

# Impacto del cambio climático global en la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México

Juan Suárez Sánchez<sup>1,5</sup>, Hipólito Muñoz Nava<sup>2,5</sup>, Saturnino Orozco Flores<sup>2,5</sup>, Gerardo Sánchez Torres Esqueda<sup>3</sup>, Walter Ritter Ortíz<sup>1,4,5</sup>, Miguel F. Carreón Coca<sup>5</sup>, Ma. Lourdes Muñoz Castañeda<sup>1</sup> y Juana M. Treviño Trujillo<sup>3</sup>

*1 Laboratorio de Medio Ambiente. Facultad de Agrobiología. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México*

*2 Laboratorio de Ciencias Ambientales. Centro de Investigación en Ciencias Biológicas. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México*

*3 Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Campus Tampico, México*

*4 Área de Bioclimatología. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.*

*5 Maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Agrobiología. Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México*

*jsuarezs71@hotmail.com*

*Recibido para evaluación: 11 de Noviembre de 2007/Aceptación: 06 de Mayo de 2008 / Versión Final: 27 de Mayo de 2008*

## Resumen

El conocimiento de la disponibilidad de agua es un elemento clave para su manejo y administración. En este trabajo se determinó la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan con base en la delimitación del área de estudio en unidades de trabajo, el crecimiento poblacional y el efecto del Cambio Climático Global (CCG) sobre la precipitación pluvial estimada con el modelo climático regional (HadRCM). Con la información generada, con los datos del 2005 como año base y con las características del área de estudio, se desarrolló un modelo de simulación en WEAP (Water Evaluation And Planning System) para generar un escenario futuro de la demanda y disponibilidad de agua, a 10 años. Los resultados muestran que habrá una reducción de la precipitación pluvial y del almacenamiento del acuífero de 6% y 13.8%, respectivamente. Por otro lado, la demanda de agua en la subcuenca aumentará 25.4%, con una marcada diferencia entre el norte y el sur, debido a que en esta última área se concentra la mayor parte de la población y se ubica la agricultura de riego. Los valores de precipitación, disponibilidad y demanda de agua generados con el modelo WEAP presentan las mismas tendencias que los reportados en la literatura consultada.

**Palabras Clave:** Río Zahuapan, WEAP, HadRCM, Disponibilidad de agua, Cambio climático global.

## Abstract

Water availability awareness is a fundamental factor for running and handling it. Water availability for the Zahuapan River subSub-basin, was determined based on the partition of the study region in work units, population growth, and global warming effect on rainfall calculated with a regional climate model (HadRCM). In the light of yielded data, the 2005 as base year field of study features, a model was develop in WEAP (Water Evaluation And Planning System) to generate scenarios of supply and demand of water ten years ahead. Results exhibit that rainfall will dwindle to 6% and water storage to 13.8 %, with a remarkable difference between north and south, owing to a greater part of the population concentrated in this latter area and irrigational cropping. On the other hand, water demand will rise to 25.4%. The rainfall values of water rendered by the WEAP model present similar trends to those accounted in the referred literature.

**Key Words:** Zahuapan River , WEAP, HadRCM, Water supply, Global warming.

## 1. Introducción

El volumen de agua en la tierra es de 1 400 millones de kilómetros cúbicos, pero de ésta solo el 2.5%, es decir 35 millones de kilómetros cúbicos, es agua dulce. La mayor parte del agua dulce en el planeta se encuentra en nieves, hielos o en profundos acuíferos. Por lo que las fuentes de agua para uso humano provienen de ríos, lagos y subterránea poco profunda, cuya renovabilidad depende de los procesos de evaporación y precipitación (Jacobo y Saborio, 2004).

En México la disponibilidad de agua en el sureste es 7 veces mayor que en el resto del país. No obstante que en el centro-norte-noreste se asienta el 77% de la población y se genera el 85% del Producto Interno Bruto (PIB), cuenta sólo con el 32% de la disponibilidad del agua (SEMARNAT, 2005). Esto ha generado una gran problemática sobre el abastecimiento de agua a las poblaciones aunado a esto, de las proyecciones del IPCC (2008), se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por la escasez de los recursos hídricos.

