiental, industrial y múltiple cubren 48 % de sus requerimientos. Este porcentaje corresponde al mes con la menor asignación con la regla Ra1. El uso agrícola presenta un déficit anual menor, y los déficits mensuales mayores ocurren en septiembre (50 %) en la parte alta de la cuenca y en abril (31 %) en la parte baja.

En ambas zonas de la cuenca, el volumen ambiental menor con respecto al volumen de referencia para la condición hidrológica buena (48 %) y las reglas Ra1 y Ra2, se asigna en septiembre (Figura 6). La comparación de los volúmenes para uso ambiental asignados por el modelo con los de referencia, muestra que el volumen asignado (de diciembre a junio) es mayor que el de referencia, con la regla Ra1, en ambas zonas de la cuenca; las mayores diferencias se presentan en la parte baja de la cuenca, 31 % en junio y 100 % en diciembre.

En la parte alta de la cuenca, con la regla Ra2, todo el año excepto junio, los volúmenes de referencia ambientales son mayores que los obtenidos con el modelo; las diferencias más grandes ocurren en la temporada con mayores escurrimientos, y de diciembre a mayo la diferencia es sólo 4 %. En la parte baja

In both the upper and lower basin, the lowest environmental volume, relative to the reference volume for good hydrological condition (48 %) and rules Ra1 and Ra2, is allocated in September (Figure 6). Comparison of the volumes for environmental use allocated by the model with those of the reference shows that the allocated volume (December to June) is greater than the reference volume with rule Ra1 in both parts of the basin. The largest differences occur in the lower basin, 31 % in June and 100 % in December.

In the upper basin all year except in June, with rule Ra2, the reference environmental volumes are larger than those obtained with the model. The greatest differences occur in the season of highest runoff, while from December to May the difference is only 4 %. In the lower part of the basin, from January to April, the environmental reference volume is higher (4 %) than that obtained with the model. The rest of the year, the opposite occurs, with the exception of the three months of highest runoff. It should be noted that from May to December, behavior is similar to that with rule Ra1.

According to the model, the upper basin has a higher deficit in environmental volumes, relative to the reference volumes for the good hydrological

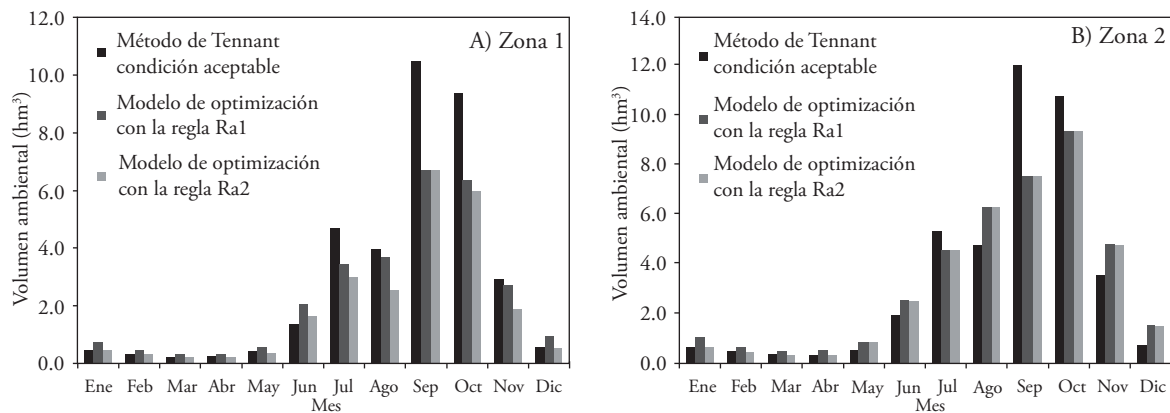


Figura 6. Volúmenes ambientales de referencia estimados con base en el método de Tennant y a la curva de duración de caudales y volúmenes asignados por el modelo de optimización en el escenario de simulación ESAS-D0 y las reglas de asignación Ra1 y Ra2.

