

# El cambio climático y la disponibilidad agua en sub-cuencas del Valle del Mezquital, México

Silvia Chamizo-Checa<sup>1,2</sup>, Elena Otazo-Sánchez<sup>1</sup>, Alberto J. Gordillo-Martínez<sup>1</sup>, César A. González-Ramírez<sup>1</sup>, Juan Suárez-Sánchez<sup>2</sup>, Hipólito Muñoz-Nava<sup>2</sup>

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería<sup>1</sup>, Facultad de Agrobiología<sup>2</sup>  
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo<sup>1</sup>, Universidad Autónoma de Tlaxcala<sup>2</sup>  
Pachuca de Soto, Hgo.<sup>1</sup>; Tlaxcala, Tlax.<sup>2</sup>; México  
[profe\_4339, gordillo]@uaeh.edu.mx, [silchamiz, elenamariaotazo]@gmail.com

**Abstract**— The Mezquital Valley receives Mexico Megacity untreated sewage for more than 100 years, used for agricultural irrigation. This unsustainable practice allowed the food production and industrial development of this semi-arid area with high social marginality. The paper reports freshwater availabilities scenarios with growing population and climate change conditions in the Mezquital Valley and six sub-catchments for 2005 as the base year and 2017, 2030, 2050. The hydrological variables were calculated by WEAP. The inertial scenario considered the growing population, and the 2050 prediction will be absolute water shortage conditions in Salado, El Salto-Tepejí, and Actopan; Tula will have shortage situation. The climate change and growing population perturbations will reduce the water availability in the Mezquital Valley by 10%.

**Keywords**— freshwater availability, climate change, WEAP, Mezquital Valley, scenarios, sub-basins

**Resumen**— El Valle del Mezquital recibe las aguas negras sin tratar de la Megaciudad de México por más de 100 años, utilizado para riego agrícola. Práctica insostenible que favoreció la producción de alimentos y desarrollo industrial de esta zona semiárida con alta marginalidad. El objetivo del trabajo consistió en analizar los efectos del crecimiento poblacional y cambio climático en la disponibilidad natural media del agua en el valle y seis sub-cuencas para 2005 (año base), 2017, 2030 y 2050. Los parámetros hidrológicos se calcularon con WEAP. El escenario inercial consideró el crecimiento poblacional que predice en 2050 escasez aguda absoluta en Salado, El Salto-Tepejí y Actopan; y Tula con escasez hídrica. Sumado al cambio climático, disminuirá un 10% la disponibilidad de agua.

**Palabras claves**— disponibilidad natural media per cápita del agua, cambio climático, WEAP, Valle del Mezquital. Escenarios, subcuencas.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial para las actividades humanas, como son la producción de alimentos, el desarrollo de la industria, la generación de energía, entre otros (Narula y Gosain, 2013). La precipitación suministra los recursos hídricos renovables dentro de una cuenca como parte elemental del ciclo del agua, y es uno de los parámetros más afectados por el aumento de la temperatura global (Harding et al., 2014).

La precipitación es el componente principal para la recarga del agua subterránea por infiltración a través del suelo, otra parte de ésta fluye sobre la superficie hacia los cuerpos de agua de la zona, y el resto se evapotranspira. El cálculo de la evapotranspiración es esencial para realizar un apropiado balance hídrico (Brooks et al., 2013). Este cálculo determina las variaciones de almacenamiento de agua dentro de una región, teniendo en cuenta las entradas y salidas de agua, siguiendo la ley de conservación de la masa.

En los últimos 20 años se han desarrollado muchos índices para evaluar cuantitativamente la vulnerabilidad de los recursos hídricos (por ejemplo, escasez de agua o estrés hídrico). La escasez de agua renovable se describe comúnmente en función de los recursos hídricos disponibles y la población humana con acceso a los mismos. Estas cifras se expresan como volumen de agua anual per cápita. El

agua renovable que está disponible para cada persona sirve como una medida del acceso al agua (Brown and Matlock, 2011).

El modelo de simulación de Evaluación y Planificación del agua (WEAP por sus siglas en inglés), cuenta con una estructura eficiente para generar escenarios de disponibilidad y demanda de agua a corto, mediano y largo plazo (Yates et al., 2005).

WEAP apoya la planificación de recursos hídricos balanceando la oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de sub-cuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta). La plataforma emplea una paleta de diferentes objetos y procedimientos accesibles a través de una interfaz gráfica que puede ser usada para analizar un amplio rango de temas e incertidumbres, incluyendo aquellos relacionados con el clima, condiciones de la cuenca, proyecciones de demanda, condiciones regulatorias, objetivos de operación e infraestructura disponible. A diferencia de otros modelos de recursos hídricos típicos basados en modelación hidrológica externa, WEAP es un modelo forzado por variables climáticas. Esta plataforma es ideal para realizar estudios de cambio climático, en los que es importante estimar cambios en la oferta de agua (cambios en la precipitación proyectados) (CCG-UC & SEI, 2009).