En las últimas décadas se han desarrollado metodologías con un enfoque holístico para el estudio de problemas de este tipo. Tal es el caso del análisis de sistemas y simulación, metodología que se propone para estudiar el estado actual y la generación de escenarios futuros del recurso hídrico en la subcuenca del río Zahuapan en el Estado de Tlaxcala. Esta metodología ha funcionado principalmente en el estudio de sistemas donde se tiene poca información y donde las metodologías tradicionales de optimización no han tenido éxito (Ritter, 2004). La metodología consiste en realizar modelos de simulación del sistema y después experimentar en los modelos las diferentes acciones de solución, identificando los puntos de palanca en el modelo y utilizándolos para incidir en ellos y poder influir en el comportamiento del sistema (Grant et al 2001). Estas metodologías se han empleado en diversas áreas, entre ellas el estudio del recurso agua en las cuencas hidrológicas para determinar la capacidad de carga del sistema producción-consumo de agua en zonas urbanas (Sueishi et al 1986), en la simulación de la recarga de acuíferos (Bogena et al 2005), en la predicción del flujo del acuífero en dos dimensiones (Zhaoa et al 2005), para simular los patrones de disponibilidad de agua

y consumo urbano mundial entre los años 2000 y 2015 (Jenerette y Larsen, 2006), en la optimización del manejo del recurso agua (Kondili y Kaldellis, 2006), para manejar el recurso hídrico bajo incertidumbre (Li et al 2008) y para el manejo con eficiencia económica del uso del agua en un contexto de competencias sobre recursos escasos (Pulido et al 2008).

El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto del crecimiento poblacional y del cambio climático global, en la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México.

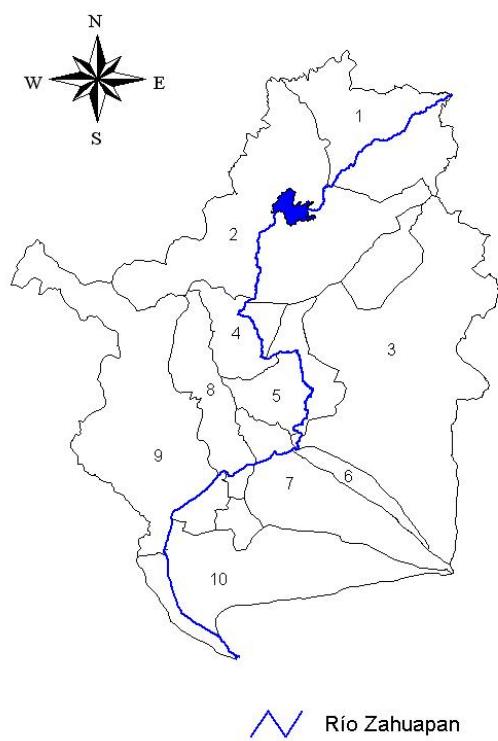
## 2. Metodología

En el estado de Tlaxcala existen cuatro subcuencas: Soltepec (RH-26 PANUCO, Cuenca Valle de México), E. Zapata (RH-27 TUXPAN-NAUTLA, Cuenca Río Tecolutla), Huamantla (RH-18 BALSAS, Cuenca endorreica Libres-Oriental) y Alto Balsas (RH-18 BALSAS, Cuenca ríos Atoyac-Zahuapan). La subcuenca del Río Zahuapan es la más grande de éstas, con una extensión de 1,725.524 km<sup>2</sup>, ubicada en la parte central del Estado y presenta un patrón de drenaje complejo. Ésta se divide en 110 microcuencas, de diferentes tamaños. El Río Zahuapan, que le da el nombre, cruza por la parte central de la misma de norte a sur (Figura 1). En esta subcuenca habitan 637.577 personas en 160 comunidades con más de 100 habitantes (INEGI, 2005). Hay 15 centros urbanos con más de 10.000 habitantes, en los que residen 360.372 (56.5% del total de la subcuenca). Destacan por su tamaño poblacional, las Ciudades de Tlaxcala, Apizaco, Chiautempan, Zacatelco y Contla de Juan Cuamatzi, con 73,213; 56,454; 44,561; 31,700 y 22,646 habitantes respectivamente (Suárez, 2006a).

La subcuenca del río Zahuapan está conformada principalmente por montes, barrancas y pequeñas llanuras, en este tipo de geomorfología se forma una gran cantidad de microcuencas, por lo que es necesario realizar una agrupación de éstas para reducir la el nivel de complejidad en la representación del sistema. Se agruparon las microcuencas, tomando como criterio su pertenencia al área de captación comprendida entre dos tributarios perennes; de esta manera se identificaron 10 grupos o unidades espaciales de trabajo (Figura 2 y Tabla 1).



**Figura 1.** Delimitación y ubicación de la subcuenca, sus microcuenca y el Río Zahuapan, en el Estado de Tlaxcala, México.

