

Reducción de la huella de escasez hídrica y medidas de conservación del agua en la vivienda

Reduction of the Water Scarcity Footprint and Water Conservation Measures at Housing Level

DOI: <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i9.137>

CARLOS ALFREDO BIGURRA ALZATI

<https://orcid.org/0000-0001-9740-9483> / carlos_bigurra@uaeh.edu.mx

GABRIELA ALEJANDRA VÁZQUEZ RODRÍGUEZ

<https://orcid.org/0000-0001-8351-8451> / g.a.vazquezr@gmail.com

LILIANA LIZARRAGA MENDIOLA

<https://orcid.org/0000-0001-6320-8923> / lililga.lm@gmail.com

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

Recibido: 9 de marzo de 2020. Aceptación: 12 de noviembre de 2020.

RESUMEN

Pachuca de Soto satisface solo el 45% de la dotación diaria de agua para consumo doméstico. Se proponen medidas de conservación: reusar el agua gris recuperable y cosechar el agua de lluvia en la azotea de una vivienda de interés social para reducir la necesidad de agua limpia para fines no potables.

Se cuantificaron los volúmenes de agua potable necesarios en una vivienda con cuatro habitantes (670.6 L/d), de agua gris reusable (292 L/d) y de agua residual no disponible (213.6 L/d). Se determinó la precipitación máxima diaria (hpd > 1 mm, n= 82 d) para un año, a partir de un registro histórico de 1991-2014. Se estimó el potencial de captación de agua de lluvia a partir de un volumen de agua de lluvia mensual, la superficie de azotea disponible para cosecha (75 m²) y un coeficiente de escurrimiento para superficies de concreto (0.8).

Se determinó la huella de escasez hídrica total (HEH), sumando la huella de escasez hídrica directa (HEHD) e indirecta (HEHI). Se utilizó un indicador regional de disponibilidad de agua (AWARE Annual agri); las entradas directas (consumo de agua potable antes y después de utilizar las medidas de conservación), así como la entrada indirecta (agua consumida en la operación de una bomba de 3/4 Hp). La HEH se redujo de 4.09 a 1.09 m³ equivalentes, particularmente a través de la HEHD, lo que muestra que implementar medidas de conservación ayuda a reducir la escasez hídrica en la vivienda.

Palabras clave: sostenibilidad hídrica, conservación del agua, reducción del consumo doméstico, uso del agua gris

ABSTRACT

Pachuca de Soto satisfies only 45% of the daily demand for domestic consumption of water. Conser-

vation measures are proposed: reuse recoverable gray water and harvest rainwater on the roof in a regular economic level housing to reduce the need for clean water for non-drinking purposes.

The volumes of drinking water needed in a house with 4 inhabitants (670.6 L/d), reusable gray water (292 L/d) and non-disposable raw water (213.6 L/d) were quantified. The maximum daily rainfall (hpd > 1 mm, n = 82 d) for one year was determined from a historical record from 1991-2014. Rainwater harvesting potential was estimated from a monthly volume of rainwater, the available roof area for water harvesting (75 m²) and a runoff coefficient for concrete surfaces (0.8).

The total water scarcity footprint (WSF) was determined, adding the direct (DWSF) and indirect (IWSF) water scarcity footprint. A regional indicator of water availability (AWARE Annual agri) was used; direct inputs (consumption of drinking water before and after using conservation measures), as well as indirect inputs (water consumed in the operation of a $\frac{3}{4}$ Hp pump). The WSF was reduced from 4.09 to 1.09 m³ equivalent, particularly through the DWSF, which shows that implementing conservation measures helps reduce water shortages in housing.

Key words: water sustainability, water conservation, reduction of domestic consumption, use of gray water

INTRODUCCIÓN

La población alrededor del mundo, especialmente aquella en lugares con climas secos, es susceptible de cortes periódicos de agua, infraestructura obsoleta, así como a un suministro ineficiente y con mala calidad. Más de una tercera parte de la población mundial carece de instalaciones hidráulicas adecuadas (ONU, 2019), mientras que un quinto de la población sufre cortes de agua persistentes desde hace más de dos décadas (UNDP, 2006). Estos problemas ocurren, entre otras cosas, por el rápido crecimiento de las ciudades, que normalmente exceden la capacidad de las autoridades locales para implementar medidas

adecuadas (Mahaut y Andrieu, 2019). Sumado a esto, la falta de estrategias y políticas de planeación urbana adecuadas ha ocasionado problemas relacionados con el agua, tales como desastres por inundaciones, así como escasez y cortes de agua, entre otros (Nguyen *et al.*, 2019). El ahorro de agua potable a través de planes de conservación puede tener beneficios a largo plazo (Marinoski *et al.*, 2018), especialmente en ciudades que sufren de cortes severos (Oh *et al.*, 2018). Hay estudios que han explorado con buenos resultados los planes de conservación del agua. Algunos ejemplos son el tratamiento y reúso del agua gris a escala doméstica (Cheng y Wang, 2018; Pérez-Uresti *et al.*, 2019); la combinación del agua gris con la cosecha de agua de lluvia (Marinoski *et al.*, 2018). Entre sus principales ventajas está que pueden no solamente ayudar a reducir la presión por el abastecimiento de agua a la población, sino también a mitigar un problema de escorrentías y encharcamiento en las ciudades.

México no está exento de esta problemática de escasez. La disponibilidad de agua para consumo de la población en el país a principios de 1900 era de 31,000 m³/hab/año, mientras que en el año 2015 se redujo a 3,692 m³/hab/año (INEGI, 2015a). Esta reducción se debe no solo al crecimiento de la población, sino también a riesgos físicos tales como: consumo excesivo del agua, cambios en los regímenes de lluvia y de sequía, así como a la creciente impermeabilización de superficies que anteriormente recargaban las fuentes de agua subterránea. Lo anterior hace que la población sufra de cortes de agua periódicos para aliviar la escasez que existe del recurso para el abastecimiento público. Este es el caso de la Ciudad de México, donde en la actualidad doce millones de personas sufren cortes de agua periódicos (iAgua, 2018), mientras que otros nueve millones de personas en distintas partes del país experimentan la misma situación (Centro Virtual de Información del Agua, 2017).

La ciudad de Pachuca de Soto, en el estado de Hidalgo, es otro lugar donde esta escasez se manifiesta a través de los continuos cortes de agua, que someten a la población a un servicio

doméstico parcial, ya que recibe diariamente el 45% (56.25 L/hab/d) de la dotación estimada (125 L/hab/día, CAASIM, 2019), lo que hace necesario su almacenamiento en cisternas para sobrellevar este déficit. Anteriormente, en un estudio se recomendaba implementar alternativas como la cosecha de agua de lluvia en azoteas de 100 y 200 m², con lo cual sería posible satisfacer parcialmente necesidades de consumo no potable en lavadora, sanitarios y limpieza (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2015). Sin embargo, es necesario explorar nuevas opciones que permitan no solamente aumentar los volúmenes de consumo necesarios, sino también reducir los volúmenes de agua que se envían al drenaje sin ser reusados previamente.