De acuerdo con los estudios realizados por la Comisión Nacional del agua para la región del Río Tula se determinó una disponibilidad de 1,522 m<sup>3</sup>/hab para el año 2005 (CONAGUA, 2006). Sin embargo, hasta el momento no existen estudios prospectivos a nivel de sub-cuenca. Por lo cual, este trabajo se enfoca en generar información relevante de las condiciones hídricas futuras de la sub-cuencas una zona semiárida, el Valle del Mezquital, basadas en el aumento de población, la temperatura y la disminución de la precipitación, que sirva a los tomadores de decisiones para establecer políticas oportunas para el manejo del agua a nivel local.

## II. ZONA DE ESTUDIO

El Valle del Mezquital se ubica dentro del límite sudoeste del estado de Hidalgo (latitud norte 20° 02' y longitud oeste 99° 15'). Está situado en lo alto de la meseta mexicana a 60 km de la Ciudad de México. La superficie total que abarca esta cuenca es de 5045 km<sup>2</sup>, con una pendiente promedio del 15.8%, a una altura de 2040 metros sobre el nivel del mar, y está integrada por seis sub-cuencas.

La división de la zona en sub-cuencas de captación pluvial, se realizó por primera vez en esta investigación, mediante el procesando de un mapa vectorial del Modelo Digital de elevación del Estado de Hidalgo, disponible en la página oficial del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI), con Sistemas de Información Geográfica (QGIS-GRASS) e identificando áreas principales de drenado de escorrentía de agua de lluvia (Figura 1). Políticamente, este Valle abarca 24 de los 84 municipios que conforman al estado de Hidalgo (González-Méndez et al., 2015).

La región del Valle del Mezquital junto con el Valle de México y el acuífero Soltepec del estado de Tlaxcala, pertenecen a la Región hidrológica administrativa XIII, denominada "Aguas del Valle de México" (CONAGUA, 2013). En esta zona se localizan 170 cuerpos de agua superficiales, de los cuales sobresalen por su capacidad las presas Endhó, Requena, Vicente Guerrero y la Rojo Gómez (Rodarte et al., 2012) (Figura 1).

