

DOI: 10.24850/j-tyca-14-05-05

Artículos

Rendimientos y eficiencia en el uso del agua de lechuga y tomate cherry en jardines urbanos

Yields and water use efficiency of lettuce and cherry tomatoes in urban gardens

Hugo Antonio Fernández¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5355-8476>

Raquel Salazar-Moreno², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6429-3824>

Efrén Fitz-Rodríguez³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9212-8719>

Irineo L. López-Cruz⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0630-6257>

Uwe Schmidt⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1649-2057>

Dennis Dannehl⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5830-3704>

¹Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México, uiem.haf@hotmail.com

²Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México, rsalazarm@chapingo.mx



³Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México, efitzr@chapingo.mx

⁴Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México, México, ilopezc@chapingo.mx

⁵Humboldt Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Albrecht-Daniel-Thaer Institute of Agricultural and Horticultural Sciences, Division Biosystems Engineering, Berlin, Germany, u.schmidt@agrar.hu-berlin.de

⁶Humboldt Universität zu Berlin, Faculty of Life Sciences, Albrecht-Daniel-Thaer Institute of Agricultural and Horticultural Sciences, Division Biosystems Engineering, Berlin, Germany, dennis.dannehl@agrar.hu-berlin.de

Autora para correspondencia: Raquel Salazar-Moreno, rsalazarm@chapingo.mx

Resumen

La horticultura urbana y periurbana (HUP) presenta grandes desafíos, como la poca disponibilidad en el suministro del agua y de tierra. No existen datos sobre la cantidad de agua que se utiliza para la producción de hortalizas en la Ciudad de México (CDMX). Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue la estimación de los rendimientos y la productividad del agua para dos hortalizas representativas en jardines urbanos: lechuga

romana y tomate cherry en 13 huertos urbanos de la CDMX. Asimismo, se estimó el volumen de agua de lluvia que se puede almacenar en cada huerto, utilizando la estación meteorológica más cercana. El rendimiento y la eficiencia del uso del agua para la producción de lechuga oscilaron entre 0.10 y 1.20 kg m⁻², así como de 0.21 a 2.93 kg m⁻³ de agua, respectivamente. Estos indicadores, para el caso de tomate cherry, estuvieron entre 0.25 y 3.40 kg m⁻² y entre 0.32 y 5.52 kg m⁻³ de agua, respectivamente. El riego en los huertos se hace de manera empírica y utilizando agua potable; el exceso en el suministro de agua puede ir de 0.27 a 0.4 m³ m⁻² para un ciclo completo de lechuga y tomate cherry, respectivamente. Utilizando una probabilidad de excedencia del 80 %, se estimó la captación de agua de lluvia para todo el año, generando un almacenamiento acumulado entre 0.261 y 0.5215 m³ m⁻² en los huertos urbanos. Esta cantidad de agua podría suplir los requerimientos hídricos de lechuga (de 0.128 a 0.389 m³ m⁻²) o tomate cherry (de 0.145 a 0.569 m³ m⁻²) para un ciclo completo.

Palabras clave: Ciudad de México, agricultura urbana, agua de lluvia, uso del agua, megaciudades.

Abstract

Urban and peri-urban horticulture presents major challenges, such as low water and land availability for agricultural use. So far, there are no data on the amount of water needed for vegetable production in Mexico City (CDMX). Therefore, the objective of this study was to estimate the yield and water use efficiency of two representative crops in urban gardens,



including romaine lettuce and cherry tomato, for 13 urban gardens in CDMX. In addition, the rainwater storage capacity was estimated using data from the closest weather station from each orchard, in order to make statements about the coverage of the water demand for the plants. Yield and water use efficiency for lettuce production ranged between 0.10 and 1.20 kg m⁻² as well as 0.21 to 2.93 kg m⁻³ water, respectively. These indicators for the case of cherry tomato were between 0.25 and 3.40 kg m⁻² and between 0.32 and 5.52 kg m⁻³ water, respectively. Irrigation in the urban gardens was done in an empirical way and using fresh water. It was found, in most of the cases, an excess of water supply which can be up to 0.27 and 0.4 m³ m⁻² for a complete growth season of lettuce and cherry tomato. The rainwater storage capacity in a year was estimated using an 80 % probability of exceedance. The accumulated rainwater storage varies from 0.261 to 0.5215 m³ m⁻² in the orchards, which could supply the water requirements for a complete season of lettuce (0.128 to 0.389 m³ m⁻²) or cherry tomato (0.145 to 0.569 m³ m⁻²).

Keywords: Mexico City, urban farming, rainwater, water use, megacities.

Recibido: 24/03/2021

Aceptado: 07/03/2022



Introducción

De acuerdo con las Naciones Unidas (United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Division, 2019), la Ciudad de México (CDMX) y su área metropolitana es una de las megaciudades más importantes del mundo, con una población de 21 581 000 habitantes. Tiene los problemas asociados de todas las grandes urbes, entre ellos: contaminación, aumento de la demanda de alimentos, y reducción de la disponibilidad de agua, suelo y energía (Farfan, Lohrmann, & Breyer, 2019; Lupia & Pulighe, 2015). En este contexto, la agricultura urbana y periurbana (AUP) representan una solución alternativa para: 1) abastecer de alimentos frescos en las ciudades (Khumalo & Sibanda, 2019); 2) reducir el impacto sobre el medio ambiente mediante el aumento de la biodiversidad, la mitigación del "efecto isla de calor urbano", la baja de los riesgos de inundación y disminución del kilometraje empleado en transporte de alimentos (McEldowney, 2017); 3) ser una fuente importante de empleos e ingresos (Aubry & Nastaran, 2019). La horticultura urbana y periurbana (HUP) es una parte de la AUP que se enfoca en la producción de hortalizas, así como de plantas ornamentales cultivadas dentro y alrededor de las urbes. La expansión de la HUP está limitada por los requerimientos específicos de la planta, al igual que por una accesibilidad general de agua y suelo en las ciudades (Li, Wang, Liu, & Zhu, 2019; Pulighe & Lupia, 2019). El área disponible para uso agrícola y hortícola, así como las condiciones climáticas en las ciudades generalmente no son adecuadas, lo que limita la gama de cultivos que se pueden sembrar. En áreas tropicales y subtropicales de países en

desarrollo, la cantidad de agua requerida para cultivar tomate es de 400 a 800 L m⁻² durante todo el ciclo (van Veenhuizen, 2006) y el rendimiento puede ser de hasta 50 kg de producto fresco por metro cuadrado por año, que depende sobre todo de la tecnología aplicada (FAO, 2001). Por lo general, HUP utiliza el suministro de agua potable para el riego de cultivos, aumentando la presión de este recurso ya limitado en los centros urbanos. De ahí que sea necesario buscar fuentes de agua confiables en cantidad y calidad (Amos, Rahman, Karim, & Gathenya, 2018).

De acuerdo con Garcia (2018), el agua de lluvia de la CDMX contiene microorganismos, aluminio, plomo, zinc, mercurio, arsénico y níquel, entre otros, y solo puede ser usada para tareas como lavado de autos y ropa, o para riego, pero no como agua potable para humanos. Por lo tanto, el agua de lluvia es una fuente de agua alternativa para el riego de las plantas, que puede almacenarse en la estructura y arquitectura del edificio (Skara *et al.*, 2020). En particular, en México existen pocos estudios en cuanto al uso del almacenamiento de agua de lluvia para abastecer los requerimientos de agua para la producción de hortalizas en las ciudades (McDougall, Kristiansen, & Rader, 2019).