Figure 6. Environmental reference volumes estimated based on the Tennant method and the flow duration curve, and volumes allocated by the optimization model in ESAS-D0 simulation scenario and the allocation rules Ra1 and Ra2.

de la cuenca, de enero a abril el volumen ambiental de referencia es mayor (4 %) al obtenido con el modelo; el resto del año ocurre lo contrario, excepto de los tres meses con mayores escurrimientos. Cabe destacar que de mayo a diciembre el comportamiento es similar que con la regla Ra1.

De acuerdo con el modelo, la parte alta de la cuenca presenta un déficit mayor de los volúmenes ambientales respecto a los de referencia para una condición hidrológica buena. Asimismo, debido a los requerimientos de referencia para uso ambiental y a la disponibilidad de agua en la parte baja de la cuenca, para las dos reglas analizadas, en agosto, noviembre y diciembre, el modelo de optimización puede asignar las demandas para condiciones hidrológicas buenas (escenario ESAS-N).

Al contrastar las diferencias que ocurren en el cumplimiento de las demandas mensuales y anuales que reciben los usos del agua con la aplicación de las reglas de asignación propuestas, se puede señalar lo siguiente: No hay diferencias entre la asignación de agua obtenida con la aplicación de la Ra1 y Ra2 para los usos urbano y pecuario en ambas zonas de la cuenca. En la parte alta de la cuenca, con la regla Ra2, el uso agrícola satisface 9 % más sus requerimientos anuales con respecto a la regla Ra1; su déficit anual disminuye a 21 %. Pero esto implica que los usos ambiental, industrial y múltiple incrementen su déficit de 43, 35 y 35 %, respectivamente, a 52 % cada uno. En la parte baja de la cuenca, con la regla Ra2 el uso agrícola satisface 2 % más sus requerimientos con

condition. Furthermore, due to the reference requirements of environmental use and to the availability of water in the lower basin, for the two rules analyzed, in August, November and December the optimization model is capable of allocating water to satisfy the requirements for good hydrological conditions (scenario ESAS-N).

When contrasting the differences that occur in terms of meeting monthly and annual demands of the basin's water uses and applying the proposed allocation rules, we conclude the following. There are no differences between the water allocation obtained by applying Ra1 and that obtained by applying Ra2 for the urban and livestock sector in the two parts of the basin. In the upper basin, with rule Ra2, 9 % more of the annual requirements of agricultural use is met than by applying rule Ra1, reducing their annual deficit to only 21 %. However, this implies that environmental, industrial and multiple use deficits increase from 43, 35 and 35 %, respectively, to 52 % each. In the lower basin, with rule Ra2, 2 % more of agricultural use requirements are met, relative to application of Ra1, reducing its annual deficit from 13 to 11 %, although there would be 2 and 13 % increments in the deficits of environmental and multiple uses, respectively.

ESAS-D2 simulation scenario

The results of scenario ESAS-D2 with rule Ra1 show that maximum monthly allocation for the

respecto a la regla Ra1; su déficit anual disminuye de 13 a 11 %, lo cual implica que los usos ambiental y múltiple aumenten su déficit en 2 y 12 %, respectivamente.

Escenario de simulación ESAS-D2

Los resultados del escenario ESAS-D2 con la regla Ra1, muestran que la asignación mensual máxima para toda la cuenca varía entre 17 y 60 %. Las menores asignaciones son en julio, mayo y junio con 17, 26 y 28 %, respectivamente; mientras que los mayores porcentajes de satisfacción de las demandas son en enero (60 %) y diciembre (57 %).

Aun para este escenario, los usos público urbano y pecuario, cumplen todas sus necesidades hídricas en ambas zonas de la cuenca, debido a su prelación alta dentro de la LAN y a sus demandas bajas. Los usos industrial y múltiple son los usos más deficitarios (Figura 7). El uso ambiental tiene un déficit de 65 y 62 %, en las partes alta y baja de la cuenca, respectivamente, con relación a los requerimientos de CAB. El uso agrícola tiene un déficit anual de 56 %, que varía cada mes de 39 % (enero) a 82 % (julio) y de 2 % (noviembre) a 65 % (abril), en las partes alta y baja de la cuenca, respectivamente. Para los diferentes escenarios de disponibilidad analizados, la parte alta de la cuenca presenta el déficit mayor al considerar los usos actuales del agua en la cuenca y la demanda para uso ambiental.

entire basin varies between 17 and 60 %. The lowest allocations are in July, May and June: 17, 26 and 18 %, respectively, while the months in which the highest percentages of total demands are satisfied are January (60 %) and December (57 %).