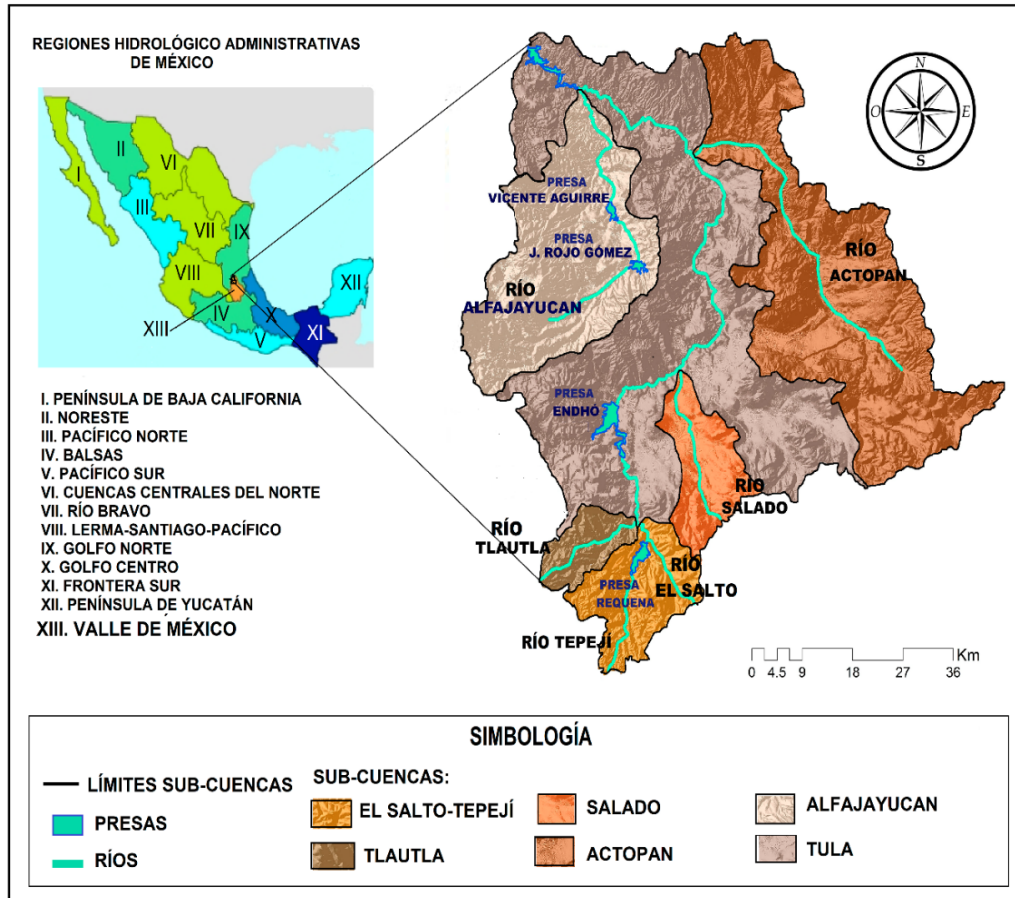


Fig. 1. Ubicación geográfica de las sub-cuencas del Valle del Mezquital, Hidalgo, México.

La corriente principal de agua superficial es el Río Tula, los Ríos secundarios más importantes son Tepeji, El Salto, Salado, Actopan, y Alfajayucan. Todos ellos fluyen del suroeste al noreste del Estado de Hidalgo. Es importante resaltar que tanto el río El Salto como el río Salado reciben anualmente más de 1500 Mm<sup>3</sup> de aguas negras provenientes de la zona metropolitana de la ciudad de México (ZMCM)

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### A. Estimación de parámetros del ciclo hidrológico (infiltración y escorrentía)

El cálculo de estas variables se realizó empleando el Modelo WEAP. La ejecución de esta plataforma requirió de base de datos homogénea de información climática (precipitación acumulada anual, temperatura media mensual, evapotranspiración acumulada mensual); cubierta vegetal y uso de suelo, así como características generales de las sub-cuencas como son superficie, pendiente del terreno, y estimación de coeficientes de infiltración y escorrentía (Yates et al., 2005). Los siguientes parámetros se calcularon para estimar la cantidad de agua renovable.

- a) *Coficiente de infiltración.* El "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" realizado por las Naciones Unidas, con colaboración de los gobiernos de El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y Costa Rica propusieron la ecuación 1, para el análisis del coeficiente de

infiltración, que corresponde a la fracción de lluvia que se infiltra: esta fórmula considera características de la zona, como son: cubierta vegetal, textura del suelo y pendiente del terreno (Gunther y Losilla, 2000).

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc} \quad (1)$$

Donde:  $C_i$  es el Coeficiente de infiltración,  $K_p$  es la fracción que infiltra por efecto de la pendiente,  $K_v$  es la fracción que se infiltra por efecto de la cobertura vegetal y  $K_{fc}$  es la fracción que se infiltra por efecto de textura del suelo

Para calcular el coeficiente de infiltración se utilizaron los datos de la tabla 1, a la fracción que infiltra por textura de suelo ( $K_{fc}$ ), se le asignaron valores entre 0.1 a 0.40; a la fracción que infiltra por efecto de la pendiente del terreno ( $K_p$ ) se le otorgaron valores entre 0.06 (mayor del 7%), y 0.3 (terrenos planos). La fracción que infiltra por efecto de la cubierta vegetal ( $K_v$ ) se ponderó en 0.10 (terrenos cultivados), 0.18 (cobertura con pastizal) y 0.2 (bosques).

b) Coeficiente de *escorrentía*. Este parámetro se calcula por diferencia de acuerdo a la ecuación 2:

$$C_e = 1 - C_i \quad (2)$$

Donde:  $C_e$  es el Coeficiente de *escorrentía* y  $C_i$  es el Coeficiente de infiltración

La tabla 2 muestra los coeficientes de infiltración y *escorrentía* estimados para cada sub-cuenca del Valle del Mezquital.

Tabla I. Superficie, cubiertas vegetal y uso de suelo de las sub-cuencas del Valle del Mezquital

Sub-cuenca	Superficie (Km2)	Zona poblada (%)	Agricultura (%)		Pastizal (%)	Bosque y matorral (%)	Cuerpos de agua
			Riego	Tempo real			
El Salto-Tepeji	260	8.5	12.8	23.1	33.5	21.0	1.2
Tlautla	172	9.0	14.4	22.6	33.0	21.0	0.0
Salado	275	21.0	38.0	15.0	5.5	20.5	0.0
Actopan	1320	7.0	11.0	27.0	8.0	47.0	0.0
Alfajayucan	850	1.2	12.0	22.0	25.0	39.0	0.8
Tula	2178	16.0	29.0	20.0	12.0	22.0	1.0
<b>Total/promedio</b>	<b>5045</b>	<b>10.5</b>	<b>18.8</b>	<b>23.8</b>	<b>17.6</b>	<b>28.8</b>	<b>0.5</b>