MEDIDAS PARA CONSERVAR EL AGUA

Hay ejemplos en la literatura que muestran el gran potencial que representa el ahorro en el consumo doméstico urbano, debido al empleo de dispositivos de bajo consumo, equipos ahorradores, entre otros (Cai *et al.*, 2019), así como la adopción de medidas de conservación que pueden implementar los usuarios (Ananga *et al.*, 2019). La eficiencia en la adopción del uso de medidas de conservación depende en gran parte de la conciencia de los usuarios de su impacto en la huella hídrica y del potencial con que cuentan en la vivienda para satisfacer sus necesidades en forma sostenible, sin depender por completo de la red de abastecimiento público (Addo *et al.*, 2019).

La reutilización de aguas grises y la recolección de agua de lluvia son bien conocidas como algunas de las estrategias más comunes de conservación de agua, y se están incorporando para minimizar la escasez hídrica. La reutilización de aguas grises puede representar entre el 43% y el 70% del volumen que actualmente se desecha como aguas residuales (Fane y Reardon, 2013). Ahorrar agua potable a través de un plan de conservación puede tener beneficios a largo plazo (Marinoski *et al.*, 2018), especialmente en ciudades con déficit de abastecimiento público (Oh *et al.*, 2018). Pérez-Uresti *et al.* (2019) señalan que las aguas grises domésticas que provienen de regadera, lavamanos o lavadora, han demostrado un

gran potencial de uso para fines que no requieren alta calidad del agua. Koop *et al.* (2020) indican que, en paralelo, las tecnologías como el reciclaje de aguas residuales y la recolección de agua de lluvia se consideran cada vez más como una medida necesaria. Estudios previos han enfatizado en la importancia de combinar volúmenes de agua de lluvia cosechada y aguas grises para usos domésticos no potables (Marinoski *et al.*, 2018). La recolección de agua de lluvia en sí misma es una estrategia que ha demostrado tener éxito en minimizar el consumo de agua potable, y no requiere tratamientos complejos (Cheng y Wang, 2018). Además, su cosecha ha ayudado a reducir el riesgo de inundación en áreas urbanizadas (Eckart *et al.*, 2018; Zhan-Tang *et al.*, 2019).

LA HUELLA DE ESCASEZ HÍDRICA

La huella de agua es un indicador medioambiental integral que determina el volumen total de agua dulce utilizado para producir bienes y servicios (Hoekstra, 2003; Cai *et al.*, 2019). Cuando se quiere medir parcialmente la huella hídrica, se seleccionan indicadores basados en la información disponible para su determinación. Tal es el caso de la huella de escasez hídrica (HEH), que mide la extensión en que la demanda de agua se compara con el reabastecimiento del recurso en un área, sin tomar en cuenta su calidad (CADIS y COSUDE, 2016). Esta huella de escasez no solo considera el volumen de agua empleado directa o indirectamente para producir algo, sino también evalúa dónde y en qué momento se utilizó y qué tipo de agua era: lluvia, ríos y acuíferos, red de abastecimiento público, fuentes alternas de suministro de agua, agua empleada para asimilar la carga contaminante en cuerpos receptores (IMTA, 2018). Esta huella de escasez equivale a la diferencia entre el uso de agua total y su disponibilidad en una región; se mide a través de un indicador regional, AWARE (*Available Water Remaining*). Este indicador representa el remanente de agua disponible por área en una cuenca hidrográfica, una vez satisfecha la demanda de los ecosistemas y la población (Boulay *et al.*, 2018). Según la base de datos más comúnmente utilizada para el

cálculo de la HEH, creada por el grupo *Water use in Life Cycle Assessment* (WULCA, 2017), el indicador AWARE tiene un rango entre 0.1 y 100; está en función de la diferencia entre la demanda del recurso hídrico y su disponibilidad regional (m^3 equivalentes). Valores < 1 representan regiones con estrés hídrico bajo respecto del promedio mundial; valores $= 10$ representan una demanda diez veces superior al volumen de agua disponible respecto del promedio mundial.

La huella de escasez hídrica se divide en huella de escasez hídrica directa, HEHD (volumen de agua consumido directamente en un proceso) e indirecta, HEHI (volumen de agua consumido indirectamente en un proceso) (CADIS y COSUDE, 2016). Aunque se emplea principalmente para el sector industrial, también puede ser aplicable en el sector público urbano (IMTA, 2018). Para determinar la huella de escasez hídrica, es necesario establecer primero la unidad funcional o superficie de captación, la zona geográfica, identificar las entradas y salidas (en el proceso del consumo de agua), así como seleccionar el indicador regional (AWARE).

El análisis de la huella de escasez hídrica se emplea internacionalmente para evaluar procesos a nivel de servicios e industria principalmen-

te; sin embargo, no solo está restringido a estos fines, también puede ser aplicable en el ámbito urbano (IMTA, 2018). Por tal motivo, en este trabajo se plantea un caso de análisis a través de una vivienda en la que residen cuatro habitantes en la ciudad de Pachuca de Soto. Se determinó la huella de escasez hídrica para evaluar el impacto que tiene el consumo de agua potable de sus habitantes sobre la disponibilidad del recurso hídrico en esa zona geográfica. Además, se establecieron medidas de conservación del agua tales como el reúso del agua gris y la cosecha de agua de lluvia para evaluar si tienen un efecto positivo sobre la huella de escasez hídrica a escala de vivienda.

METODOLOGÍA

La ciudad de Pachuca de Soto se localiza en las coordenadas geográficas $20^{\circ} 07' 18''$ de latitud norte y $98^{\circ} 44' 09''$ de longitud oeste; tiene una altitud que oscila entre 2,382 y 2,400 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 2015a). Su clima es templado subhúmedo y tiene una población de 256,584 habitantes (figura 1). Su evaporación promedio anual es de 863.6 mm, su precipitación promedio

FIGURA 1
Croquis de localización de Pachuca de Soto, Hidalgo (sin escala)



Fuente: Elaboración propia.

CUADRO 1

Volúmenes de agua consumidos en la vivienda con 4 habitantes que pasan al menos 12 horas al día

	Consumo de agua potable				Agua gris reutilizable		Agua residual no disponible	
	Núm. de veces	Consumo sugerido*	L/d	%	L/d	(%)	L/d	(%)
wc	8 descargas/d	4.8 L/descarga	153.6	22.9	0	0	153.6	71.9
Regadera	1/d (10 minutos)	3 L/min	120	17.9	120	41.1	0	0
Lavabo	8 veces/d	1 L/min	32	4.8	32	11.0	0	0
Fregadero	2 veces/d (10 minutos)	3 L/min	60	8.9	0	0	60	28.1
Lavadora	2 veces/semana	70 L/ciclo	140	20.9	140	47.9	0	0
Limpieza	3 veces/semana	10 L	30.0	4.5	0	0	0	0.0
Riego de jardín	3 veces/semana (15 minutos)	3 L/min	135	20.1	0	0	0	0
Suma =			670.6	100.0	292	100.0	213.6	100.0

* Consumo de agua sugerido (CONAVI, 2019).