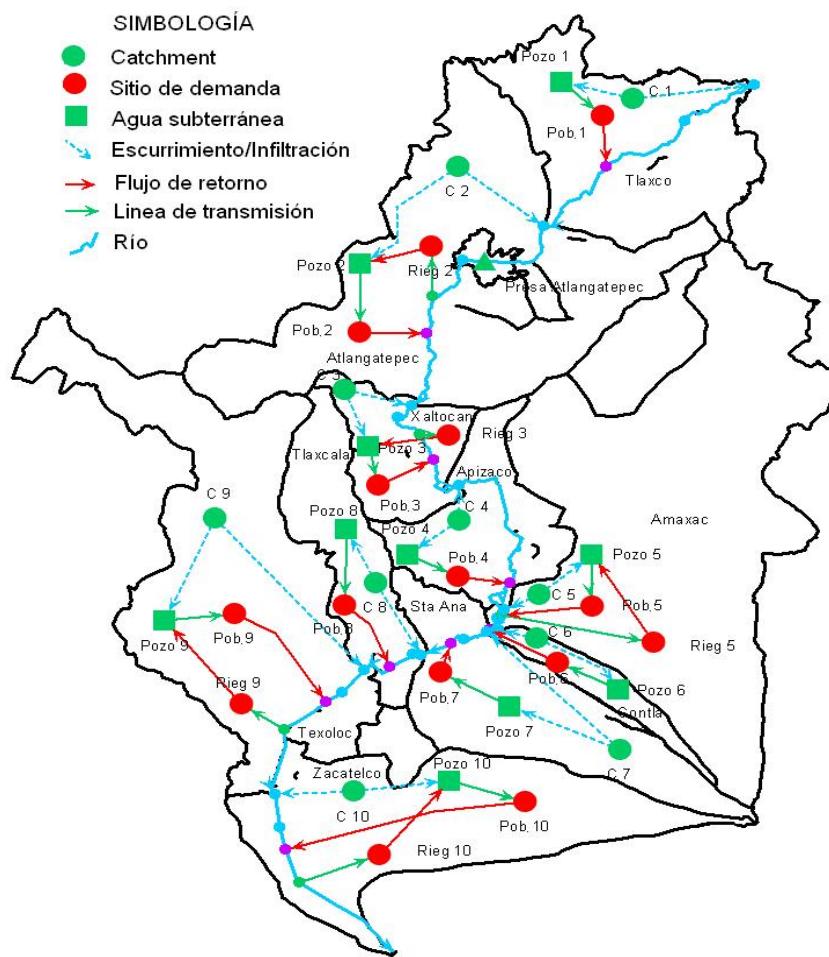


**Figura 2.** Delimitación de las unidades de trabajo de la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México.

**Tabla 1.** Área, población y densidad, de las unidades de trabajo en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México.

Unidad de trabajo	Área (km <sup>2</sup> )	Población (habitantes)	Densidad (hab/km <sup>2</sup> )
1	142.335	17873	125.6
2	281.903	7115	25.2
3	358.614	88915	247.9
4	53.593	8833	164.8
5	74.886	82621	1103.3
6	23.158	3420	147.7
7	117.159	108400	925.2
8	73.540	72441	985.1
9	250.123	73125	292.3
10	173.310	108241	624.5

Se desarrolló un modelo de simulación de la disponibilidad de agua utilizando el software WEAP21 (Water Evaluation And Planning System), este programa funciona mediante el principio básico de balance de masa y emplea ecuaciones en diferencia para la simulación en la planificación integrada de los recursos hídricos (Suárez, 2006b). Las principales limitaciones de este software es la escala de tiempo, la cual está limitada a meses y años; y la interrelación rígida entre sus módulos. La estructura espacial del modelo se desarrolló asignando a cada unidad de trabajo dos nodos, la población y la agricultura de riego, que representan los sitios de demanda de agua. En esta subcuenca la población utiliza agua subterránea para satisfacer sus demandas y emplean agua del río para la producción agrícola. El flujo de retorno de los sitios de demanda hacia el río y el acuífero se representó mediante un tramo. Un nodo (área de captación) para representar los procesos de escurrimiento, evapotranspiración e infiltración, que por el tipo de información con la que se dispuso en este trabajo se empleó el método de escurrimiento de la FAO (1990), (WEAP, 2007). Y otro nodo (acuífero) para representar el agua subterránea (Figura 3).



**Figura 3.** Esquema del modelo de simulación espacio temporal de la disponibilidad de agua en la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México.