Tabla II. Parámetros para la estimación del coeficiente de escorrentía (Ce) e infiltración (Ci)

Sub-cuenca	Textura del suelo (%)			Pendiente (%)	Kv	Kp	Kfc	Ci	Ce
	Arenoso	Limoso	Arcilloso						
El Salto-Tepeji	35	60	5	22.3	0.17	0.06	0.32	0.55	0.46
Tlautla	28	68	4	18.7	0.12	0.06	0.33	0.51	0.49
Salado	30	67	3	10.0	0.17	0.06	0.33	0.56	0.44
Actopan	35	62	3	16.6	0.18	0.06	0.32	0.56	0.44
Alfajayucan	45	53	2	14.1	0.18	0.06	0.30	0.54	0.46
Tula	32	66	2	18.8	0.17	0.06	0.33	0.56	0.44
<b>Promedio</b>	34.16	62.6	3.17	16.7	0.10	0.18	0.32	0.61	0.39

c) *Evapotranspiración (ETo)*. La evapotranspiración de referencia (ETo) en unidades [mm día<sup>-1</sup>] se calculó a partir de la ecuación de Penman-Monteith de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization, FAO) que es un método estandarizado para el cálculo de la evapotranspiración. La ecuación 3 utiliza datos climáticos de radiación solar neta en la superficie del cultivo (Rn) en unidades [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], flujo de calor del suelo (G) [MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>], temperatura media del aire a 2 m de altura (T) [°C], humedad en términos de presión de vapor (es - ea) [kPa], velocidad del viento (u) [m s<sup>-1</sup>], γ es la constante psicrométrica [kPa °C<sup>-1</sup>] y Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C<sup>-1</sup>] (Majidi et al., 2015). El enfoque de Penman-Monteith incluye todos los parámetros que gobiernan el intercambio de energía y el flujo de calor de grandes extensiones de vegetación.

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u^2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u^2)} \tag{3}$$

d) *Precipitación*. Debido a que las estaciones meteorológicas de las sub-cuenclas no contienen información **completa** para un período mínimo de 20 años, se consideró que la precipitación y la temperatura son homogéneas para las áreas del Valle del Mezquital (CONAGUA, 2006). La información corresponde al promedio de una serie de datos históricos de 1980 al año 2004. La precipitación acumulada promedio anual en este Valle es de 525 mm. La Fig.2 muestra que la mayor parte de la lluvia se presenta en los meses de junio a septiembre (66%). Los meses donde la lluvia es más escasa son de noviembre a abril.

Aunque la lluvia del mes de mayo no es muy abundante, representa el 10% del total de la precipitación, y esta **misma** condición se presenta para el mes de octubre.

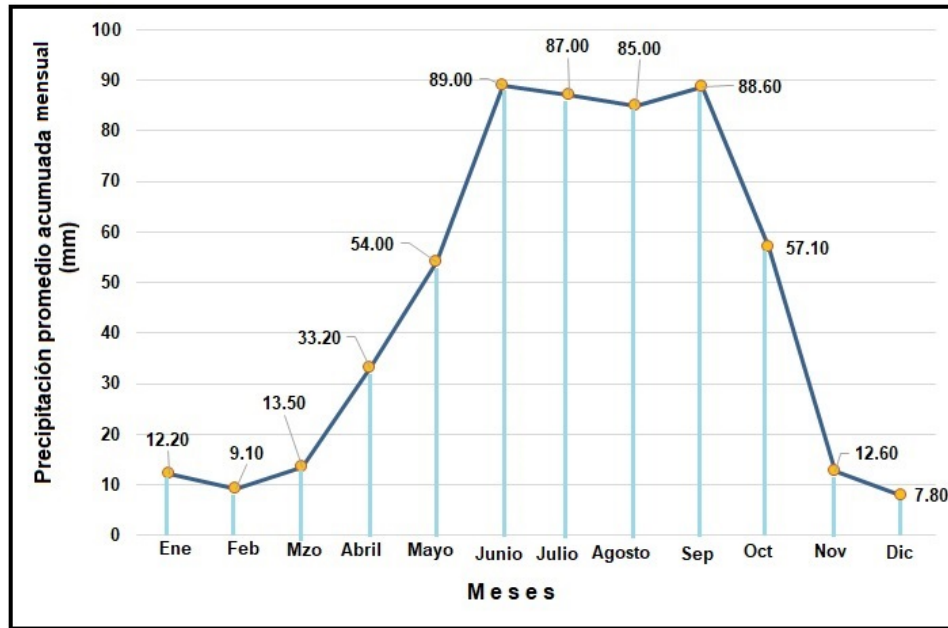


Fig. 2. Precipitación promedio acumulada mensual de la zona del Valle del Mezquital.