Fuente: Elaboración propia.

anual es de 581 mm y el periodo de lluvias comprende de abril a octubre (SMN, 2018).

VOLÚMENES DE AGUA POTABLE, AGUA GRIS Y AGUA RESIDUAL

Se propuso como caso de estudio una vivienda de interés social con cuatro habitantes, ya que este tipo representa aproximadamente el 53.3% de las 78,570 viviendas promedio que había en la ciudad hasta el último censo intermedio (INEGI, 2015b). La vivienda tiene una superficie de azotea de concreto impermeabilizado de 90 m² y pendiente del 3%; su superficie disponible para cosechar agua de lluvia es de 75 m², mientras que el resto está destinado a tanque estacionario, tinaco (600 L) y calentador solar. Cuenta con dos regaderas, tres lavabos, tres sanitarios, una lavadora, 1 fregadero, 1 lavadero y 1 llave para riego de jardín. En la tabla 1 se resumen los volúmenes promedio diarios estimados (CONAVI, 2019).

En el cuadro anterior se observa que el agua que se consume en el WC es agua residual no disponible (no reusable), debido a que requiere tratamiento para su recuperación; el agua con-

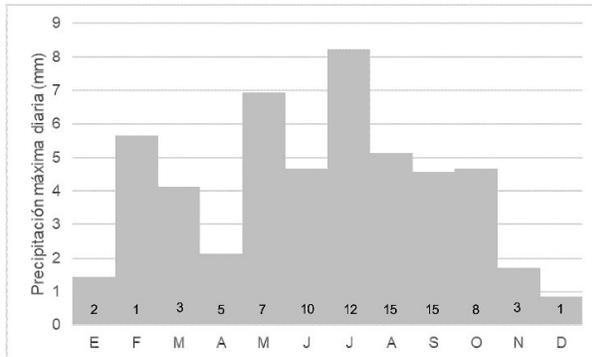
sumida en el fregadero también es un volumen no disponible, debido a su contenido de grasas; mientras que el agua utilizada para limpieza se dispone como parte del agua para el riego de jardín (infiltración al subsuelo). Los volúmenes de agua gris provenientes de las regaderas, lavabos y lavadora se consideran agua gris reusable para fines no potables, siempre y cuando se renueven diariamente (Fane y Reardon, 2013).

AGUA DE LLUVIA COSECHABLE EN AZOTEA

Para determinar el volumen de agua de lluvia cosechable en la azotea de la vivienda se tomó en cuenta el registro histórico (1991-2014) de precipitación diaria en la estación climatológica de la ciudad (clave CONAGUA 013056). De este registro, se seleccionaron todos los días con precipitaciones superiores a 1 mm (n= 82 días). A continuación, se seleccionó la serie de datos para establecer los máximos diarios mensuales. Su estadística descriptiva es la siguiente: $\sigma = 0.79050171$, media= 4.17, mediana= 6.03 y rango= 7.36. Enseguida, se construyó el hietograma de precipitaciones para determinar los parámetros de cálculo (figura 2).

FIGURA 2

Hietograma representativo de precipitaciones máximas diarias-mensuales (1991-2014)
Número de días con lluvias de cada mes en las barras



Fuente: Elaboración propia.

Para calcular el volumen de agua de lluvia cosechable (Vall) en la azotea de la vivienda se utilizó la precipitación máxima diaria (hpd, mm/d), el número de días con precipitación en el mes (n), la superficie de azotea disponible para su cosecha (A, m²) y un coeficiente de escurrimiento equivalente a 0.8 (C = concreto, adimensional). Ecuación 1:

$$Vall = (hpd * n) * A * C \quad (Ec. 1)$$

Aunque puede perderse una parte del agua de lluvia cosechable por salpicaduras y evaporación, esta pérdida se reduce al mínimo debido a que su cosecha y almacenamiento ocurren durante la lluvia de forma casi inmediata. Además, debe tomarse en cuenta que las primeras tres lluvias del mes se descartan del volumen cosechable, debido a que contienen la suciedad lavada de la superficie de azotea y esta agua no se almacena (Lizárraga-Mendiola *et al.*, 2015). Por lo tanto, del número de precipitaciones en cada mes (n), se eliminaron los primeros tres días con registros, para efectos de cálculo del volumen de almacenamiento.

DETERMINACIÓN DE LA ESCASEZ HÍDRICA

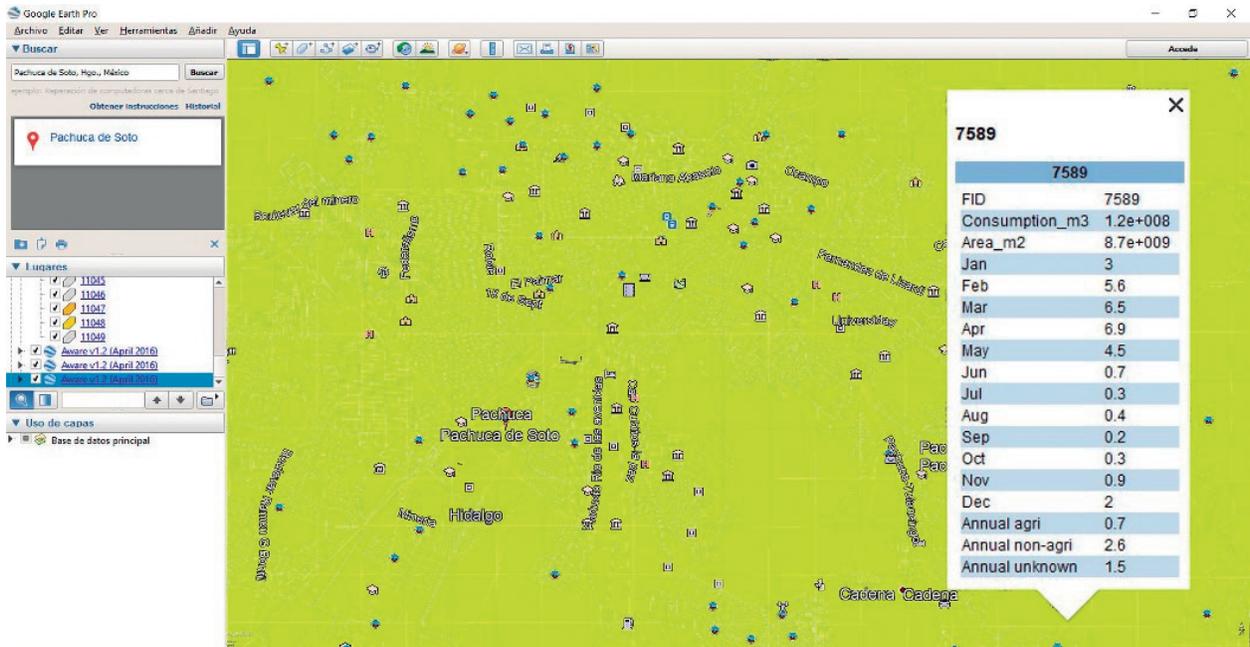
Este indicador de impacto de la huella de agua permite identificar los riesgos físicos asociados al agua a lo largo de una cadena de valor: demanda de agua, dotación recibida, dotación requerida, escasez (ISO 14046, 2019). Este indicador analiza la escasez hídrica a que se somete una población que experimenta cortes de agua periódicos o continuos, como es el caso de la población de Pachuca de Soto. En este estudio se utilizó el método de agua disponible remanente -AWARE (Boulay *et al.*, 2016; 2018) y se mide en m³ equivalentes (m³ eq.) en una vivienda con cuatro habitantes.