Even for this scenario, the water needs of urban public and livestock uses in both parts of the basin are totally met because of their high priority, established in LAN, and their low demands. Industrial and multiple uses are those with the greatest deficits (Figure 7). Environmental use has deficits of 65 and 62 % in the upper and lower basin, respectively, relative to the requirements of GEF. Agricultural use has an annual deficit of 56 %, with monthly variations of 39 % (January) to 82 % (July) and from 2 % (November) to 65 % (April) in the upper and lower parts of the basin, respectively. In the different scenarios of water availability analyzed, the upper basin has higher deficits, considering current water uses in the basin and including the demand for environmental use.

For scenario ESAS-D2, the greatest monthly deficit occurs in July (83 %) with application of rule Ra1 in the entire basin. For this reason, 17% was selected as the minimum percentage of the monthly allocation to be guaranteed to each user with rule Ra2 during the entire year. The annual requirements of the urban public and livestock sectors, in the severe drought scenario with rule Ra2, are totally satisfied, as with Ra1 (Figure 7); the other uses have

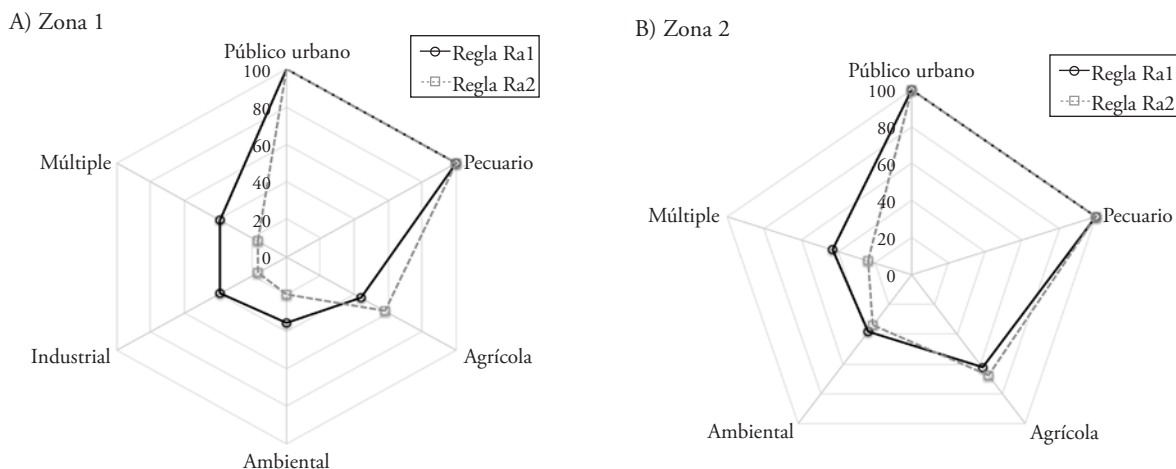


Figura 7. Asignación anual de agua (en porcentaje) de cada uso para el escenario de simulación ESAS-D2 y reglas de asignación Ra1 y Ra2.

Figure 7. Annual water allocation (in percentage) for each use in ESAS-D2 simulation scenario and allocation rules Ra1 and Ra2.

Para el escenario ESAS-D2, el déficit mensual mayor (83 %) en toda la cuenca es en julio con la regla Ra1; por ello, para aplicar la regla Ra2 durante todo el año, el porcentaje mínimo de asignación mensual a cada uso fue 17 %. Los usos público urbano y pecuario con la regla Ra2, satisfacen todos sus requerimientos anuales, al igual que con la Ra1 (Figura 7); los otros usos tienen déficit. Los usos industrial y múltiple son los sectores más deficitarios ya que sólo satisfacen 17 % de sus demandas anuales, es decir, sólo se les garantiza el porcentaje mínimo bajo el que opera la regla Ra2. El uso ambiental durante 10 y 7 meses del año presenta esta misma condición, en las partes alta y baja de la cuenca, respectivamente. El uso agrícola en la parte alta de la cuenca 10 meses del año presenta déficits desde 27 (diciembre) a 82 % (julio). En septiembre y octubre, los meses con mayor escurrimiento, no hay déficit. Mientras que, en la parte baja de la cuenca, los déficits son en el periodo de estiaje y varían de 30 (enero) hasta 62 % (abril).