En la Fig.2 se observa claramente que al igual que en muchas otras regiones de México, en los meses de julio y agosto se presentan condiciones de sequía intraestival que se caracteriza por ser un periodo donde las lluvias que se presentan en verano disminuyen e incluso en ciertos días deja de llover.

e) *Temperatura media mensual.* Este parámetro oscila entre 13.4 °C y los 19 °C, los meses más cálidos son de abril a agosto y los más fríos de diciembre a febrero.

**B. Disponibilidad natural media per cápita de agua (DNM per cápita)**

La disponibilidad de agua renovable se calculó utilizando el indicador Falkenmark (Ver Tabla 3) que emplea la expresión de escasez con respecto a la recarga total de agua de lluvia, la cual se transforma en escurrimiento e infiltración (Ec. 4) (Brown & Matlock, 2011).

$$DNM \text{ per cápita} = \frac{\text{Recarga natural}}{\text{Número de habitantes}} \quad (4)$$

Tabla III. Clasificación de la disponibilidad natural media de agua

<i>DNM per cápita (m3/hab/año)</i>	<i>Clasificación</i>
1001 a 1700	Estrés hídrico
501 a 1000	Escasez hídrica
Menos de 500	Escasez aguda absoluta



### C. Generación de escenarios

Los escenarios de disponibilidad natural media per cápita se realizaron tomando como año base el 2005 y se generó información para los años 2017, 2030 y 2050.

#### a) Escenario Inercial: Crecimiento poblacional

Las proyecciones de población fueron obtenidas de las bases de datos de la CONAPO (Fernández-Ham et al., 2014). La tabla 4 muestra que la tasa de crecimiento anual en las sub-cuencas del Valle del Mezquital oscila entre 0.89 y 1.06. Para el año 2050 la población total de la zona se incrementará en un 48%.

#### b) Escenario ante el Cambio Climático (CC)

Este escenario involucra la reducción de la precipitación y el aumento de la temperatura. El PEACCH elaboró proyecciones climáticas para las regiones del estado de Hidalgo, estableciendo que la temperatura promedio aumentará 2 ° C entre 2005 y 2050 (Otazo et al., 2013). Además, Patiño-Gómez et al. (2012), informaron una disminución de la precipitación del 2% para el Valle de Mezquital entre 2000 y el año 2030 (0,06% por año).

Tabla IV. Proyecciones de población para las sub-cuencas del Valle del Mezquital

Sub-cuenca	Tasa (%) de crecimiento anual	Habitantes 2005	Proyecciones de población		
			2017	2030	2050
El Salto-Tepeji	0.98	73,484	82,126	91,487	109,419
Tlautla	0.89	11,629	12,870	14,216	16,747
Salado	0.89	105,946	117,261	129,519	152,573
Actopan	1.06	200,035	225,479	253,044	306,690
Alfajayucan	1.01	34,818	39,038	43,609	52,419
Tula	0.95	281,203	313,260	347,989	420,349
<b>Valle del Mezquital</b>	0.95	713, 455	796,847	887,193	1,058, 197

## IV. RESULTADOS

### A. Estimación de la Recarga natural del año base

En el año 2005, se capturaron en total 2290 Mm<sup>3</sup> de agua de lluvia en el Valle del Mezquital, de los cuales, el 38% se captó en la sub-cuenca del Río Tula, 28% en la sub-cuenca del Río Actopan, 19% en Alfajayucan y en el resto en las sub-cuencas más pequeñas del Valle (El Salto-Tepeji, Tlautla y Salado). Ver resultados en la tabla 5.

Tabla V. Parámetros hidrológicos calculados por el modelo WEAP para el Valle del Mezquital. Año base: 2005.

<i>Sub-cuenca</i>	<i>Captación anual agua de lluvia (Mm3)</i>	<i>Infiltración (Mm3)</i>	<i>Escorrentía (Mm3)</i>	<i>Recarga natural (Mm3)</i>
El Salto-Tepeji	110	16	11.6	27.6
Tlautla	73.3	10.7	7.7	18.4
Salado	112	14.3	10.3	24.6
Actopan	644	65.8	47.6	113.4
Alfajayucan	446	44.8	32.4	77.2
Río Tula	905	123.1	89.1	212.2
<b>TOTAL</b>	<b>2290.3</b>	<b>274.7</b>	<b>198.7</b>	<b>473.4</b>

En general, los valores de infiltración oscilaron entre un 10% a un 14.6% y el escurrimiento entre un 7.3 y 10.5%. Debido a que esta zona es semi-árida la evaporación es muy elevada, presentando en algunas subcuencas valores mayores al 70% del total de la lluvia que precipita. Los resultados obtenidos coincidieron con los reportados para la Cuenca del Valle de México (CONAGUA, 2006).