**Tabla 2.** Uso de suelo en cada unidad de trabajo de la subcuenca del Río Zahuapan, Tlaxcala, México

Unidad de trabajo	Agricultura Temporal (Km <sup>2</sup> )	Agricultura Riego (Km <sup>2</sup> )	Erosión (Km <sup>2</sup> )	Bosque (Km <sup>2</sup> )	Pastizal (Km <sup>2</sup> )	Pradera (Km <sup>2</sup> )	Chaparral (Km <sup>2</sup> )
1	65.142	0	14.7	53.874	0	0	0
2	190.828	34.364	25.519	8.799	21.766	0	0
3	254.647	14.081	24.439	33.745	18.239	0.0770	13.365
4	36.456	0	17.137	0	0	0	0
5	51.933	0.000016	20.501	0	0	0	2.452
6	19.576	0	1.847	1.735	0	0	0
7	75.871	0	9.805	21.874	1.647	0.7094	7.252
8	38.188	0	4.586	24.774	0	0	5.991
9	167.571	13.5	28.189	21.817	11.514	0	7.503
10	116.398	31.302	11.142	7.384	6.412	0.4920	0
Total	1016.610	93.247	157.865	174.002	59.578	1.2784	36.563

La información más reciente y completa para las variables del modelo es la del año 2005, éste se tomó como año base, por lo que toda la información descrita a continuación pertenece exclusivamente a ese año.

Para cada unidad de trabajo la actividad anual de la población se representó por el número de habitantes, la tasa de uso de agua para la región en estudio fue de  $109.5 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (Castillo, 2006), considerando una variación mensual tipo normal con su máximo en la época primavera-verano y una pérdida del sistema del 70%. La actividad anual agrícola para el área en estudio se representó por la superficie cultivada y la tasa de uso de agua igual a  $193.25 \text{ m}^3 \text{ Ha}^{-1}$  (Halfacre y Barden, 1992), considerando una variación mensual tipo normal con su máximo en las épocas de otoño-invierno, con una pérdida del sistema igual al de la población.

Los usos de suelo en las áreas de captación se representaron por su área, de acuerdo a la información contenida en las cartas digitales escala 1: 50 000 (INEGI, 2005) (Tabla 2). El coeficiente del cultivo ( $K_c$ ) se obtuvo de las tablas publicadas por la FAO (1990). Los datos mensuales promedio de la precipitación pluvial se obtuvieron de los registros de cuatro estaciones climatológicas de la red de la CONAGUA-TLAXCALA, distribuidas dentro de la subcuenca. La evapotranspiración potencial se calculó por el método de Thornwithe (Torres, 1995), utilizando la temperatura promedio mensual.

La precipitación efectiva para suelos erosionados y poblados fue de 5%; para el área agrícola 15%; para pastizal, chaparral y pradera de 25%; y para bosque de 30% (Díaz, 2005). La producción potencial para los diferentes tipos de cubierta vegetal fue de  $100 \text{ Kg Ha}^{-1}$  para el suelo erosionado,  $4\,300 \text{ Kg Ha}^{-1}$  para las áreas agrícolas,  $5\,555.55 \text{ Ha}^{-1}$  para pradera, pastizal y chaparral, y  $11\,960 \text{ Kg Ha}^{-1}$  para bosque (Odum, 1998).

Se consideró la existencia de un solo acuífero en toda la subcuenca (Castillo, 2006) con almacenamiento inicial desconocido, capacidad de almacenamiento y máxima extracción ilimitadas.

Con el modelo WEAP desarrollado se generó un escenario a 10 años, a partir del año base, del impacto del crecimiento poblacional y el Cambio Climático Global (CCG), sobre la demanda y disponibilidad de agua en la subcuenca en estudio.

Para ello, se recopilaron las tasas de crecimiento poblacional para el año base, de las localidades ubicadas en cada unidad de trabajo publicadas por INEGI (2005), las poblaciones a 10 años se calcularon empleando el método que utiliza el Consejo Nacional de Población de México (CONAPO, 2008). Se generaron proyecciones de la precipitación pluvial mensual para los diez años de la simulación, para cada unidad de trabajo, utilizando el Modelo Climático Regional HadRCM (PRECIS; 2008). Para generar estas proyecciones, el modelo considera dos periodos de tiempos, el primero de datos registrados (control) y el segundo calculado (salidas perturbadas) con base en el escenario de emisiones de gases efecto invernadero (SRES A2). Este modelo genera una imagen de isoyetas para el área en estudio y sobreponiendo las unidades de trabajo, se compatibilizaron los valores de precipitación para cada unidad.