El indicador AWARE Annual agri mide la escasez de agua o su disponibilidad en una región geográfica (PNUMA SETAC, 2004). Este se obtuvo a partir de una base de datos (AWARE Agri, versión 1.2, 2016) y se instaló en Google Earth, desde donde se seleccionó la región donde se realizó el análisis. Para este estudio, se seleccionó el AWARE Annual agri para Pachuca de Soto (figura 3).

Se establecieron dos escenarios: 1) Consumo de agua en la vivienda, donde el volumen de agua potable proviene de la red pública de abastecimiento (Vred); el volumen de agua potable que se consume sin medidas de conservación (Vap); el volumen de agua no disponible o que se descarga sin ser reutilizado, como agua residual (Vres) y 2) Incorporación de un volumen de agua de lluvia cosechada en la azotea para usos no potables (Vall); reúso de agua gris recuperada en el interior de la vivienda para fines no potables (Vag); reúso de agua gris a través del riego de jardín (Vinf); volumen de agua potable reducido al incorporar los volúmenes antes citados (Vap); volumen de agua residual disminuido al reusar agua gris para un segundo uso y limitar el volumen de agua de lluvia que anteriormente descargaba hacia el drenaje (Vres) (figura 4).

FIGURA 3

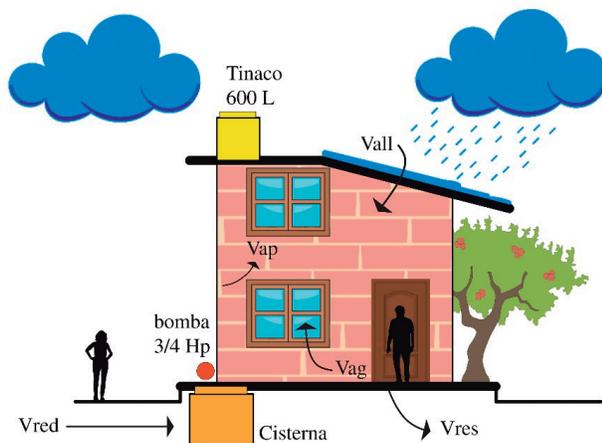
Selección del indicador Annual agri para el sitio de análisis FID 7589 (tomado desde Earth Pro.Ink)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4

Representación gráfica de la distribución de los usos del agua con las medidas de conservación propuestas



Nota: *Vap*: agua potable, *Vall*: agua de lluvia, *Vag*: aguas grises, *Vres*: agua residual, *Vred*: agua proveniente de la red municipal.

Fuente: Elaboración propia.

Primero se determinó la vivienda como unidad funcional o área de captación. Ésta fue la base de cálculo respecto de la cual se normalizaron

las entradas (*Vred*, *Vap*, *Vag*, *Vall*, *Vinf*) y salidas (*Vres*). Después se establecieron las dimensiones para el análisis de la huella de escasez hídrica: temporal (comprende el periodo de un año, analizado diariamente y calculado mensualmente para establecer los distintos volúmenes de las entradas) y geográfico (la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México).

A continuación se calculó la huella de escasez hídrica directa (HEHD), que se relaciona con la dotación requerida directamente por los cuatro usuarios de la vivienda (limpieza, higiene, preparación de alimentos, riego, ver cuadro 1). Para calcular la HEHD se utilizó la ecuación 2:

$$HEHD = Vaph \times AWARE \text{ Annual agri} \times \text{número de habitantes} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

HEHD = Huella de escasez directa ($\text{m}^3 \text{ eq.}$)

$Vaph$ = volumen de agua consumido por habitante ($0.1677 \text{ m}^3/\text{h/d}$)

$AWARE \text{ Annual agri}$ = $0.7 \text{ m}^3 \text{ eq. anual}$ (tomado de figura 3)

Para estimar la huella de escasez hídrica indirecta (HEHI) se estimó el consumo de agua necesario para la operación de una bomba con montaje superficial de 0.75 Hp que funciona durante 8.88 minutos para llenar un tinaco de 600 L; su gasto de operación es de 1,5 L/min (según los datos del fabricante). Por lo tanto, el volumen de agua necesario durante su operación (Vb) es de 13.32 L/d, y se acciona toda la semana. Para el cálculo de la HEHI se utilizó la ecuación 3:

$$HEHI = Vb \times AWARE \text{ Annual agri} \times \text{número de habitantes} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

HEHI = Huella de escasez hídrica indirecta (m³ eq.)

Vb = Consumo de agua de la bomba (L/d)

Se supone que el funcionamiento de la bomba opera para satisfacer el volumen de almacenamiento en el tinaco que atenderá las necesidades de los cuatro usuarios a la vez. Por último, para

estimar la huella de escasez hídrica total (HEH) se sumaron las huellas de escasez directa e indirecta (ecuación 4).