Para el uso ambiental, julio es el mes con déficit mayor en toda la cuenca con las reglas Ra1 y Ra2, ya que sólo satisface 17 % de sus requerimientos, con respecto a los volúmenes de referencia para uso ambiental para la condición de CAB.

La comparación de los volúmenes ambientales mínimos (CAM) de referencia, para un escenario de sequía severa, con respecto a los asignados por el modelo, permite constatar que de febrero a julio (excepto junio) con la regla Ra1, los volúmenes ambientales asignados son menores que los de referencia, en ambas zonas de la cuenca (Figura 8), estos varían de 4 % en febrero a 48 % en mayo; el resto del año ocurre lo contrario. Con la regla Ra2, los resultados muestran que todo el año, en la parte alta de la cuenca, los volúmenes ambientales mínimos de referencia son mayores que los obtenidos mediante el modelo. Las diferencias varían de 13 a 66 %. En seis meses del año hay una diferencia de 66 % (periodo de estiaje). En la parte baja de la cuenca, sólo de agosto a diciembre, los volúmenes asignados por el modelo son mayores a los mínimos de referencia; hay diferencias de 22 % en octubre a 100 % en diciembre. El volumen ambiental de referencia es mayor que el asignado por el modelo, de enero a julio, con diferencias de 32 a 66 %. En general, en ambas partes de la cuenca, para las dos reglas Ra1 y Ra2 con un escenario de sequía severa, de febrero a julio, no se podrían asignar los volúmenes para uso ambiental mínimos estimados de

deficits. The industrial and multiple uses are the sectors with the greatest deficits since only 17% of their annual demands are satisfied; that is, they are guaranteed only the minimum percentage under which rule Ra2 operates. Environmental use suffers the same condition for ten and seven months of the year in the upper and lower parts of the basin, respectively, whereas agricultural use in the upper basin has deficits in ten months of the year varying from 27 % (December) to 82 % (July). In September and October, the months with highest runoff, there are no deficits, while in the lower basin, the deficits occur in the dry season and vary from 30 % (January) to 62 % (April).

For environmental use, July is the month in which the deficit is the highest with allocation rules Ra1 and Ra2 since only 17 % of its requirements are met, relative to the reference environmental volumes for conditions of GEF.

By comparing the reference minimum environmental volumes (MEF) for the scenario of severe drought with those allocated by the model, we can confirm that from February to July (except for June) with rule Ra1, the environmental volumes allocated are less than the reference volumes in both parts of the basin (Figure 8). These volumes vary from 4 % in February to 48 % in May. The rest of the year the opposite occurs. With rule Ra2, the results show that year round, in the upper basin, the minimum reference environmental volumes are higher than those obtained by the model. The differences vary from 13 to 66 %. Six months of the year, there is a difference of 66 % (dry season). In the lower basin, only from August to December, volumes allocated by the model are higher than the reference minimums. Differences of 22 % in October to 100 % in December are found. The reference environmental volume is greater than that allocated by the model from January to July, with differences of 32 to 66 %. In general, in both parts of the basin, for rules Ra1 and Ra2 with a scenario of severe drought, it would not be possible to allocate the minimum volume for environmental use estimated by Tennant (1976) and the flow duration curve.