*B. Disponibilidad Natural Media per Cápita (DNMC). Año base 2005*

Las fracciones de infiltración y escorrentía de agua de lluvia para el Valle del Mezquital, fueron para el año base del orden de 473 Mm<sup>3</sup>, para un total de 711,450 personas.



Fig. 3. Disponibilidad natural media de agua. Año base: 2005



De acuerdo con la clasificación de Falkenmark, las sub-cuencas del Río El Salto-Tepeji y Salado tuvieron condiciones de escasez aguda absoluta con una disponibilidad menor a los 500 m<sup>3</sup>/hab/año; Tula y Actopan presentaron escasez hídrica (<1700 m<sup>3</sup>/hab/año), la sub-cuenca de Tlautla tuvo condiciones de estrés y la subcuenca de Alfajayucan no presentó estrés debido a que tienen pocos habitantes (Fig.3). La disponibilidad natural media per cápita para el Valle fue de 953 m<sup>3</sup>/hab/año, lo que ubicó a esta zona en situación de estrés hídrico.

C. Escenarios de DNMC ante el crecimiento poblacional

De acuerdo con los datos de las tablas 5 y 6, se calcularon los índices de estrés para cada una de las sub-cuencas del Valle, encontrando que las condiciones de las sub-cuencas continúan similares a las del año 2005 hasta el 2017. Para el año 2030, la sub-cuenca del Río Actopan pasa su condición de escasez a escasez absoluta con una disponibilidad menor a los 500 m<sup>3</sup>/hab-año, así mismo se prevé que para el año 2050 la sub-cuenca de Alfajayucan pase su condición sin estrés a estrés hídrico con disponibilidad menor a los 1700 m<sup>3</sup>/hab-año (Figura 4). Debido a los cambios que se producirán en este lapso, para el año 2050, existirán dos sub-cuenca en condición de estrés hídrico (Alfajayucan y Tlautla), una sub-cuenca en situación de escasez (Tula) y tres sub-cuencas con muy baja disponibilidad que las ubicará en condiciones de escasez aguda absoluta (Salado, El Salto-Tepeji y Actopan).

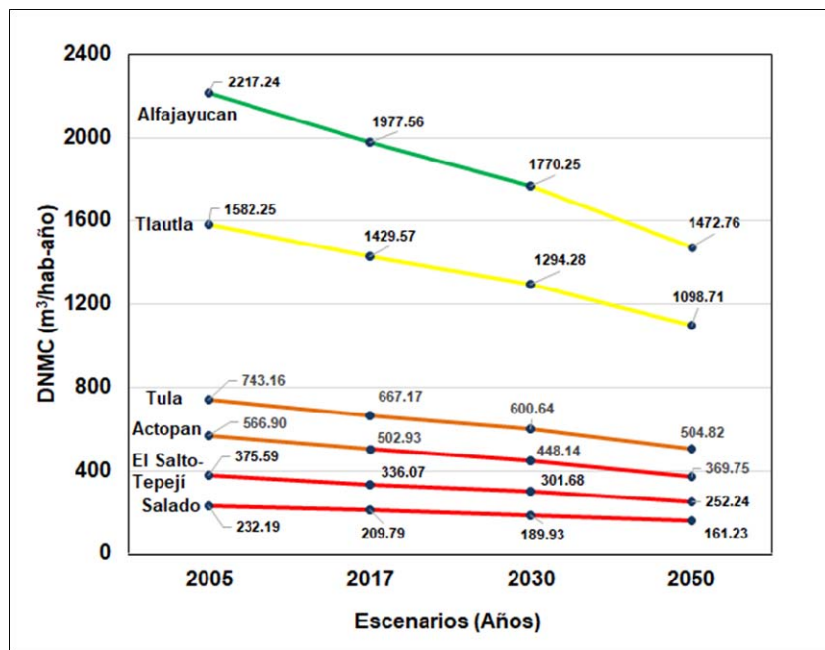


Fig. 4. Escenarios de Disponibilidad Natural Media de agua, bajo condiciones de crecimiento poblacional.