$$HEH = HEHD + HEHI, \text{ en m}^3 \text{ eq.} \quad (\text{Ec. 4})$$

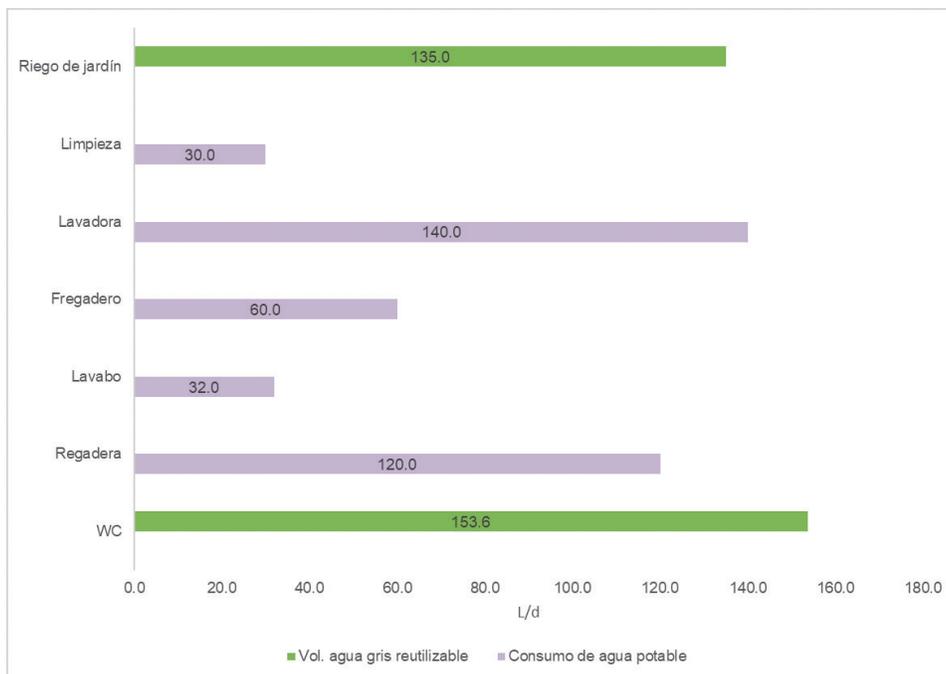
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONSERVACIÓN DEL AGUA EN LA VIVIENDA
Sin tomar en cuenta medidas de conservación, los cuatro usuarios del caso de estudio analizado consumen 670.6 L/d, desaprovechan el agua gris reusable (292 L/d) y se descarga casi la totalidad del agua consumida hacia el drenaje (535.6 L/d, sin considerar el agua que se infiltra como riego de jardín).

REÚSO DEL AGUA GRIS

Si se implementan medidas sencillas de conservación de agua, tales como el reúso del agua gris, el ahorro se aprecia en la figura 5:

FIGURA 5
Reúso del agua gris para fines no potables en riego de jardín y WC.
Se incluye en las barras los valores con volúmenes diarios



Fuente: Elaboración propia.

Esta medida constituye una opción para retardar la descarga de agua residual al dar un segundo uso al agua gris (volumen reusable = 292 L/d); además, cubre el 100% del volumen necesario para el WC y para el riego de jardín, al utilizarse solamente el 98.84% del volumen necesario para estos fines. El volumen de agua gris sobrante (3.4 L/d) puede infiltrarse en el jardín como excedente. Con esta alternativa, el consumo de agua potable se reduciría en el 56.96% (de 670.6 L/d a 383 L/d), siempre y cuando el agua gris almacenada se renueve diariamente; de lo contrario, se requerirá algún sistema de tratamiento.

Existen estudios que han propuesto el reúso de aguas grises para fines no potables en la vivienda (Castillo-Ávalos y Rovira-Pinto, 2013), aunque estos autores recomiendan su consumo únicamente en el WC, así como la instalación de dispositivos ahorradores para hacer más eficiente el autoconsumo. En este estudio, el uso tanto en WC como en riego de jardín representa un porcentaje de ahorro en el consumo de agua potable muy similar a lo que registran otros estudios (Fane y Reardon, 2013), lo que confirma que, especialmente en zonas donde hay problemas de desabasto en el sistema público, pueden ser fuentes secundarias de autoconsumo. Hay casos de éxito en el país donde ha sido posible cubrir hasta una cuarta parte del consumo doméstico de agua a través de medidas de conservación tales como el reúso de agua gris, lo que reduce además una cantidad similar en la descarga de agua residual hacia el sistema de drenaje, como es el caso de la ciudad de Querétaro (Pérez-Uresti *et al.*, 2019).