Algunas de las hortalizas más cultivadas en los huertos urbanos son lechuga y tomate; el consumo por persona al año en México es de 2.5 kg (Bobadilla, Rivera, & Del-Moral, 2010) y 13.8 kg, respectivamente (SIAP, 2016). En 2018, la producción de tomate fue de 1 948 millones de toneladas, con un rendimiento promedio de 76.8 toneladas ha⁻¹, siendo la hortaliza más importante del país. El tomate se produce en una superficie de 49 415.72 ha y aporta a México 31 150 millones de pesos. En el mismo año, la producción de lechuga fue de 486 439, toneladas con

un rendimiento promedio de 23.7 t·ha⁻¹ (SIAP, 2019). Dada la importancia actual de la horticultura urbana en el mundo, así como los problemas de disponibilidad de agua para uso hortícola, el objetivo de este trabajo fue estimar los rendimientos y la eficiencia en el uso del agua de lechuga y tomate cherry producidos en huertos urbanos en la CDMX. Además, se evaluaron los requerimientos de agua de estos cultivos y el volumen de agua de lluvia que se podría almacenar en cada huerto, a fin de satisfacer la demanda hídrica de estas hortalizas.

Materiales y métodos

Jardines urbanos y cultivos estudiados

De un total de 16 alcaldías en la CDMX, se seleccionaron 13 huertos urbanos, los cuales se evaluaron durante un ciclo de producción de lechuga romana (*Lactuca sativa* L.) y tomate cherry (*Solanum lycopersicum cerasiforme*) en 2018. La Figura 1 muestra la distribución espacial de los huertos escogidos, incluyendo las estaciones meteorológicas utilizadas para la estimación del almacenamiento de agua de lluvia.

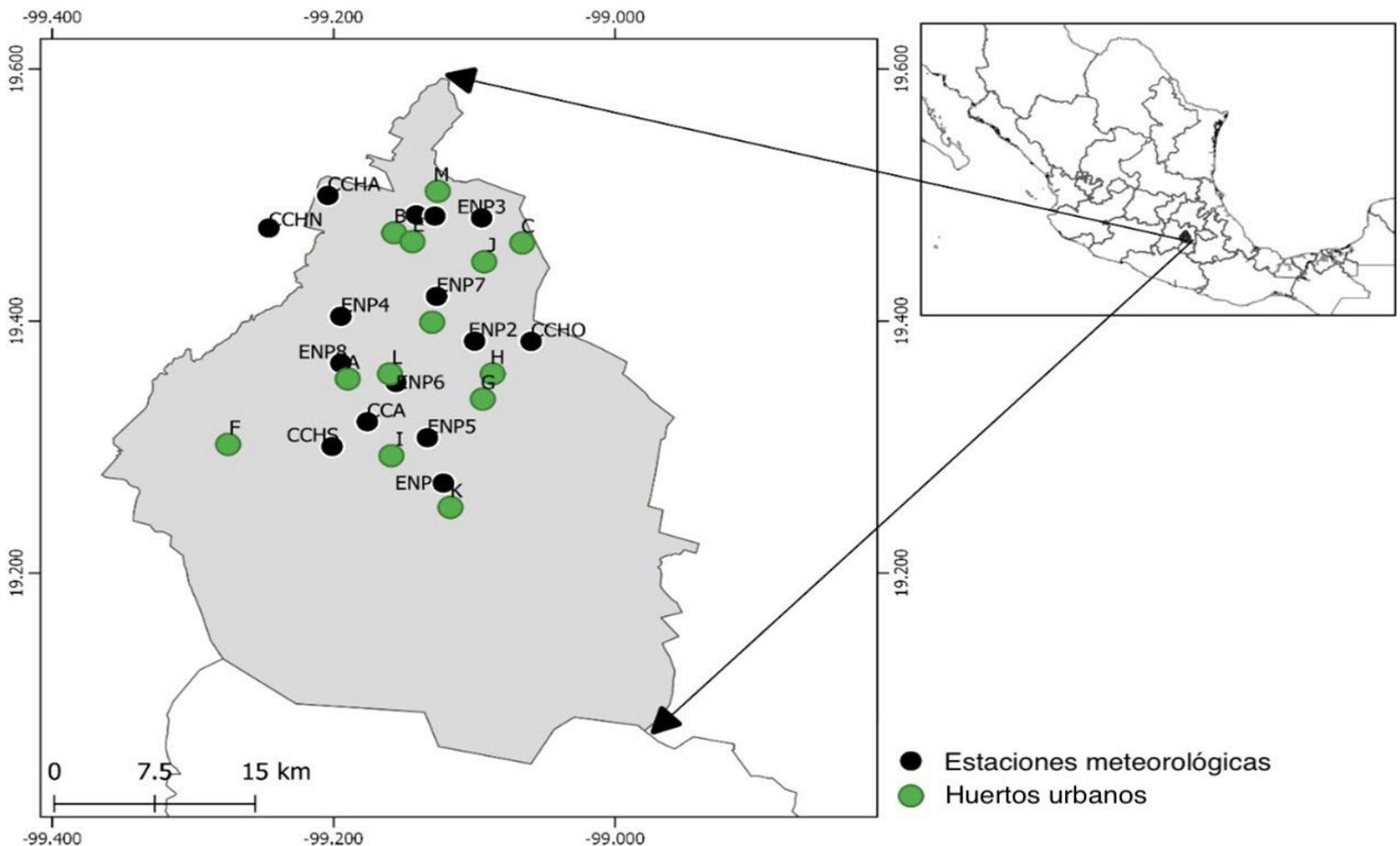


Figura 1. Ubicación geográfica de los huertos urbanos y las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.

La mayoría de los huertos urbanos se dedican a la enseñanza y demostración de la agricultura urbana, y su producción es para autoconsumo, o venta a los vecinos y mercados locales. El huerto urbano A está ubicado en un hospital; B y C son jardines comunitarios dedicados a la enseñanza y recuperación de espacios públicos; D es para la integración de los adultos mayores a las actividades productivas y de

recreación; F, G son jardines ubicados en invernaderos privados; I es un huerto privado en la azotea; J y M son huertos privados; E, H y K son administrados por investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana; L está dedicado a la recreación de los empleados de la empresa Zimat. La Tabla 1 presenta las características de los huertos urbanos con el número de identificación (ID) asociado y las estaciones meteorológicas (EM) ubicadas cerca de los jardines.

Tabla 1. Características de los 13 huertos urbanos analizados en la Ciudad de México.

Huerto	ID	Alcaldía	Tipo de jardín urbano	Riego	Textura	AAS	P_{suelo}	EM
Asilo Mundet	A	Álvaro Obregón	Campo abierto/macetas	Manual	Ligera	60	40	ENP8
Azcapotzalco	B	Azcapotzalco	Campo abierto/suelo	Manual	Pesada	200	100	CCHV
Bosques de Aragón	C	Bosques de Aragón	Invernadero/macetas	Goteo	Mediana	290	30	ENP3
Iztacalco	D	Iztacalco	Campo abierto/suelo	Manual	Mediana	290	80	ENP7
Los Niños	E	Cuauhtémoc	Campo abierto/suelo	Manual	Mediana	290	100	ENP9
Magdalena Contreras	F	Magdalena Contreras	Invernadero /suelo	Goteo	Pesada	200	60	CCHS
Matlaloc	G	Iztapalapa	Invernadero /suelo	Goteo	Mediana	290	50	ENP2
San Miguel	H	Iztapalapa	Campo abierto /suelo	Manual	Mediana	290	50	CCHO
Tlalpan	I	Tlalpan	Techos verdes/ macetas	Manual	Ligera	60	30	CCA
Venustiano Carranza	J	Venustiano Carranza	Techos verdes / macetas	Manual	Ligera	60	20	ENP3
Xochimilco	K	Xochimilco	Campo abierto/suelo	Manual	Pesada	200	80	ENP1
Zimat	L	Coyoacán	Techos verdes/macetas	Manual	Pesada	200	40	ENP6
Tonantzin	M	Gustavo A. Madero	Campo abierto/suelo	Manual	Mediana	290	100	ENP9

AAS = capacidad de almacenamiento de agua en el suelo ($\text{mm agua m suelo}^{-1}$) (Smith, 1992)

P_{suelo} = profundidad de las raíces (cm)

EM = estación meteorológica

El área experimental fue de 1 m² por cada cultivo y por cada huerto urbano. Se tomaron muestras de suelo de 0.5 kg a una profundidad de 20 cm y se almacenaron en bolsas de polietileno a 4 °C hasta su análisis en el Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal de la Universidad Autónoma Chapingo. Luego de la identificación de la textura del suelo, se utilizó el programa CROPWAT desarrollado por la FAO (Smith, 1992) para determinar la capacidad de almacenamiento de agua disponible del suelo (AAS) (mm agua m suelo⁻¹).