D. Escenarios de DNMC ante el crecimiento poblacional y cambio climático

Se estimó que en promedio para el Valle del Mezquital, la recarga natural medida como infiltración y escorrentía de agua de lluvia disminuirá en 3% para el año 2017 respecto del año 2005, 5.7% para el año 2030, y 10% en el año 2050 (Tabla 6). Esta condición aunada al crecimiento poblacional provocará que existan condiciones más críticas de disponibilidad de agua en cuatro sub-cuencas del Valle del Mezquital (Salado, El Salto-Tepeji, Actopan y Tula). La sub-cuenca del Río Salado presentará condiciones similares a las que presenta actualmente la Ciudad de México donde la disponibilidad es menor a los 150 m<sup>3</sup>/hab/año (CONAGUA, 2013).

Tabla VI. Tabla 6. Cambios en la recarga natural de las sub-cuencas debidas al efecto del cambio climático

Sub-cuenca	Año: 2017 (Mm3)			Año: 2030 (Mm3)			Año: 2050 (Mm3)		
	INF	ESC	RN	INF	ESC	RN	INF	ESC	RN
<b>El Salto-Tepeji</b>	15.4	11.2	26.6	14.8	10.7	25.5	14.0	10.2	24.2
<b>Tlautla</b>	10.3	7.4	17.7	9.9	7.1	17.0	9.4	6.8	16.1
<b>Salado</b>	13.8	10.0	23.8	13.3	9.7	23.0	12.8	9.3	22.1
<b>Actopan</b>	64.5	46.7	111.1	63.1	45.7	108.8	61.1	44.2	105.3
<b>Alfajayucan</b>	43.9	31.8	75.7	43.0	31.1	74.1	41.6	30.1	71.7
<b>Tula</b>	113.0	81.8	205.3	115.0	83.0	198.0	110.0	79.6	189.6
<b>Valle del Mezquital</b>	260.9	188.9	460.2	259.1	187.3	446.5	248.9	180.2	429.1

INF: infiltración, ESC: escorrentía, RN: recarga natural.

La Fig. 5 muestra que la disminución de la presentación provocará que para el año 2030 tres sub-cuencas presentarán escasez aguda absoluta (El Salto-Tepeji, Salado y Actopan), en la sub-cuenca del Río Tula habrá escasez hídrica, Tlautla tendrá estrés hídrico y únicamente Alfajayucan tendrá condiciones óptimas de disponibilidad de agua.

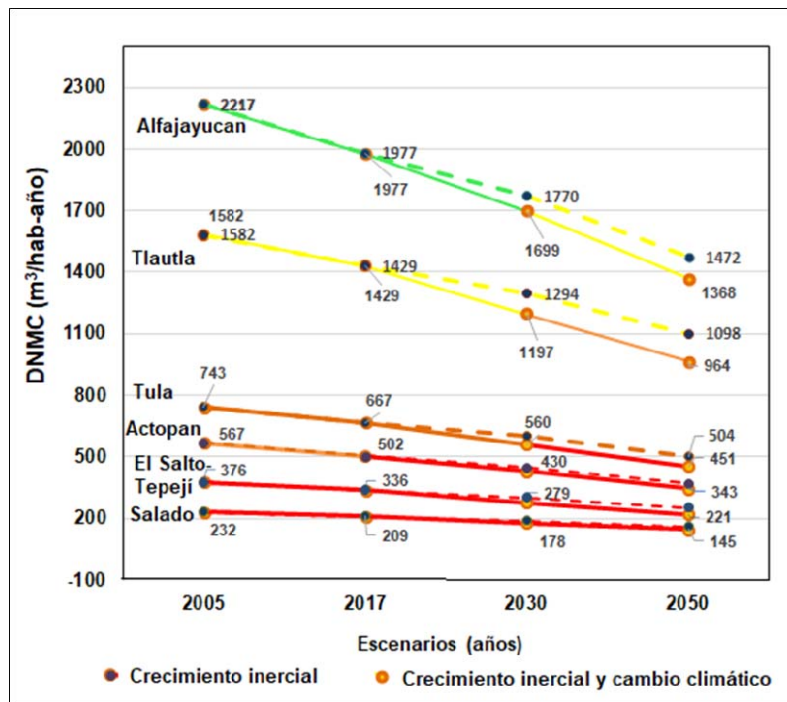


Fig. 5. Escenarios de demanda natural media de agua, bajo condiciones de cambio climático y crecimiento poblacional

Los escenarios de disponibilidad de agua empeorarán para el año 2050 donde las condiciones de la subcuenca del río Tula pasarán de situación de escasez a escasez aguda absoluta junto con las subcuencas del Río Salado, Actopan; y El Salto-Tepeji; la sub-cuenca de Tlautla también cambiará su situación de estrés a escasez hídrica y Alfajayucan presentará situación de estrés.