Analysis of the differences in scenario ESAS-D2 regarding compliance to monthly and annual demands of the water uses under the proposed allocation rules Ra1 and Ra2 reveals that, for the urban and livestock uses in the upper and lower

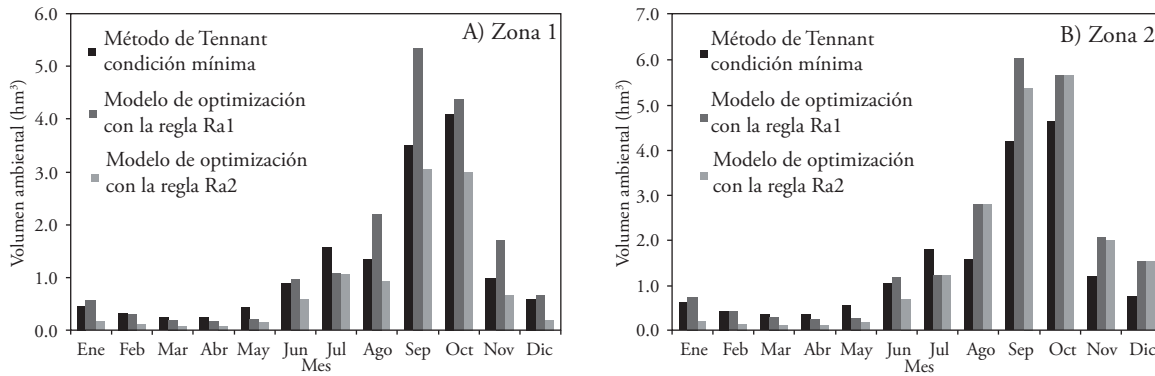


Figura 8. Volúmenes ambientales mínimos de referencia estimados con base en el método de Tennant y a la curva de duración de caudales y volúmenes asignados por el modelo de optimización en el escenario de simulación ESAS-D2 y las reglas de asignación Ra1 y Ra2.

Figure 8. Minimum reference environmental volumes estimated based on the Tennant method and the flow duration curve, and volumes allocated by the optimization model in the ESAS-D2 simulation scenario and the allocation rules Ra1 and Ra2.

acuerdo con Tennant (1976) y la curva de duración de caudales.

El análisis de las diferencias en el escenario ESAS-D2 respecto al cumplimiento de las demandas mensuales y anuales que reciben los usos del agua bajo las reglas Ra1 y Ra2 propuestas, permite señalar que para los usos público urbano y pecuario en las zonas alta y baja de la cuenca no hay diferencias, y todos sus requerimientos se cumplen. En la parte alta de la cuenca, con la regla Ra2, el uso agrícola satisface sus demandas 14 % más que con la regla Ra1, y su déficit anual disminuye a 42 %. Sin embargo, esto implica que los usos ambiental, industrial y múltiple aumenten su déficit de 65, 61 y 61 %, respectivamente, a 80 % o más. En la zona baja de la cuenca, con la regla Ra2 el uso agrícola satisface sus requerimientos 6 % más que con la regla Ra1; su déficit anual disminuye de 38 a 32 %. Sin embargo, los usos ambiental y múltiple aumentan su déficit a 4 y 19 %, respectivamente.

El caudal ambiental en esta investigación se estimó combinando dos métodos hidrológicos, y como señalan Caissie *et al.* (2014) estos métodos son prácticos para estimar el caudal ambiental porque se basan en datos históricos de caudales y no requieren datos de campo. Sin embargo, es un primer paso para visualizar que sucede con la reasignación del agua cuando se incorpora este uso dentro de la cuenca del río Metztitlán. Hay otros métodos más detallados para evaluar el caudal ambiental, por ejemplo, los de simulación de hábitat, que consideran relaciones

basin, there are no differences, and all of their requirements are met. In the upper basin, with rule Ra2, the demands of agriculture are satisfied 14 % more than with rule Ra1, reducing its annual deficit to 42 %. This, however, implies that deficits in the demand of environmental, industrial and multiple uses increase from 65, 61 and 61 %, respectively, to 80 % or more. In the lower basin, under rule Ra2, 6 % more of the requirements of agriculture are satisfied than with rule Ra1, reducing the annual deficit from 38 to 32 %, at the expense of environmental and multiple uses whose deficits would increase 4 and 19 %, respectively.