Las semillas de lechuga y tomate cherry se sembraron el 1 de abril de 2018, en un suelo preparado con composta en relación 1:1 y fertilizante ultrasol (15-30-15). Ambas hortalizas fueron trasplantadas el 30 de abril de 2018 en macetas para los sitios A, C, I, J, L y directamente en el suelo para el resto de los jardines, a una densidad de tres plantas m⁻². Las plantas de tomate cherry se dejaron con tres tallos principales con tres racimos cada uno. Los cultivos se cosecharon el 4 de julio y el 23 de agosto de 2018, a los 95 y 143 días después de la siembra (DDS), para lechuga y tomate cherry, respectivamente. En cada huerto urbano se midió el agua aplicada a los cultivos y el producto cosechado para calcular los rendimientos (Y, kg m⁻²) y la eficiencia en el uso del agua (EUA, kg m⁻³) para el ciclo de producción, siguiendo la expresión citada por Salazar, Rojano y López (2014).

$$EUA = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Uso del agua (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

Balance hídrico del suelo en los huertos urbanos

El déficit de agua en el suelo es un factor limitante para la germinación y el crecimiento de las plantas. Para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos se realizó un balance hídrico del suelo, de acuerdo con Pratt, Allen, Rosenberg, Keller, & Kopp (2019) (Ecuación (2)):

$$ADT_i = ADT_{i-1} + E_{pi} + R_i - ET_{ci} \quad (2)$$

Donde:

ADT_i = almacenamiento de agua en el suelo en el día i (mm).

ADT_{i-1} = almacenamiento de agua en el suelo en el día $i - 1$ (mm).

E_{pi} = precipitación efectiva día i (mm).

R_i = riego en el día i (mm).

ET_{ci} = evapotranspiración del cultivo en el día i (mm).

El almacenamiento de agua en el suelo en el día i (ADT_i , mm) representa la cantidad de agua que un cultivo puede extraer de su zona radicular, y cuya magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular (día i). ADT_{i-1} (mm) se determinó usando la Ecuación (3) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006; Ministry of Agriculture, 2015):

$$ADT_{i-1} = AAS * P_{suelo} \quad (3)$$



Donde:

AAS = capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (mm m^{-1})
(depende de la textura, Tabla 1).

P_{suelo} = profundidad de las raíces (m) (Tabla 1).

La precipitación efectiva se estimó usando un porcentaje fijo de la precipitación diaria sugerida por la FAO (1992) (Ecuación (4)):

$$E_{pi} = aP_i \quad (4)$$

Donde:

a = coeficiente constante (0.8).

P_i = precipitación en el día i (mm).

El suministro total de agua de riego al cultivo para todo el ciclo de producción está dado por la Ecuación (5):

$$R = \sum_i R_i \quad (5)$$

Los datos climatológicos se obtuvieron de la Red de Estaciones Meteorológicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM &

PEMBU, 2022). En cada huerto existe una estación meteorológica en un radio de 5 km (Tabla 1).

Se calculó la evapotranspiración de referencia para cada cultivo y huerto urbano, utilizando la ecuación de Penman-Monteith descrita en Allen *et al.* (2006); se implementó en Matlab v. 2018a con los siguientes datos diarios: temperatura mínima y máxima, humedad relativa máxima y mínima, velocidad del viento, y radiación solar de los años 2007-2018.

La evapotranspiración del cultivo (mm d^{-1}) se obtuvo multiplicando la evapotranspiración de referencia por el coeficiente del cultivo, teniendo en cuenta las diferentes etapas del cultivo descritas en la Figura 2.

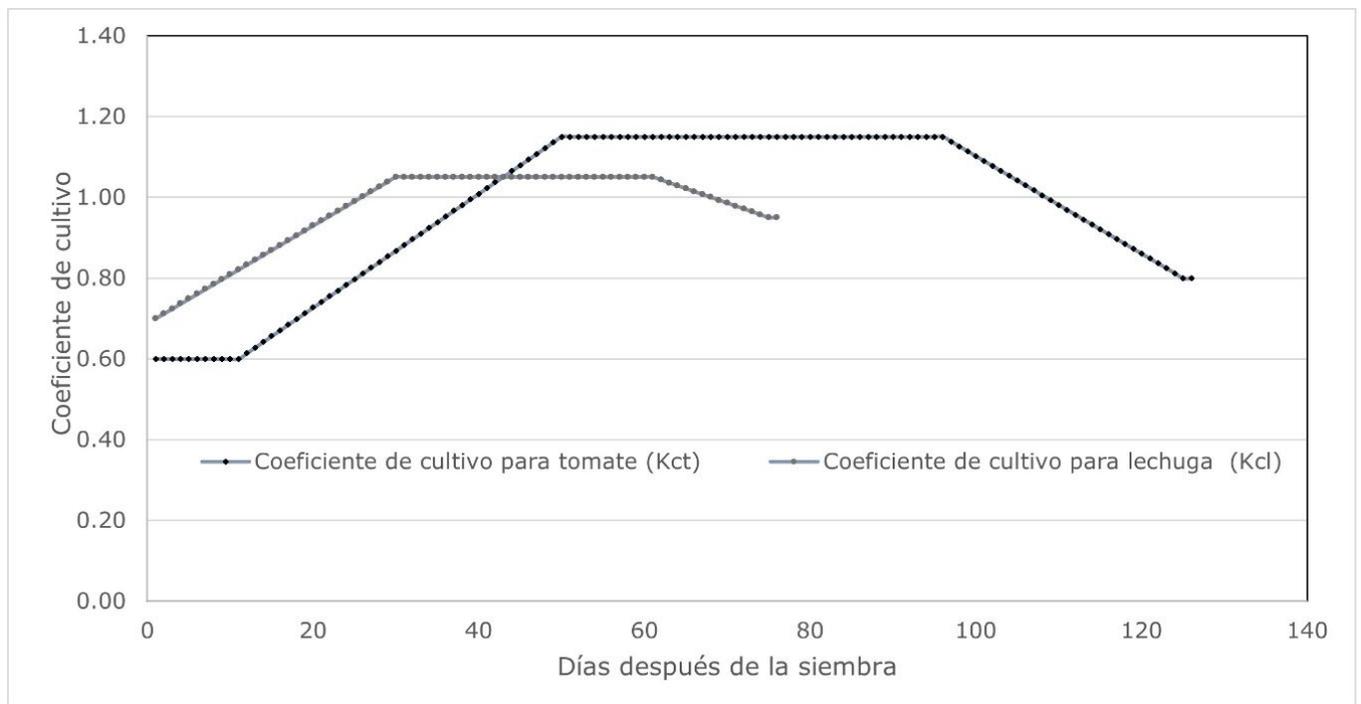


Figura 2. Coeficientes de cultivo de lechuga y tomate cherry.
Elaboración propia, valores tomados de Allen *et al.* (2006).

En todos los huertos urbanos, el riego de los cultivos se lleva a cabo de forma empírica. Uno de los propósitos de este estudio fue encontrar la cantidad de agua que se puede ahorrar si se aplica el riego de acuerdo con los requerimientos del cultivo.