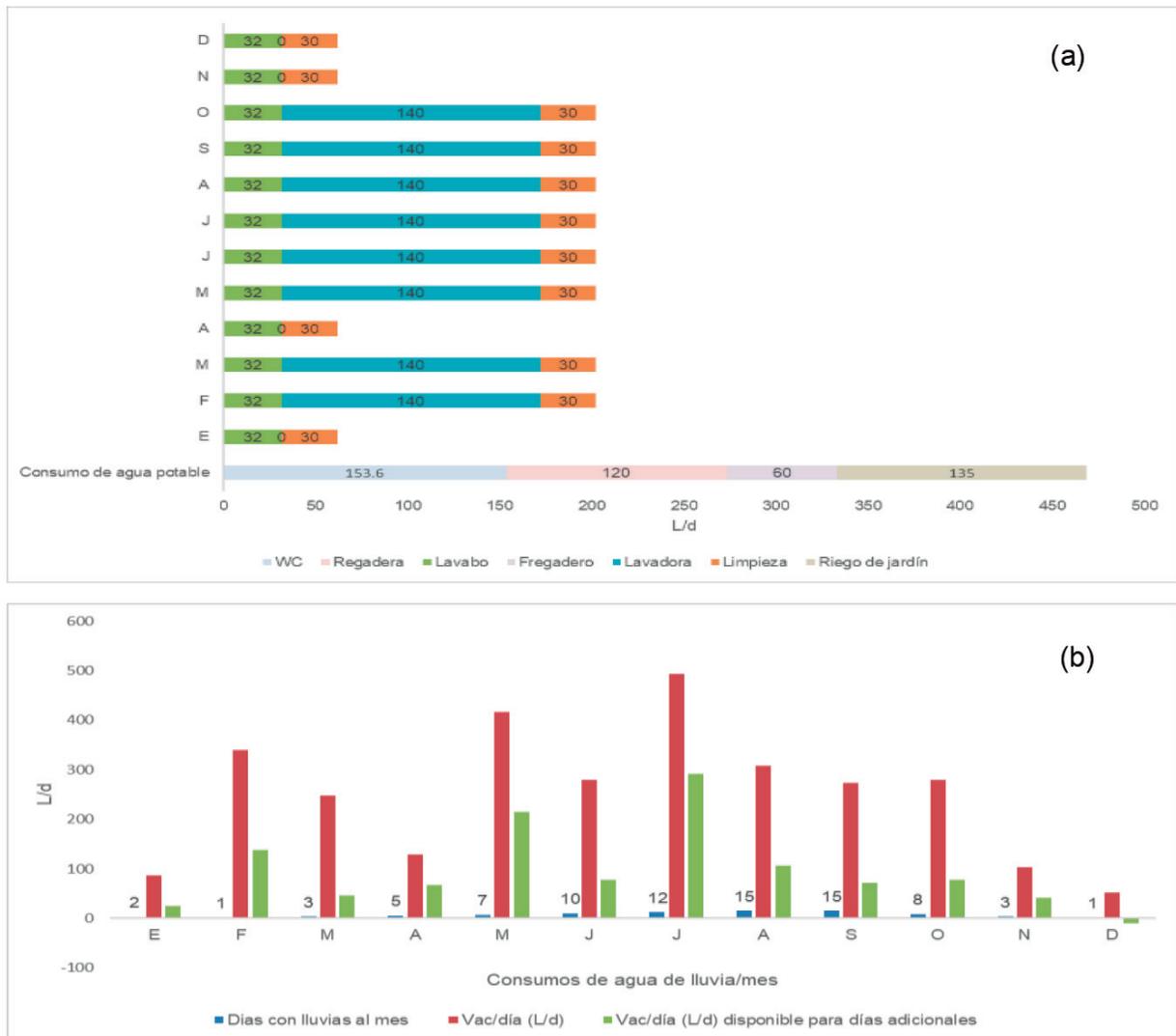
Incorporación del agua de lluvia

Como segunda medida de conservación, se propuso el agua de lluvia cosechada en azotea para evaluar su potencial en la disminución del consumo de agua potable, al sustituir parcialmente volúmenes destinados en lavabo (32 L/d), lavadora (140 L/d) y actividades de limpieza (30 L/d), donde solamente se necesita un filtrado como tratamiento.

Al menos parcialmente, durante los meses de lluvia es posible utilizar el agua cosechada para los usos propuestos y aún es posible almacenar un volumen adicional para días posteriores: mayo (siete días, volumen adicional = 213.88 L), junio (diez días, volumen adicional = 77.80 L), julio (doce días, volumen adicional = 291.94 L), agosto (quince días, volumen adicional = 105.75 L), septiembre (quince días, volumen adicional = 71.80 L) y octubre (ocho días, volumen adicional = 77.87 L). Durante los meses que corresponden al periodo seco del año, aunque se pueden almacenar volúmenes suficientes para fines limitados (lavabos y limpieza), solamente son volúmenes disponibles para un día (febrero), dos días (enero), tres días (marzo y noviembre) y cinco días (abril), mientras que durante el mes de diciembre no se cosecharía agua de lluvia (figuras 6a y b). Esta medida representa un ahorro adicional equivalente al 30.12% en el consumo de agua potable en la vivienda, ya que, durante esos días, únicamente se utilizaría para regadera y cocina (el consumo en WC y jardín se cubre con agua gris).

Como medida de conservación, la cosecha de agua de lluvia se considera una fuente adicional de agua dulce para consumo urbano (EPA, 2013). Aunque Aladenola y Adeboye (2010) recomiendan la cosecha de agua de lluvia en zonas con precipitaciones superiores a 1,000 mm/año, hay estudios en sitios áridos y semiáridos como Jordania (precipitaciones entre 274-627 mm/año) donde el agua de lluvia cosechada (100 m² de azotea) es utilizada para fines domésticos y riego de jardines (Abu-Zreig, *et al.*, 2019). En ciudades de Estados Unidos, la cosecha de agua de lluvia ha logrado reducir entre el 30% y el 50% el consumo de agua potable en edificios (Pelak y Porporato, 2016). Por otra parte, también se ha comprobado que incorporar sistemas combinados (reúso de agua gris y cosecha de agua de lluvia) puede incluso disminuir hasta en el 14.7% el consumo de agua potable anual como estrategia de conservación (Marinoski *et al.*, 2018).

FIGURA 6
Distribución temporal de los volúmenes de agua de lluvia



a) Volúmenes distribuidos para su uso en lavabos, lavadora y actividades de limpieza. Se incluye en las barras los valores con volúmenes diarios (L/d). b) Volúmenes de agua de lluvia utilizados y disponibles para días adicionales. Se incluye el número de días cosechables.

Fuente: Elaboración propia.

ESCASEZ HÍDRICA EN LA VIVIENDA

La huella de escasez hídrica es un indicador que ayuda a analizar la relación entre el consumo de agua y su disponibilidad como parte de los recursos hídricos naturales de una zona geográfica (Heju *et al.*, 2019). Se analizó el caso del consumo de agua potable en una vivienda de interés social con cuatro usuarios, que implementaron medidas

tales como el reúso del agua gris y la incorporación de agua de lluvia cosechada en azoteas, como sustitutos en usos no potables. En el cuadro 2 se aprecia que, bajo las condiciones del primer escenario (solo consumo de agua potable, Vap1), la huella de escasez hídrica total (HEH1) se mantiene constante a lo largo del año (4.09 m³ eq.). Esto indica que, aunque el estrés hídrico en la re-

gión es bajo según el indicador AWARE ($0.7 \text{ m}^3 \text{ eq.} < 1 \text{ m}^3 \text{ eq.}$, WULCA, 2017), los hábitos de consumo doméstico analizados ejercen una presión sobre el recurso hídrico.

En el escenario 2 se consideró que el volumen de agua potable necesario para satisfacer el consumo doméstico mensual se redujo, al sustituir una parte de este con agua gris y agua de lluvia para fines no potables (Vap2). Este segundo escenario se analizó mensualmente, ya que el volumen de lluvia cosechable varía de un mes al otro; por lo tanto, las cantidades de agua potable necesarias variaban según la disponibilidad de agua de lluvia, mientras que el volumen de agua gris permaneció constante durante todo el año. El indicador AWARE Annual agri se promedió entre los doce meses del año, ya que este valor es anual ($0.7 \text{ m}^3 \text{ eq.} / 12 \text{ meses}$). Los resultados de este análisis se muestran a continuación (cuadro 2):

Con respecto a la huella hídrica total (HEH2) esta logró reducirse de $4.09 \text{ m}^3 \text{ eq.}$ en el escena-

rio 1 hasta $1.09 \text{ m}^3 \text{ eq.}$ (mes de julio) y $1.19 \text{ m}^3 \text{ eq.}$ (meses de diciembre y enero), para el escenario 2. Esto se debe a que durante el mes de julio se tienen las precipitaciones diarias más elevadas del año (8 mm/d), lo que representa un potencial de captación de agua de lluvia mayor que en el resto de los meses. También se aprecia una disminución importante en la HEH durante los meses más secos, debido al uso combinado con el volumen de agua gris, que ayuda a reducir la presión hídrica en la vivienda de forma importante. La huella de escasez hídrica indirecta (HEHI) se mantiene constante en ambos escenarios a través del tiempo. Esto se debe a que la operación de la bomba para abastecer el consumo de la vivienda no cambia, solo el origen del agua consumida. No es posible mitigar este último impacto a través de la huella hídrica indirecta en esta propuesta, ya que sería necesario independizar al usuario del empleo de la bomba para la alimentación de su tinaco.