### 3. Resultados y discusión

Actualmente se captan en promedio en la subcuenca del Zahuapan 779.6 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$  de agua de lluvia. Con un gradiente de variación de norte a sur en su distribución espacial de 700 mm a 1000 mm. Los escurrimientos en el norte de la subcuenca, en las unidades del uno al seis, son mayores a los del sur. En el norte se presentan escurrimientos promedios anuales de  $350\,000 \text{ m}^3 \text{ Km}^{-2}$  y en el sur de 300 000. Esto debido a que en el norte de la subcuenca la topografía está conformada principalmente de lomeríos, contrario al sur que predominan planicies.

En relación al consumo de agua en la subcuenca del Zahuapan, las actividades humanas, demandan actualmente para uso doméstico y agricultura de riego, 40.2 millones de  $\text{m}^3 \text{ año}^{-1}$ . La mayor demanda de agua se ubica al sur (88%), en las unidades de trabajo 5, 7, 8, 9 y 10, que corresponden a la zona con mayor densidad de población (Tabla 1) y donde se practica la agricultura intensiva. Por el contrario, al norte, la demanda de agua es menor (12%), debido a la baja densidad poblacional y a la práctica de agricultura de temporal.

De continuar los mismos patrones de comportamiento en el uso del agua (doméstico y agrícola) y crecimiento poblacional en la subcuenca bajo estudio, el escenario a diez años, simulado

con el modelo WEAP y HadRCM, muestra que la precipitación pluvial disminuirá en un orden del 6%, esto representa una reducción de la captación en la subcuenca de 44.5 millones m<sup>3</sup> aproximadamente. Por otro lado la simulación con WEAP mostró que la demanda de agua se incrementará en un orden del 25.4%, equivalente a 10.2 millones de m<sup>3</sup> de agua. En este sentido, el almacenamiento en el acuífero disminuirá en un orden del 13.8%, lo cual representa 44.4 millones m<sup>3</sup> aproximadamente. Es importante señalar que la disminución en el almacenamiento del acuífero es el resultado del efecto combinado del incremento en la demanda de agua y la disminución de la precipitación pluvial. El valor de la disponibilidad de agua per cápita pasará de 1.165,34 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> a 873,77, lo que representa una disminución del 25%. Cabe destacar que el valor de la disponibilidad de agua simulado se encuentra dentro del intervalo de valores publicados por la CONAGUA (2006). El valor simulado de la disponibilidad de agua per cápita a 10 años, se considera como una de condición de estrés hídrico (SEMARNAT, 2005).

Los valores del año base 2005, de precipitación, disponibilidad y demanda de agua en la subcuenca en estudio, publicados por CONAGUA (2006), mostraron un buen ajuste con los simulados por el modelo WEAP. Esto permite establecer que los escenarios generados pueden considerarse también válidos, bajo los criterios utilizados en este trabajo.

## 4. Conclusiones

En la subcuenca del Zahuapan se captan en promedio 779,6 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup> de agua de lluvia. Los escurrimientos en el norte son mayores que en el sur.

La demanda de agua por uso doméstico y agricultura de riego es de 40.2 millones de m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>. Debido a que en el sur de la subcuenca se asienta la mayor parte de la población y se práctica la agricultura de riego, esta área demanda el 88% del total.

De continuar los mismos patrones de comportamiento en el uso del agua (doméstico y agrícola) y crecimiento poblacional en la subcuenca bajo estudio, se espera a 10 años que:

- La precipitación pluvial disminuya en un orden del 6%

con respecto al año base (2005), esto representa una reducción de la captación en la subcuenca de 44.5 millones m<sup>3</sup> aproximadamente.

- La demanda de agua se incremente en un orden del 25.4% con respecto al año base, equivalente a 10.2 millones de m<sup>3</sup> de agua.
- El almacenamiento en el acuífero disminuya en un orden del 13.8% con respecto al año base, lo cual representa 44.4 millones m<sup>3</sup> aproximadamente. Es importante señalar que la reducción en el almacenamiento del acuífero es el resultado del efecto combinado del incremento en la demanda de agua y la disminución de la precipitación pluvial.
- El valor de la disponibilidad de agua per cápita pase de 1 165.34 a 873.77 m<sup>3</sup> hab<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que representa una disminución del 25%.

Con base en estas conclusiones, es evidente la necesidad de emprender acciones orientadas hacia el manejo sostenible de esta subcuenca, basadas en investigaciones científicas, que permitan la preservación del recurso hídrico.