El riego diario R_i aplicado a la lechuga y tomate cherry en cada huerto fue proporcionado por los encargados de cada huerto, quienes hicieron un registro diario de la cantidad de agua aplicada al cultivo. En 10 huertos, el agua se aplicó mediante regaderas manuales y tres huertos utilizaron sistema de riego por goteo (Tabla 1).

La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo (AFA_i , mm) y se calculó con la Ecuación (6) (Angella & Salgado, 2016; Allen *et al.*, 2006):

$$AFA_i = ADT_i * \rho \quad (6)$$

Donde:

ρ = fracción promedio del total de agua disponible en el suelo (ADT), que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés.

En cada huerto urbano se registró el número de días posteriores a la siembra en el que el cultivo presentó estrés hídrico ($DDSE$), lo que puede tener un efecto directo en los rendimientos del cultivo.

El requerimiento total de riego del cultivo (RR_{ct} mm) en el ciclo se presenta en la Ecuación (7). Para el caso de los huertos urbanos en invernadero (C, F y G) $P_i = 0$ y por lo tanto $E_{pt} = 0$:

$$RR_{ct} = ET_{ct} - E_{pt} \quad (7)$$

Donde:

ET_{ct} = evapotranspiración total del cultivo durante el ciclo (mm).

E_{pt} = precipitación total efectiva durante el ciclo (mm).

Debido a que el riego se realiza de forma empírica, la diferencia entre los requerimientos totales de riego del cultivo (RR_{ct} , mm) y el riego total aplicado a los cultivos (R)(mm) proporciona el déficit o exceso de agua aplicada a los cultivos.

Almacenamiento de agua de lluvia en los huertos urbanos

La cantidad de agua de lluvia que es posible recolectar en cada huerto se estimó asumiendo un techo de lámina, siguiendo el procedimiento descrito en FAO (2013) (Ecuación (8)):

$$\text{Almacenamiento} = \frac{P80\% \cdot A \cdot C}{1000} \quad (8)$$

Donde:

Almacenamiento = agua de lluvia recolectada en m³.

A = área de captación en m².

C = coeficiente de escorrentía (0.7).

P80% = probabilidad de excedencia al 80% de ocurrencia (mm).

La probabilidad de excedencia se obtuvo utilizando la Ecuación (9) sugerida en FAO (2013):

$$P\% = \frac{m-0.375}{N+0.25} * 100 \quad (9)$$

Donde:

m = número de orden.

N = número total de observaciones.

Se utilizaron registros de precipitación (2007-2018) de 11 estaciones meteorológicas para calcular el 80 % de probabilidad de excedencia (el 80 % de los años de precipitación excede el valor considerado).

Resultados y discusión

Balance de agua en el suelo

En todos los huertos urbanos se hizo un balance hídrico diario para cada cultivo utilizando la Ecuación (1). La Tabla 2 presenta un resumen para un ciclo completo de producción de lechuga y tomate cherry. Desde la siembra hasta la cosecha se realizó una comparación diaria entre el agua disponible para los cultivos ($ADT_i - ADT_{i-1}$) y AFA_i (Ecuación (6)), que es similar al término agotamiento máximo permisible (AMP). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán situaciones de estrés. El número de días en los que $ADT_i - ADT_{i-1} < AFA_i$ y el cultivo estuvo bajo estrés hídrico se muestra en la Tabla 2. Solo los jardines A, I y J registraron muchos días en los que las plantas tuvieron estrés hídrico ($DDSE > 0$).

Tabla 2. Balance de agua del suelo para los 13 jardines urbanos.

HU	Lechuga						Tomate cherry					
	E_{pt}	ET_{ct}	RR_{ct}	R	$R - RR_{ct}$	$DDSE$	E_{pt}	ET_{ct}	RR_{ct}	R	$R - RR_{ct}$	$DDSE$
A	158	350	192	250	58	48, 56-75	374	522	148	380	232	60-74, 116-117
B	147	360	213	245	32	0	242	539	297	330	33	0
C	0	389	389	415	26	0	0	569	569	915	346	0
D	138	318	180	265	85	0	243	477	234	345	111	0
E	147	360	213	220	7	0	242	539	297	360	63	0
F	0	339	339	545	206	0	0	508	508	895	387	0
G	0	350	350	400	50	0	0	522	522	665	143	0
H	137	326	189	240	51	0	261	488	227	420	193	0
I	104	334	230	218	-12	44-93	278	504	226	322	96	48, 54-104, 106-108, 112-126
J	114	382	268	330	62	44-73	217	569	352	538	186	46, 56, 58-72, 110, 112-124
K	82	328	246	265	19	0	237	505	268	490	222	0
L	169	356	187	410	223	0	275	544	269	670	401	0
M	175	303	128	355	227	0	312	457	145	530	385	0

HU= huerto urbano

E_{pt} = precipitación total efectiva durante el ciclo (mm)

ET_{ct} = evapotranspiración del cultivo durante el ciclo completo (mm)

RR_{ct} = requerimientos de agua del cultivo (mm)

R = riego durante el ciclo completo (mm)

$DDSE$ = número de días después de la siembra en que el cultivo estuvo estresado.

Considerando todo el ciclo de producción, el huerto urbano I presenta un caso extremo en el que el riego estuvo por debajo de los requerimientos hídricos del cultivo de lechuga ($R - RR_{ct} < 0$).

Aunque todos los huertos urbanos están ubicados en el centro y norte de la CDMX, existen variaciones importantes en la precipitación efectiva total (E_{pt}) y la evapotranspiración total del cultivo (ET_{ct}) en el ciclo de producción de lechuga y tomate cherry, como se describe en la Tabla 3, las cuales tienen una gran influencia en la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos.

Tabla 3. Variaciones de la precipitación efectiva total y de la evapotranspiración.

	Lechuga		Tomate cherry	
	E_{pt}	ET_{ct}	E_{pt}	ET_{ct}
Promedio	137.10	345.77	268.10	518.69
SD	29.35	24.53	45.84	33.60
Rango	93.00	86.00	157.00	112

SD = desviación estándar.

Rendimiento de cultivo y eficiencia en el uso del agua

Los huertos urbanos muestran una gran diferencia en el rendimiento y en la eficiencia del uso del agua para ambos vegetales, a pesar de que se utilizó la misma composta y fertilizante NPK (14-10-34) para la preparación del suelo y las plántulas.

Lechuga

Considerando todos los huertos urbanos, el rendimiento de lechuga varió entre 0.10 y 1.20 kg m⁻², y la eficiencia en el uso del agua (EUA) osciló entre 0.21 y 2.93 kg·m⁻³ (Figura 3). El mayor rendimiento y EUA se obtuvieron para las plantas cultivadas en el huerto urbano H. Sin embargo, estos hallazgos están por debajo de los reportados por Sammis, Kratky y Wu (1988) en un experimento con diferentes aplicaciones de agua y fechas de trasplante. Los autores cosecharon entre 1.23 y 4.38 kg m² de lechuga producida en Hawái en condiciones de campo abierto. Michelin *et al.* (2020) estudiaron dos variedades de lechuga en Brasil con dos tratamientos de CE (1.2 y 1.8 dS m⁻¹) para un clima semiárido y obtuvieron rendimientos por arriba (1.8 kg m⁻²) de los encontrados en el presente estudio.