Environmental flow in this study was estimated by combining two hydrological methods. As Caissie *et al.* (2014) points out, for estimating environmental flow, these methods are practical because they are based on historical flow data and do not require field data. However, it is a first step in visualizing what would happen when water is re-allocated to include environmental use in the Metztitlán River Basin. There are other more detailed methods to assess environmental flow, for example, those of habitat simulation that consider ecohydrological relationships. However, these methods, besides being more costly, require data that are not readily available, such as temperature and types of fish species in the rivers (Pastor *et al.*, 2014). Particularly in the Metztitlán River Basin, if a specific species is to be protected and if sufficient funds are available, it

ecohidrológicos. Sin embargo, estos métodos además de ser más costosos, requieren datos no fácilmente disponibles, como temperatura y tipos de especies de peces en los ríos (Pastor *et al.*, 2014). En particular, en la cuenca del río Metztlán, si se quiere proteger alguna especie específica y de contar con los recursos suficientes, sería conveniente estimar el caudal ambiental considerando estos enfoques.

CONCLUSIONES

El modelo de optimización desarrollado para la asignación de agua en la cuenca del río Metztlán es simple en su estructura y puede aplicarse en la toma de decisiones para evaluar diversos esquemas de asignación de agua a los diferentes usos del agua en la cuenca. Su aplicación es relevante cuando hay años con déficit hídrico. Además, es una herramienta útil para evaluar la reserva de caudales ambientales mínimos para preservar el ecosistema de los ríos.

Un aspecto importante de la metodología aplicada, es la incorporación de la estimación de caudales ambientales en el manejo de los recursos hídricos disponibles en una cuenca. Si el agua para uso ambiental no se considera en la gestión hídrica, la degradación medioambiental de las cuencas será más acentuada.

Para los tres escenarios de disponibilidad de agua y las dos reglas de asignación analizadas, los usos público urbano y pecuario cubren 100 % sus requerimientos en toda la cuenca. Los demás usos del agua presentan diferentes grados de déficit a lo largo del año y son mayores en la parte alta de la cuenca. La aplicación de la regla Ra2 aumenta la asignación de agua del uso agrícola respecto a la aplicación de la regla Ra1; sin embargo, los déficits de los usos ambiental, industrial y múltiple aumentan en consecuencia. La regla Ra1 da mayor equidad entre los diferentes usos del agua al asignar a todos el mismo porcentaje mínimo mensual respecto a sus demandas.

Los escurrimientos en la cuenca del río Metztlán en condiciones normales de disponibilidad (escenario ESAS-N) son insuficientes para cubrir todas las demandas del sistema, al considerar un volumen para uso ambiental.

LITERATURA CITADA

Arthington, A. H., R. E. Tharme, S. O. Brizga, B. J. Pusey, and M. J. Kennard. 2003. Environmental flow assessment with emphasis on holistic methodologies. *In*: Welcomme R., and

would be convenient to estimate the environmental flow considering these approaches.

CONCLUSIONS

The optimization model developed for water allocation in the Metztlán River Basin is simple in its structure and can be applied in decision-making to evaluate diverse schemes of allotting water to different uses. Its application is particularly relevant when there are years of water deficits. It is also a useful tool for evaluating the reserve of minimum environmental flow for preserving river ecosystems.

One important aspect of the methodology is the incorporation of estimation of environmental flows in the management of water resources available in a basin. If the water for environmental use is not considered in water management, degradation of the environment of the basins will become more acute.

For the three scenarios of water availability and two allocation rules analyzed, the public urban and livestock uses receive 100 % of their requirements in the entire basin. The other water uses have different degrees of deficit throughout the year, which are higher in the upper basin. Application of rule Ra2 allocates more water to agricultural use than rule Ra1. However, the deficits of environmental, industrial and multiple uses increase in consequence. Rule Ra1 is more equitable among the different water uses, allocating the same minimum monthly percentage of the demands.

Runoff in the Metztlán River Basin, in normal conditions of availability (scenario ESAS-N), is insufficient to cover all the demands of the system when environmental use is taken into account.

—End of the English version—

-----*

T. Petr (eds). Proc. Second Int. Symp. Manage. Large Rivers for Fisheries Volume II. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand. RAP Publication 2004/17. pp: 37-65.

Brown, C., and J. King. 2003. Environmental flows: Concepts and methods. *In*: Davis, R., and Hirji, R. (eds). Water Resources and Environment Technical Note C.1. The World Bank. Washington, D. C. 28 p.