## Agradecimientos

Trabajo realizado con el apoyo de FOMIX CONACYT-GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA. Clave TLAX-2004-C01-27.

## Bibliografía

Bogenaa, H.; Kunkela, R.; Schöbelb, T.; Schreyb, H. P. y Wendlanda, F., 2005. Distributed modeling of groundwater recharge at the macroscale. Ecological Modelling. Volume 187, Issue 1, pp. 15-26.

Castillo, 2006. El Agua En Tlaxcala. I Congreso Nacional de Medio Ambiente. Tlaxcala, México. Conferencia.

CONAGUA, 2006. Comisión Nacional del Agua. En Internet: [<http://www.conagua.gob.mx/conagua/Default.aspx>].

Consultado en junio de 2008.

CONAPO, 2008. Proyección de la población de México de 2005-2050. Consejo Nacional de Población. En Internet: [<http://www.conapo.gob.mx/00cifras/5.htm>]. Consultado en junio de 2008.

Díaz, F. E., 2005. Interceptación pluvial por plantaciones de *Pinnus michoacana*, encinar y pastizal en la zona baja de la cuenca. Tesis Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 100 P.

FAO, 1990. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. En [<http://www.fao.org/>]. Consultado en septiembre de 2007.

Grant, W. E.; Marín, S. L. y Pedersen, E. K., 2001. Ecología y manejo de recursos naturales: análisis de sistemas y simulación. Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura (IICA). 340 P.

Halfacre y Barden, 1992. Horticultura. AGT Editor S. A. 727 P.

INEGI, 2005. Censo población. En [<http://www.inegi.gob.mx/>]. Consultado en septiembre de 2007.

IPCC, 2008. Cambio Climático 2007. Informe de síntesis. Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 103 P.

Jacobo, V. y Saborio, E., 2004. La gestión del agua en México; Los retos para el desarrollo sustentable. Miguel Ángel Porrua, Ed. México. 375 P.

Jenerette, G. D. y Larsen, L., 2006. A global perspective on changing sustainable urban water supplies. Global and Planetary Change. Volume 50, Issues 3-4, April, pp. 202-211.

Kondili, E. y Kaldelis, J. K., 2006. Model development for the optimal water systems planning. Computer Aided Chemical Engineering. Volume 21, Part 2, pp. 1851- 1856.

Li, Y. P; Huang, G. H.; Yang, Z. F. y Nie, S. L., 2008. IFMP: multistage programming for water resources management under uncertainty. Resources, Conservation and Recycling. Resources Conservation and Recycling. Volume 52, issue 5 March. pp. 800-812.

Odum E. P. y Sarmiento, F. O., 1998. Ecología. El puente entre ciencia y sociedad. McGraw-Hill Interamericana. México.

PRECIS, 2008. Modelo climático regional HadRCM. En [<http://precis.insmet.cu/Precis-Caribe.htm>]. Consultado en junio de 2008.

Pulido, V. M.; Andreu, D.; Sahuquillo, A. y Pulido, D., 2008. Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity cost of water use in Spain.

Ritter, O. W., 2004. Primer Informe. Impacto Ambiental de la Construcción del Proyecto Hidroeléctrico en La Parota, Guerrero. UNAM. 148 P.

SEMARNAT, 2005. Manual de Sistemas de Manejo Ambiental. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera Edición. 112 P.

Suaréz, S. J., 2006a. Informe I del proyecto: Análisis y simulación espacio-temporal de los contaminantes del río Zahuapan, Tlaxcala. FOMIX TLAX-2004-C01-27.

Suaréz, S. J. 2006b. Informe II del proyecto: Análisis y simulación espacio-temporal de los contaminantes del río Zahuapan, Tlaxcala. FOMIX TLAX-2004-C01-27.

Sueishi, T.; Morioka, T. y Rouviere, C., 1986. Analysis and cartographical approach to the regional water utilization system in the Yodo River basin. Ecological Modelling. Volume 31, Issues 1-4. pp. 315-327.

Torres, R. E., 1995. Agrometeorología. Trillas. México. 154 P.

WEAP, 2007. Water Evaluation and Planning System. Stockholm Environment Institute-Boston Tellus Institute.

Zhaoa, C.; Wangb, Y.; Chena, X. y Baoguo L., 2005. Simulation of the effects of groundwater level on vegetation change by combining FEFLOW software. Ecological Modelling. Volume 187, Issues 2-3. pp. 341-351.