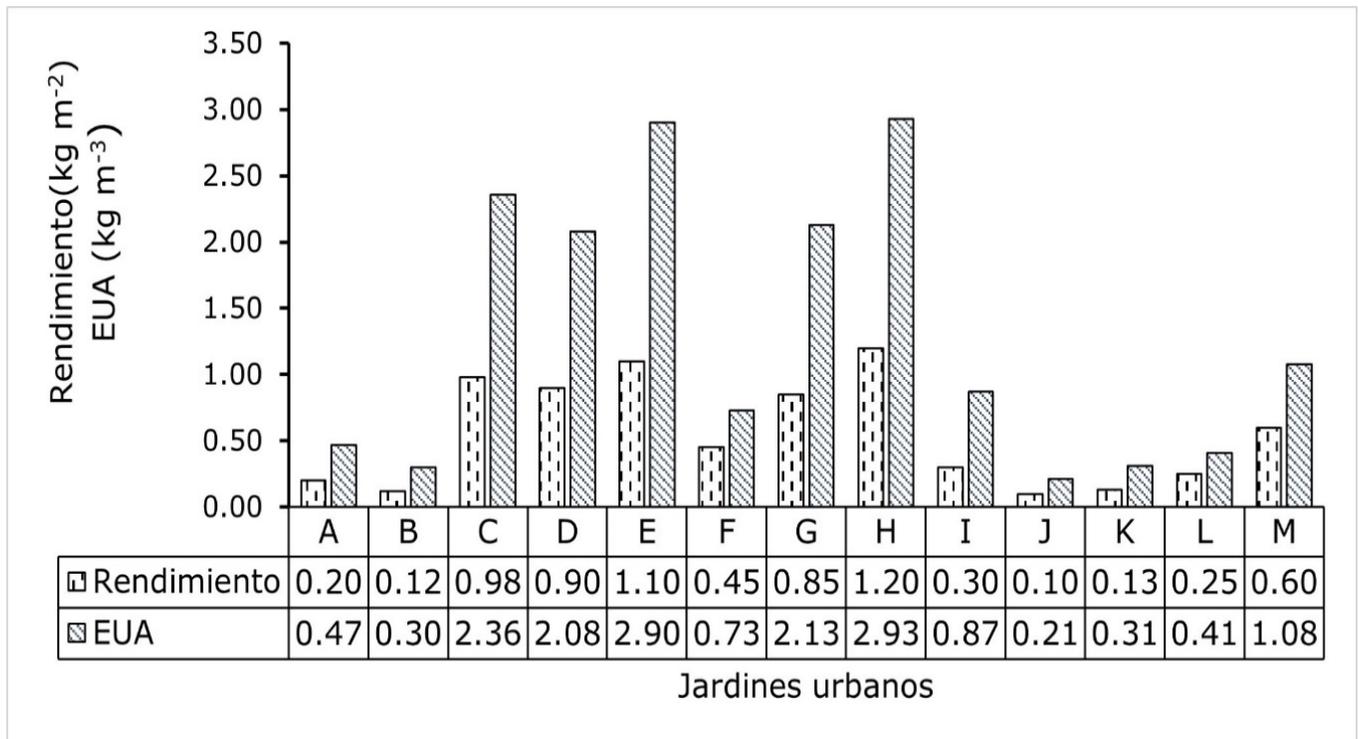


Figura 3. Rendimiento y uso eficiente del agua para lechuga en jardines urbanos.

La EUA reportada por Michelin *et al.* (2020) estuvo entre 8.54 y 38.4 kg m⁻³. Asimismo, Nederhoff y Stanghellini (2010) encontraron una EUA de 7.5 kg m⁻³ para lechuga con base en un promedio de 65 países; estos resultados están muy por encima de los reportados en este estudio.

En contraste, Diansari (2019) calculó eficiencias en el uso del agua que oscilan entre 1.04 y 1.63 kg m⁻³ para lechuga cultivada bajo diferentes composiciones de turba en condiciones de campo abierto en Indonesia, que están dentro del rango de las obtenidas de este estudio.

Tomate cherry

Los rendimientos de tomate cherry oscilaron entre 0.25 y 3.4 kg m⁻² (Figura 4). Se midieron rendimientos menores a 1 kg m⁻² en seis huertos urbanos (A, B, I, J, K y L). Es posible que diferentes factores hayan influido en estos resultados: 1) la textura del suelo que afecta la capacidad de retención de agua y, en consecuencia, el rendimiento del cultivo (He & Wang, 2019); 2) la profundidad del suelo que influye en el suministro de nutrientes y la humedad del suelo (Murata *et al.*, 2012); 3) el suministro de agua al cultivo, ya que las plantas con estrés hídrico pueden reducir los rendimientos (Sadras, Villalobos, Orgaz, Fereres, & Villalobos, 2016); y 4) la salinidad en el suelo (Kumar, Wani, Suprasanna, & Tran, 2018).

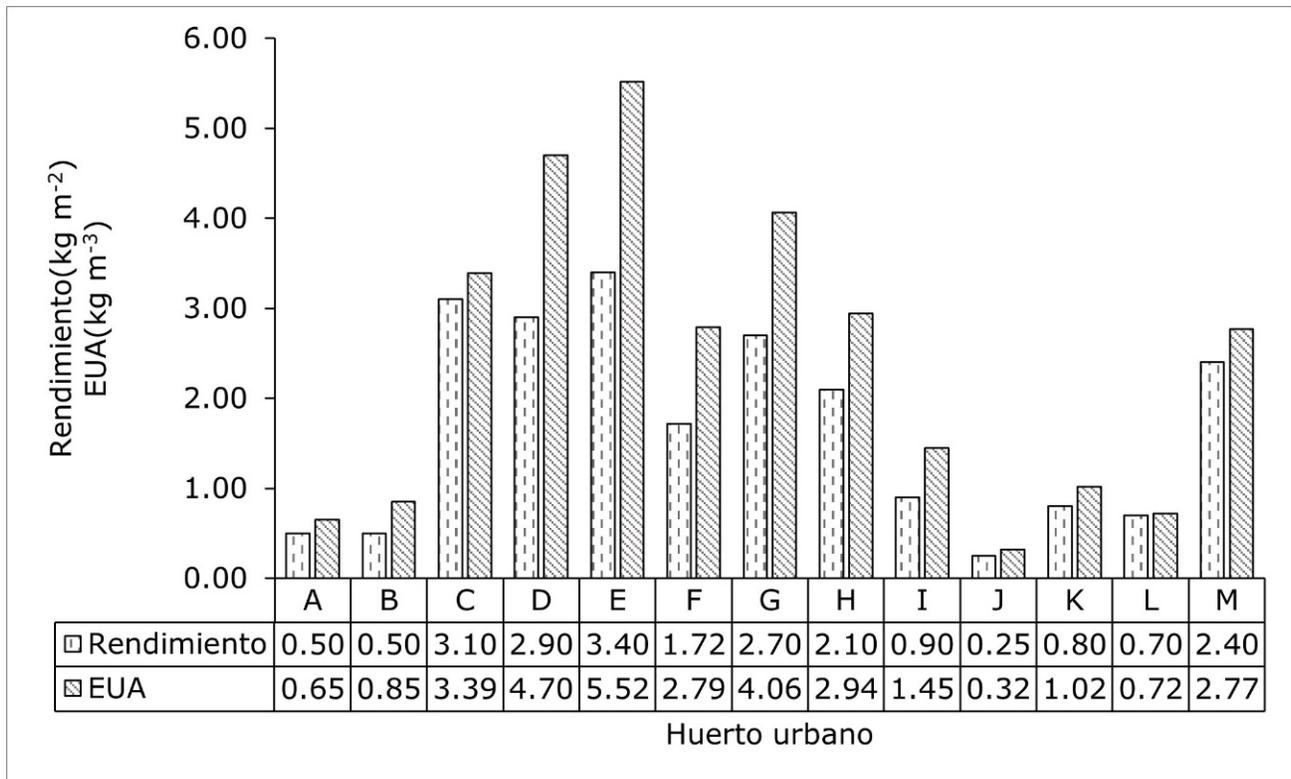


Figura 4. Rendimientos y eficiencia en el uso del agua para tomate cherry en los huertos urbanos.