Caissie, J., D. Caissie, and N. El-Jabi. 2014. Hydrologically based environmental flow methods applied to rivers in

- the maritime provinces (Canada). *River Res. Applic.* DOI: 10.1002/rra.2772.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2005. Gerencia del distrito de riego 028 Tulancingo. Hidalgo, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006a. Registro Público de Derechos de Agua. México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006b. Gerencia del distrito de riego 008 Metztitlán. Hidalgo, México.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2014. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. México, D. F. 222 p.
- Devi, S., D. K. Srivastava, and C. Mohan. 2005. Optimal water allocation for the transboundary Subarnarekha River, India. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 131: 253-269.
- Doppler, W., A. Z. Salman, E. K. Al-Karablieh, and H.-P. Wolff. 2002. The impact of water price strategies on the allocation of irrigation water: the case of the Jordan Valley. *Agric. Water Manage.* 55: 171-182.
- Draper, A. J., M. W. Jenkins, K. W. Kirby, J. R. Lund, and R. E. Howitt. 2003. Economic-engineering optimization for California water management. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 129: 155-164.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Quinta edición. Instituto de Geografía – UNAM. México, D. F. 90 p.
- Han, Y., Y.-F. Huang, G.-Q. Wang, and I. Maqsood. 2011. A multi-objective linear programming model with interval parameters for water resources allocation in Dalian City. *Water Resour. Manage.* 25: 449-463.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2006. Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS). Colección de discos compactos. México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2012. Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y cobertura vegetal 1: 250 000. Aguascalientes, Ags., México.
- Kite, G. W. 1988. Frequency and Risk Analyses in Hydrology. Fourth printing. Water Resources Publications. Colorado. 257 p.
- Matondo, J. I. 2001. Water resources planning and management for sustainable development: the missing link. *In: Memoria del 2nd WARSFA/WaterNet Symp.: Integ. Water Resour. Manage.: Theory, Practice, Cases.* 30 and 31 October. Bellville, Cape Town, South Africa. pp: 210-221.
- Mazvimavi, D., E. Madamombe, H. Makurira. 2007. Assessment of environmental flow requirements for river basin planning in Zimbabwe. *Phys. and Chem. Earth* 32: 995-1006.
- Ortiz G. R. 2007. Planeación del uso de los recursos hídricos superficiales en cuencas hidrológicas, estudio de caso: cuenca del río Metztitlán, Hidalgo, México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Estado de México. 225 p.
- Pastor, A. V., F. Ludwig, H. Biemans, H. Hoff, and P. Kabat. 2014. Accounting for environmental flow requirements in global water assessments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18: 5041–5059.
- Rosenthal, R. E. 2013. GAMS — A user's guide. GAMS Development Corporation. Washington, D. C. 304 p.
- Salman, A. Z., E. K. Al-Karablieh, and F. M. Fisher. 2001. An inter seasonal agricultural water allocation system (SAWAS). *Agri. Syst.* 68: 233-252.
- Shiau, J.-T., and F.-C. Wu. 2009. Regionalization of natural flow regime: application to environmental flow optimization at ungauged sites. *River Res. Applic.* 25: 1071-1089.
- Shiau, J.-T., and F.-C. Wu. 2010. A dual active restrictive approach to incorporating environmental flow targets into existing reservoir operation rules. *Water Resour. Res.* 46 (8): W08515, doi:10.1029/2009WR008765.
- Tennant, D. L. 1976. Instream flow regimes for fish, wildlife, recreation and related environmental resources. *Fisheries* 1: 6-10.
- 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 Res. Applic.* 19: 397-441.
- USDM (United States Drought Monitor). 2013. U. S. Drought Monitor Classification Scheme. <http://droughtmonitor.unl.edu/AboutUs/ClassificationScheme.aspx>. (Consulta: enero 2013).
- Wallace, J. S., M. C. Acreman, and C. A. Sullivan. 2003. The sharing of water between society and ecosystems: from conflict to catchment-based co-management. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B.* 358: 2011–2026.
- Wang, J. F., G. D. Cheng, Y. G. Gao, A. H. Long, Z. M. Xu, X. Li, H. Chen, and T. Barker. 2008. Optimal water resource allocation in arid and semi-arid areas. *Water Resour. Manage.* 22 (2): 239–258 DOI 10.1007/s11269-007-9155-2.