CUADRO 2

Cambios en la huella de escasez hídrica (HEH) en la vivienda en los dos escenarios propuestos:

1) Consumo de agua potable y 2) Consumo de agua potable + agua gris + agua de lluvia

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Escenario 1	* Vap1 (m3/d)	0.67											
	HED1 (m3/eq)	2.97											
	HEHI1 (m3/eq)	1.12											
	HEH1 (m3/eq)	4.09											
Escenario 2	* Vap2	0.29	0.04	0.13	0.25	-0.04	0.10	-0.12	0.07	0.10	0.10	0.28	0.33
	HED2 (m3/eq)	0.07	0.01	0.03	0.06	-0.01	0.02	-0.03	0.02	0.02	0.02	0.06	0.08
	HEHI2 (m3/eq)	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12
	HEH2 (m3/eq)	1.19	1.13	1.15	1.18	1.11	1.14	1.09	1.14	1.14	1.14	1.18	1.19
% Reducción	HEH1-HEH2 (m3/eq)	29.04	27.60	28.13	28.81	27.17	27.94	26.72	27.78	27.98	27.94	28.95	29.24

* Vap1 = volumen de agua potable, en m^3/d (escenario 1)

*Vap2 = volumen de agua potable, en m^3/d (escenario 2)

** HED, HEHI Y HHT en m^3 equivalentes

Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se concluye que, a través de las medidas de conservación que pueden implementarse en la vivienda, es posible mitigar el impacto sobre la escasez hídrica que sufren sus habitantes. Aunque este es solo un caso de estudio en una vivienda de interés social, representa un potencial de aplicabilidad en al menos el 53.3% de las viviendas que hay en la ciudad de Pachuca de Soto (INEGI, 2015b). Esta ciudad tiene como principal fuente de abastecimiento el agua subterránea, que pertenece a la región hidrológico-administrativa (RHA) XIII Aguas del Valle de México. Según Olier-Sarlat (2018) esta RHA tiene un indicador AWARE igual a 100 m³ eq., lo que indica que la población que depende de este recurso hídrico experimenta un estrés hídrico mucho mayor que el promedio mundial. Lo anterior hace más relevante aún la idea de considerar opciones que permitan a la población contar con fuentes alternas para satisfacer sus necesidades de autoconsumo de agua.

Como se discutió previamente, incorporar medidas de conservación en el uso y la gestión de agua en la vivienda puede representar beneficios a largo plazo (Marinoski *et al.*, 2018); también puede representar ahorros significativos en el volumen de agua potable que se consume, sobre todo a escala doméstica (Lizarraga-Mendiola *et al.*, 2015), donde no se requieren grandes cantidades, tratamientos sofisticados (Cheng y Wang, 2018), instalaciones complicadas o mantenimiento muy especializado.

CONCLUSIÓN

Los hábitos de consumo actual de la población contribuyen al problema de escasez hídrica que enfrenta el organismo operador para satisfacer el consumo doméstico en la ciudad de Pachuca de Soto. Ello se debe a que gran parte del consumo de agua potable se utiliza en la vivienda para fines donde no es necesaria, tales como su descarga a través del WC y otras actividades donde no es imperativo utilizar agua limpia (riego de jardín y limpieza, por ejemplo).

En este estudio se propusieron medidas de conservación tales como reutilizar el agua gris proveniente de la regadera, lavamanos y lavadora, así como cosechar el agua de lluvia en la azotea de la vivienda. Estos volúmenes son propuestos para reusarlos como agua no potable en la vivienda, lo que reduce considerablemente la dependencia del agua potable de la red pública durante el año.

Se midió el impacto que estas medidas de conservación representan sobre la huella de escasez hídrica en la vivienda respecto de los hábitos de consumo cotidianos. Los resultados indicaron que es posible mitigar de manera considerable la huella de escasez hídrica directa; es decir, aquella que depende directamente de los hábitos de consumo del usuario, si se implementan estas medidas de conservación. Debido a la variación temporal de las lluvias, y al número reducido de días al mes en que se puede almacenar agua cosechada, la huella de escasez se mitiga principalmente a través del reúso del agua gris, que puede ser constante durante todo el año.

Es recomendable dimensionar los dispositivos de almacenamiento para aguas grises y agua de lluvia, con el fin de adaptar espacios disponibles en viviendas existentes. Esto permitirá establecer un presupuesto adaptable a cada situación y a las necesidades familiares. Para nuevas construcciones, se recomienda tomar en cuenta, como parte del diseño, los sistemas de recolección y almacenamiento de aguas grises y agua de lluvia, para evitar instalaciones y costos posteriores.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Zreig, M.; Ababneh, F. y F. Abdullah (2019). "Assessment of Rooftop Rainwater Harvesting in Northern Jordan". *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 114, pp. 102794. Disponible en: <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/j.pce.2019.08.002>.
- Addo I. B.; Thoms M. C. y M. Parsons (2019). "The Influence of Water-conservation Messages on reducing Household Water Use". *Applied Wa-*

- ter Science, 9: 126. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-019-1002-0>.
- Aladenola, O. O. y O. B. Adeboye (2010). "Assessing the Potential for Rainwater Harvesting". *Water Resour. Manag.*, 24, pp. 2129-2137. Disponible en: <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11269-009-9542>.
- Ananga, E. O.; Becerra, T. A.; Peadar, C. y C. Pappas (2019). "Examining Water Conservation Behaviors and Attitudes: Evidence from the City of Ada, Oklahoma, USA". *Sustainable Water Resources Management*, 5, pp. 1651-1663. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40899-019-00329-y>.
- Boulay, A.; Bare, J.; Benini, L.; Berger, M.; Bulle, C.; Klemmayer, I.; Lathuilliere, M.; Manzardo, A.; Margni, M.; Motoshita, M.; Núñez, M.; Oki, T.; Ridoutt, B.; Worbe, S. y S. Pfister (2016). "New Scarcity Indicator from WULCA: Consensus to assess Potential User Deprivation". *LCA XV Conference*. Vancouver, 7 October, 2015. Disponible en: http://wulca-waterlca.org/pdf/conference/LCAXV_Vancouver_october2015.pdf.
- Boulay, A. M.; Bare, J.; Benini, L.; Berger, M.; Lathuilliere, M. J.; Manzardo, A.; Margni, M.; Motoshita, M.; Núñez, M.; Pastor, A. V.; Ridoutt, B.; Oki, T.; Worbe, S. y S. Pfister (2018). "The WULCA Consensus Characterization Model for Water Scarcity Footprints: Assessing Impacts of Water Consumption Based on Available Water Remaining (AWARE)". *Int. J. Life Cycle Assess*, 23, pp. 368-378. Disponible en: DOI 10.1007/s11367-017-1333-8.
- CAASIM (2019). "Tarifas mensuales de agua potable aplicadas para servicio doméstico en la ciudad de Pachuca de Soto". Disponible en: <http://caasim.hidalgo.gob.mx/pag/tarifas.html>. Consultado: 23 de septiembre de 2019.
- CADIS, Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable y COSUDE, Embajada de Suiza en Colombia, Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (2016). *Huella de agua (ISO 14046) en América Latina, análisis y recomendaciones para una coherencia regional*.
- Cai, B.; Liu, B. y B. Zhang (2019). "Evolution of Chinese Urban Household'S Water Footprint". *Journal of Cleaner Production*, 208, pp. 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.074>.
- Castillo-Ávalos, Y. y A. Rovira-Pinto (2013). "Eficiencia hídrica en la vivienda". *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. IV, núm. 4, septiembre-octubre, pp. 159-171. Disponible en: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/articleCms/view/384/344>.
- Centro Virtual de Información del Agua (2017). "Visión general del agua en México. ¿Cuánta hay?". Disponible en: <https://agua.org.mx/cuanta-agua-tiene-mexico/>. Consultado: 18 de septiembre de 2019.
- Cheng, Y. y R. Wang (2018). "A Novel Storm Water Management System for Urban Roads in China Based on Local Conditions". *Sustainable Cities and Society*, 39 (september 2017), pp. 163-171. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.09.001>.
- CONAVI (2019). "Ley de Vivienda. Última reforma publicada por el *Diario Oficial de la Federación* el 14 de mayo de 2019, artículos 73 y 74, título sexto, capítulo único". Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/478059/Ley_de_Vivienda.pdf. Consultado: 15 de agosto de 2019.
- Eckart, K.; McPhee, Z. y T. Bolisetti (2018). "Multiobjective Optimization of Low Impact Development Storm Water Controls". *Journal of Hydrology*, pp. 562, 564-576. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.068>.
- Environmental Protection Agency, EPA (2013). "Rainwater Harvesting. Conservation, Credit, Codes, and Cost. Literature Review and Case Studies". EPA-841-R-13-002. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/rainharvesting.pdf>.
- Fane S. C. Reardon (2013). "Wastewater Reuse. Australia's Guide to Environmentally Sustainable Homes". Disponible en: <https://www.yourhome.gov.au/water/wastewater-reuse>.
- Hehu, H.; Xin, C.; Jing, H. y C. Fu (2019). "Water-scarcity Footprint Associated with Crop Expansion in Northeast China: A Case Study Based on AquaCrop Modeling". *Water*, 12(1), p. 125, MDPI AG. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/w12010125>.
- Hoekstra, A. Y. (2003). "Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, IHE Delft, the Netherlands". Disponible en: <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>.