La textura del suelo en los huertos A, I, J es ligero (arenoso grueso) y con una densidad aparente de 2.65 g cm^{-3} . El ADT es la misma en los tres huertos (60 mm). Sin embargo, existen dos diferencias entre ellos: la profundidad del suelo (40, 30 y 20 cm) y el número de días en que las plantas sufrieron estrés hídrico (15, 67, 15). Aunque los huertos A y J tuvieron el mismo número de días con estrés hídrico, la profundidad de la raíz en A es mayor que en J, lo que da como resultado un mayor rendimiento de las plantas cultivadas en A en comparación con J. La profundidad del suelo es un factor crítico para el crecimiento de las plantas

y puede limitar físicamente la penetración de las raíces y crear problemas de riego (Abd-Elmabod *et al.*, 2019). Según Lu *et al.* (2021), sería posible que se formen menos raíces en los medios de crecimiento con bajo volumen de suelo, lo que se asocia con una menor absorción de agua y captación de nutrientes y, por tanto, una menor producción de biomasa. Estos hallazgos concuerdan con el hecho de que las plantas de tomate producidas en el huerto urbano E, con una profundidad de suelo de 100 cm, tuvieron el mayor rendimiento y eficiencia en el uso del agua, pues las raíces pueden expandirse mejor y absorber más nutrientes.

Liu *et al.* (2019), por ejemplo, afirman que la escasez de agua es la principal limitación para obtener altos rendimientos de los cultivos en muchas zonas áridas; en particular, el nivel de humedad del suelo tuvo un efecto significativo en el rendimiento del tomate. Sin embargo, no se encontró explicación para los bajos rendimientos y EUA en los jardines B y K, debido a que los cultivos no sufrieron estrés hídrico y la profundidad del suelo fue de 100 y 80 cm, respectivamente. La cuarta razón de un cambio en el rendimiento podría ser la salinidad del suelo. Venkateswarlu (2012) afirma que la concentración de sal reduce el potencial osmótico de la solución del suelo, lo que genera estrés hídrico en la raíz, incluso con suficiente disponibilidad de agua en el suelo. Esta suposición es confirmada por Huang *et al.* (2015), y Mohamed, El-Mogy y Stevens (2018), quienes mencionan que los rendimientos de tomate cherry disminuyeron con valores crecientes de CE en China y Egipto, respectivamente; es necesario llevar a cabo más estudios en los suelos de los huertos urbanos para conocer estos parámetros.

Considerando todos los huertos urbanos estudiados en CDMX, la eficiencia en el uso del agua para la producción de tomate cherry estuvo entre 0.32 y 5.52 kg m⁻³ (Figura 4). Tales resultados están muy por debajo de los mostrados por van Veenhuizen (2006) (de 7.14 a 16.66 kg m⁻³), y Nederhoff y Stanghellini (2010) (5.4 kg m⁻³) para el cultivo de tomate.

Suponemos que algunos de estos bajos valores en términos de rendimiento y EUA se deben al estrés hídrico, como se muestra para las plantas cultivadas en los huertos urbanos A, I y J. Sin embargo, existen más factores que deben estudiarse en los vegetales cultivados en las ciudades, como la contaminación.

Planeación futura en los jardines urbanos

Los huertos urbanos estudiados se ubican en el centro y norte de la CDMX. La temporada de lluvias es de junio a septiembre, con una variación considerable en la cantidad de lluvia. La Figura 5 brinda una estimación del agua de lluvia por mes con una probabilidad de excedencia del 80 %, lo que significa que a partir de un año representativo entre 2007 y 2018, la cantidad de lluvia por mes varía entre 0 y 138 mm. La posible probabilidad de excedencia del almacenamiento de agua de lluvia (P80 %) depende de la precipitación y del área disponible dedicada al almacenamiento de agua en cada jardín urbano.

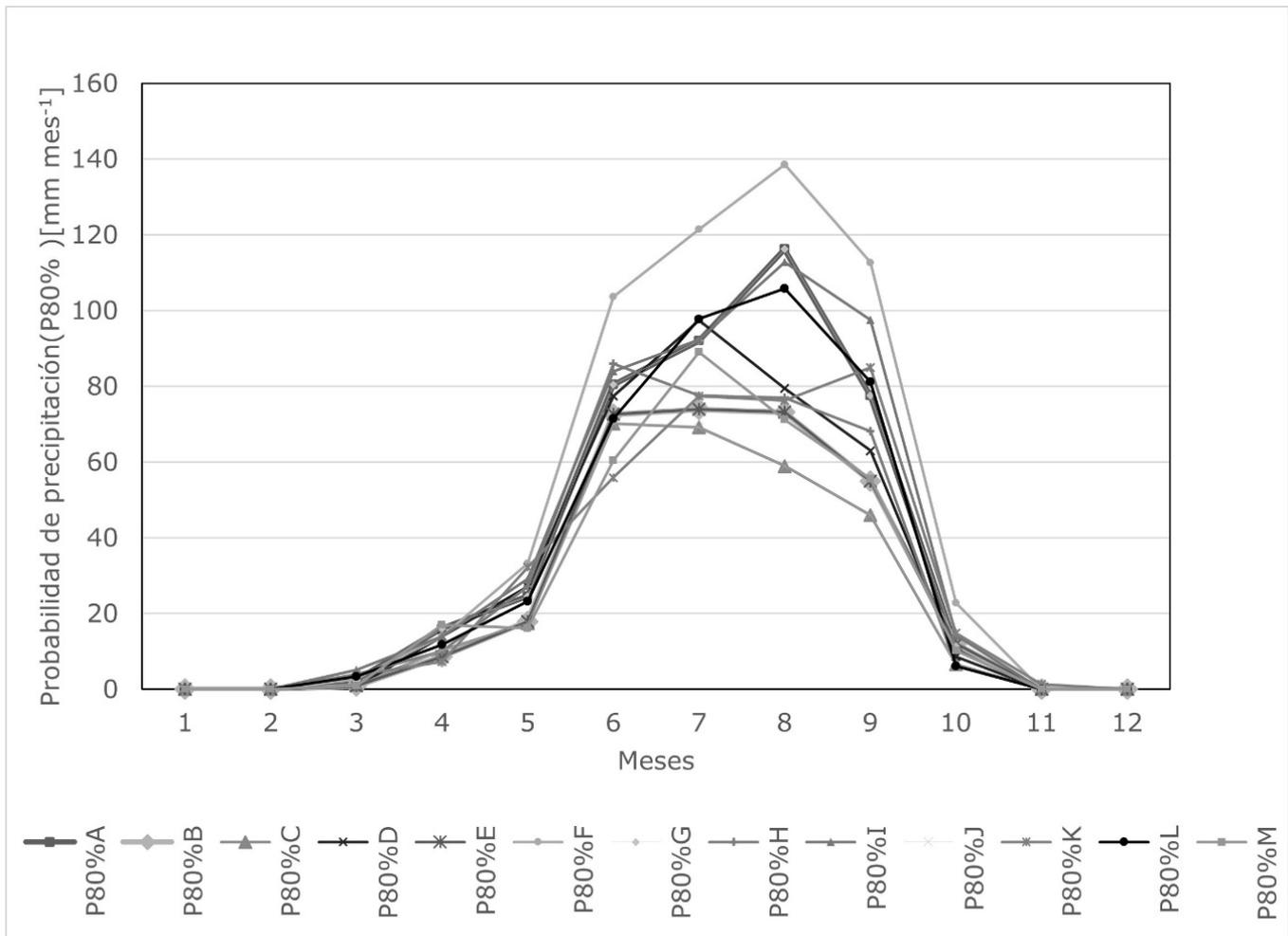


Figura 5. Estimación del agua de lluvia por mes utilizando una probabilidad de excedencia del 80 % para el periodo 2007-2018.