## V. CONCLUSIONES

La división propuesta en este trabajo para las sub-cuencas del Valle del Mezquital facilitó la aplicación del modelo WEAP para el cálculo de los parámetros hidrológicos y por ello se logró realizar un análisis local de cada una, ya que se observan situaciones diferentes.

El escenario más probable que prevalecerá en las sub-cuencas del Valle del Mezquital involucra el aumento de demanda debido al crecimiento poblacional y la disminución de la precipitación por efecto del cambio climático. Los escenarios predicen que para el año 2050 el 80% de la superficie de esta región tendrá condiciones de escasez aguda absoluta, mientras que el resto de la zona presentará escasez y estrés hídrico (sub-cuenca de Tlautla y Alfajayucan). Contrario a lo que pudiera pensarse, la disminución de la precipitación sólo disminuye en un 10% los cambios de disponibilidad de agua de las sub-cuencas del Valle; lo que indica que es necesario enfocarse en estrategias que eviten el crecimiento acelerado de la mancha urbana en las sub-cuencas de la zona de estudio.

Para el año 2050, la sub-cuencas del Río Salado y El Salto-Tepeji presentarán condiciones de disponibilidad similares a las que presenta desde el año 2010, la Ciudad de México (CONAGUA, 2013); esta situación debe alertar a los tomadores de decisiones para establecer algunas estrategias y políticas públicas para hacer más eficiente el uso del agua e incrementar la infiltración de la precipitación pluvial.

## RECONOCIMIENTOS

Este proyecto fue realizado con el apoyo de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, la Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado de Hidalgo (CEAA) y la Comisión de Tulancingo de Aguas Subterráneas (COTAS). Los autores agradecen al CONACYT por la beca de un año a SCC y la participación de la Red Temática del CONACYT Gestión de la Disponibilidad y Calidad del Agua.

## REFERENCIAS

- Brooks KN, Ffolliott PF, Magner JA (2013) Hydrology and the Management of Watersheds. Wiley-Blackwell. USA.
- Brown A & Matlock M D (2011) A review of water scarcity indices and methodologies. University of Arkansas. Sustainability Consortium.
- Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile (CCG-UC) & Stockholm Environment Institute (SEI) (2009) Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Santiago, Boston.
- CONAGUA (2006) Estadísticas del agua de la Región Hidrológica-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Semarnat. México.
- CONAGUA (2013) Estadísticas del agua de la región hidrológico-administrativa XIII. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. Semarnat. México.
- Fernández-Ham P, Velarde-Villalobos SI, Hernández-López MF, Murguía-Salas MV (2014) Dinámica demográfica 1990-2010 y proyecciones de población 2010-2030. CONAPO. México.

- González-Méndez B, Webster R, Fiedler S, Loza-Reyes E, Hernández JM, Ruíz-Suárez LG, Siebe C (2015) Short-term emissions of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in response to periodic flood irrigation with wastewater in the Mezquital Valley of Mexico. *Atmospheric Environment*, 101, 116-124.
- Gunther S & M Losilla (2000) Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 23: 43-55.
- Harding RJ, Weedon GP, Van Lanen H, Douglas BC (2014) The future global water assessment. *Journal of Hydrology*, 518, 186-193.
- Majidi M, Alizadeh A, Vazifedoust M, Farid A, Ahmadi T (2015) Analysis of the Effect of Missing Weather Data on Estimating Daily Reference Evapotranspiration Under Different Climatic Conditions. *Water Resources Management*, 29, 2107-2124.
- Otazo-Sanchez EM, Pavón NP, Bravo-Cadena J, et al., (2013) Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo – SEMARNATH. Pachuca, Hidalgo.
- Patiño-Gómez C, Reza-García N, Ruíz-Morelos B, Zazueta-Acosta I, Gómez-Martínez JF, Wagner-Gómez A, Rivera-Benítez J, Balancán-Soberanis A (2012) Portafolio de medidas de adaptación al cambio climático en el escurrimiento superficial de las regiones hidrológico administrativas de México. In: IMTA-INE (ed.). México, D. F.
- Rodarte-García R, Galindo-Escamilla E, Díaz-Pérez F, Fernández Fernández GL (2012) Gestión del agua y reconstrucción de la naturaleza en el Valle del Mezquital. Pachuca de Soto, Hidalgo, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Yates D, Purkey D, Sieber J, Huber LA, Galbraith H (2005) WEAP21 – A Demand- Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model Part 2: Aiding Freshwater Ecosystem Service Evaluation. *International Water Resources Association*, 30, 501-512.