- iAgua (2018). “La crisis del agua en México provoca que 12 millones de personas no tengan acceso a agua potable”. Disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/conacyt/crisis-agua-mexico-provoca-que-12-millones-personas-no-ten-gan-acceso-agua-potable>. Consultado: 10 de septiembre de 2019.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2018). *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. Rita Vázquez del Mercado y Javier Lambarri (Ed.).
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI (2015a). *Datos del censo de población y vivienda*. Información sobre agua potable y alcantarillado. Disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>. Consultado: 9 de septiembre de 2019.
- (2015b). *Perfiles sociodemográficos municipales*. Municipio de Pachuca de Soto, Hidalgo. Disponible en: http://poblacion.hidalgo.gob.mx/pdf/perfiles/pp_municipios-Pachuca.pdf.
- ISO 14046 (2019). *Gestión ambiental – Huella de agua – Principios, requisitos y directrices*. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14046:ed-1:v1:es>. Consultado: 15 de agosto de 2019.
- Koop S. H. A.; van Dorssen A. J. y S. Brouwer (2019). “Enhancing Domestic Water Conservation Behavior: A Review of Empirical Studies on Influencing Tactics”. *Journal of Environmental Management*, 247, pp. 867-876. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.126>.
- Lizarraga-Mendiola, L.; Vázquez-Rodríguez, G.; Blanco-Piñón, A.; Rangel-Martínez, Y. y M. González-Sandoval (2015). “Estimating the Rainwater Potential per Household in an Urban Area: Case Study in Central Mexico”. *Water*, 7(12), pp. 4622-4637. MDPI AG. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/w7094622>.
- Mahaut, V. y H. Andrieu (2019). “Relative Influence of Urban-development Strategies and Water Management on Mixed (Separated and combined) Sewer Overflows in the Context of Climate Change and Population Growth: A Case Study in Nantes”. *Sustainable Cities and Society*, 44, pp. 171-182. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.09.012>.
- Marinoski, A. K.; Rupp, R. F. y E. Ghisi (2018). “Environmental Benefit Analysis of Strategies for Potable Water Savings in Residential Buildings”. *Journal of Environmental Management*, 206, pp. 28-39. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.004>.
- Nguyen, T. T.; Ngo, H. H.; Guo, W.; Wang, X. C.; Ren, N.; Li, G. y H. Liang (2019). “Implementation of a Specific Urban Water Management - Sponge City”. *Science of the Total Environment*, 652, pp. 147-162. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>.
- Oh, K. S.; Cheng, L. J. Y.; Poh, P. E. y M. N. Chong (2018). “A Review of Greywater Recycling Related Issues: Challenges and Future Prospects in Malaysia”. *Journal of Cleaner Production*, 171, pp. 17-29. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.267>.
- Olier-Sarlat, H. A. (2018). “Estrés hídrico en México bajo dos enfoques de huella de agua de escasez”. *Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle*, vol. 13, núm. 50, julio-diciembre, pp. 31-46. Disponible en: <https://doi.org/10.26457/recein.v13i50.1738>.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU (2019). *World Population Prospects 2019. Highlights*. Department of Economic and Social Affairs Population Division. ST/ESA/SER.A/423. New York.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo, UNDP (2006). *Beyond Scarcity: Power, Poverty and The Global Water Crisis, Human Development Report 2006*. Human Development Report 2006. Disponible en: <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2006/>.
- Pelak, N. y A. P. Porporato (2016). “Sizing a Rainwater Harvesting Cistern by Minimizing Costs”. *Journal of Hydrology*, 541, pp. 1340-1347. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.08.036>.
- Pérez-Uresti, S. I.; Ponce-Ortega, J. M. y A. Jiménez-Gutiérrez (2019). «A Multi-objective Optimization Approach for Sustainable Water Management for Places with Over-exploited Water Resources”. *Computers and Chemical Engineering*, 121, pp. 158-173. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.10.003>.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA SETAC (2004). *¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?* Naciones Unidas. Disponible en: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1731Why_take_a_

- life_ccycl_approach_ES.pdf. Consultado: 28 de agosto de 2019.
- Servicio Meteorológico Nacional, SMN (2018). *Resumen de precipitaciones históricas (1991-2014)*. Disponible en: <https://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>.
- WULCA (2017). *Descripción y base de datos de entrada del indicador AWARE*. Disponible en: <http://www.wulca-waterlca.org/aware.html>.
- Zhang-Tang, M.; Mooyoung, H. y H. Shervin (2019). "The Effect of Successive Low-Impact Development Rainwater Systems on Peak Flow Reduction in Residential Areas of Shizhuang, China". *Environmental Earth Sciences*, 78: 51. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8016-z>.