El P80 % máximo registrado para los 13 huertos urbanos varía entre 70 y 138 mm mes⁻¹; es posible generar un almacenamiento acumulado de agua de lluvia entre 0.261 y 0.5215 m³ m⁻² (Figura 6). Se recomienda almacenar el agua de lluvia en los huertos urbanos; este volumen de agua podría ser suficiente para cubrir la mayor parte de los requerimientos

hídricos para cultivar lechuga ($0.128-0.389 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$) o tomate cherry ($0.145-0.569 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$) (Tabla 2).

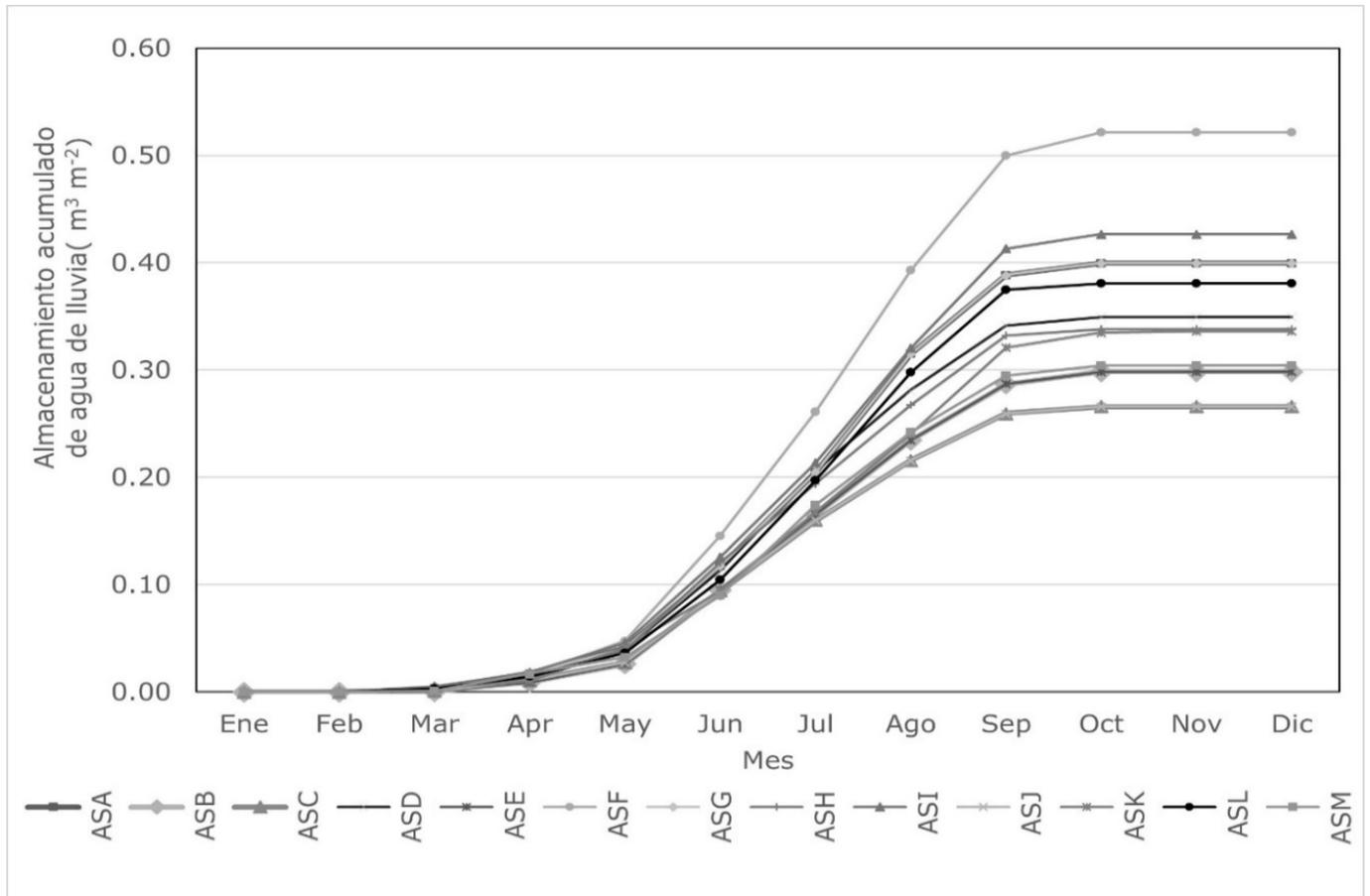


Figura 6. Almacenamiento acumulado de agua de lluvia (AS) para 13 huertos urbanos (A-M) para un año representativo utilizando la estimación de agua de lluvia (P80 %).

Conclusiones

En el presente estudio, los rendimientos y la eficiencia en el uso del agua de lechuga y tomate cherry variaron entre los huertos urbanos en la CDMX debido principalmente a diferentes condiciones de crecimiento, condiciones del suelo y disponibilidad de agua.

Hasta el momento, el riego de hortalizas en los huertos urbanos se realiza de manera empírica y utilizando agua potable. Los requerimientos de agua para los cultivos se estimaron con base en la precipitación efectiva y la evapotranspiración de los cultivos, estimada con datos climatológicos de la estación meteorológica más cercana a cada huerto urbano. Se encontró que se pueden lograr grandes ahorros de agua si los productores riegan de acuerdo con los requerimientos de agua de los cultivos. La cantidad máxima de agua aplicada en exceso para un ciclo de crecimiento de lechuga y tomate cherry fue de 227 mm ($0.227 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$) y 401 mm ($0.401 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2}$), respectivamente, lo que genera una baja eficiencia en el uso del agua.

La recolección de agua de lluvia se propone como una solución para aliviar la demanda de agua en la agricultura urbana. El agua de lluvia almacenada ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2}$) puede ser suficiente para cumplir con la mayoría de los requerimientos de agua del cultivo en la producción de un ciclo completo de lechuga o tomate cherry.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Cooperación Bilateral entre México y la BMBF en Alemania: 267655 Horticultura Urbana en Ambientes de Controlados. Asimismo, fue financiado por el Ministerio Federal de Educación e Investigación/Agencia de Gestión de Proyectos DLR (Código de financiación 01DN16032).

Referencias

- Abd-Elmabod, S. K., Jordán, A., Fleskens, L., Phillips, J. D., Muñoz-Rojas, M., van-der-Ploeg, M., Anaya-Romero M., El-Ashry, S., & De-la-Rosa, D. (2017). Chapter 7. Modeling agricultural suitability along soil transects under current conditions and improved scenario of soil factorsb. In: Brevik, E., & Muñoz-Rojas, M. (eds.). *Soil mapping and process modeling for sustainable land use management* (pp. 193-219). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Inc. DOI: 10.1016/B978-0-12-805200-6.00007-4
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Recuperado de <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Amos, C. C., Rahman, A., Karim, F., & Gathenya, J. M. (2018). A scoping review of roof harvested rainwater usage in urban agriculture: Australia and Kenya in focus. *Journal of Cleaner Production*, 202, 174-190. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.08.108

- Angella, G. F., & Salgado, R. (2016). *Conceptos básicos de las relaciones agua-suelo-planta*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/322888562_Conceptos_basicos_de_las_relaciones_agua-suelo-planta/stats
- Aubry, C., & Nastaran, M. (2019). Urban agriculture and health: Assessing risks and overseeing practices. *Field Actions Science Reports*, Special Issue 20(2019), Urban Agriculture: Another Way to Feed Cities. Recuperado de <http://journals.openedition.org/factsreports/5536>
- Bobadilla, S. E. E., Rivera H. G., & Del-Moral, B. L. E. (2010). Factores de competitividad del cultivo de lechuga en Santa María Jajalpa, Estado de México. *Análisis Económico*, 25(59), 143-154. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41315994009>
- Diansari, L. E. (2019). Water and land productivity of lettuce (*Lactuca sativa*) at floating on wetland. *Sriwijaya Journal of Environment*, 4(2), 104-108. DOI:10.22135/sje.2019.4.2.104-108
- García, M. R. (2018). El agua de lluvia de la CDMX, no apta para consumo humano directo. *Boletín UNAM-DGCS-670*. Recuperado de https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2018_670.html
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1992). Cropwat. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. FAO. *Estudios Riegos y Drenajes*, 46, 23-24. Recuperado de https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/precipitacionefectiva05_tcm30-82980.pdf

- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2001). *Urban and periurban agriculture*. The special program for food security. Handbook Series Volume III. SPFS/DOC/27.8. Recuperado de <https://www.fao.org/unfao/bodies/coag/coag15/docs/X0076E>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia*. Recuperado de <https://agua.org.mx/biblioteca/captacion-y-almacenamiento-de-agua-de-lluvia/>
- Farfan, J., Lohrmann, A., & Breyer, C. (2019). Integration of greenhouse agriculture to the energy infrastructure as an alimentary solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 368-377. DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.084
- He, D., & Wang, E. (2019). On the relation between soil water holding capacity and dryland crop productivity. *Geoderma*, 353, 11-24. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.06.022
- Huang, C., Peng, F., You, Q., Xue, X., Wang, T., & Liao, J. (2015). Growth, yield and fruit quality of cherry tomato irrigated with saline water at different developmental stages. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science*, 66(4), 317-324. Recuperado de <https://scihub.tw/10.1080/09064710.2015.1111931>

- Khumalo, N., & Sibanda, M. (2019). Does Urban and Peri-Urban Agriculture Contribute to Household Food Security? An Assessment of the Food Security Status of Households in Tongaat, eThekweni Municipality. *Sustainability*, 11(4), 1082-1082. DOI: 10.3390/su11041082
- Kumar, V., Wani, S. H., Suprasanna, P., & Tran, L. S. P. (eds.). (2018). *Salinity responses and tolerance in plants*. Vol. 2. Exploring RNAi, genome editing and systems biology. Berlin, Germany: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-90318-7
- Li, W., Wang, D., Liu, S., y Zhu, Y. (2019). Measuring urbanization-occupation and internal conversion of peri-urban cultivated land to determine changes in the peri-urban agriculture of the black soil region. *Ecological Indicators*, 102, 328-337. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.02.055
- Liu, J., Hu, T., Feng, P., Wang, L., Yang, S., & Aroca, R. (2019). Tomato yield and water use efficiency change with various soil moisture and potassium levels during different growth stages. *Plos One*, 14(3), 0213643. DOI: 10.1371/journal.pone.0213643
- Lu, J., Shao, G., Gao, Y., Zhang, K., Wei, Q., & Cheng, J. (2021). Effects of water deficit combined with soil texture, soil bulk density and tomato variety on tomato fruit quality: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 243. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106427

- Lupia, F., & Pulighe, G. (2015). Water use and urban agriculture: Estimation and water saving scenarios for residential kitchen gardens. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 50-58. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.007
- McDougall, R., Kristiansen, P., & Rader, R. (2019). Small-scale urban agriculture results in high yield but requires judicious management of inputs to achieve sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(1), 129-134. DOI: 10.1073/pnas.1809707115
- McEldowney, J. (2017). L'agriculture urbaine en Europe. *Service the Recherche Por Les Députés. EPRS*. Recuperado de [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2017/614641/EPRS_IDA\(2017\)614641_FR.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2017/614641/EPRS_IDA(2017)614641_FR.pdf)
- Michelon, N., Pennisi, G., Myint, N. O., Dall'Olio, G., Batista, L. P., Salviano, A. A. C., Gruda, N. S., Orsini, F., & Gianquinto, G. (2020). Semi-arid climate. *Agronomy*, 10(1379). DOI: 10.3390/agronomy10091379
- Ministry of Agriculture. (2015). Soil water storage capacity and available soil moisture. *Water Conservation. Factsheet 619.000-1*. Ministry of Agriculture British Columbia. Recuperado de https://www.droughtmanagement.info/literature/BC_MA_Soil_Water_Storage_Capacity_2005.pdf

- Mohamed, M., El-Mogy, C. G., & Stevens, R. (2018). Irrigation with salt water affects growth, yield, fruit quality, storability and marker-gene expression in cherry tomato. *Acta Agriculturae, Scandinavica, Section B. Soil & Plant Science*. DOI: 10.1080/09064710.2018.1473482
- Murata, N., Ohta, S., Ishida, A., Kanzaki, M., Wachirinrat, C., Artchawakom, T., & Sase, H. (2012). Soil depth and soil water regime in a catchment where tropical dry evergreen and deciduous forests coexist. *Journal of Forest Research*, 17(1), 37-44. DOI: 10.1007/s10310-010-0248-z
- Nederhoff, E., & Stanghellini, C. (2010). *Practical hydroponics & greenhouses*. Recuperado de <https://www.wur.nl/en/Publication-details.htm?publicationId=publication-way-333937333231>
- Pratt, T., Allen, L. N., Rosenberg, D. E., Keller, A. A., & Kopp, K. (2019). Urban agriculture and small farm water use: Case studies trends from Cache Valley, Utah. *Agricultural Water Management*, 213, 24-35. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.09.034
- Pulighe, G., & Lupia, F. (2019). Multitemporal geospatial evaluation of urban agriculture and (Non)-sustainable food self-provisioning in Milan, Italy. *Sustainability*, 11(7), 1846. DOI: 10.3390/su11071846
- Sadras, V. O., Villalobos, F. J., Orgaz, F., Fereres, E., & Villalobos, F. J. (2016). Principles of agronomy for sustainable agriculture. In: *Effects of water stress on crop production* (pp. 189–204). Berlin, Germany: Springer International Publishing. DOI:10.1007/978-3-319-46116-8_14

- Salazar, M. R., Rojano, A. A., & López, C. I. (2014). La eficiencia en el uso del agua en agricultura controlada. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(2), 177-183. Recuperado de <http://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/472/pdf>
- Sammis, T. W., Kratky, B. A., & Wu, I. P. (1988). Effects of limited irrigation on lettuce and chinese cabbage yield. *Irrigation Science*, (9), 187-198. DOI: 10.1007/BF00275431
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2019). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Recuperado de <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Skara, S. L. G., Pineda, M. R., Timpec, A., Pölling, B., Bohne, K., Külvikf, M., Delgado, C., Pedras, C. M. G., Paço, T. A., Čujić, M., Tzortzakis, N., Chrysargyris, A., Peticila, A., Alencikiene, G., Monsees, H., & Junge, R. (2020). Urban agriculture as a keystone contribution towards securing sustainable and healthy development for cities in the future. *Blue-Green Systems*, 2(1), 1-27. DOI: 10.2166/bgs.2019.931

- Smith, M. (1992). CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. *FAO Irrigation and Drainage* (Paper 46). Rome, Italy: Food and Agriculture Organisation. Recuperado de <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=SO2005100017>
- UNAM & PEMBU, Universidad Nacional Autónoma de México & Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario. (2022). *Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos* (RUOA). Recuperado de <https://www.ruoa.unam.mx/pembu/>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs Population Division. (2019). *World Population Prospects 2019: Ten key findings*. Recuperado de <https://population.un.org/wpp>
- van Veenhuizen, R. (2006). Chapter 11. Urban horticulture. In: *Cities Farming for the Future, Urban Agriculture for Green and Productive Cities*. Recuperado de <https://www.idrc.ca/en/book/cities-farming-future-urban-agriculture-green-and-productive-cities>
- Venkateswarlu, B. (2012). *Crop stress and its management: Perspectives and strategies* (Ser. Life sciences). Recuperado de <https://epdf.pub/crop-stress-and-its-management-perspectives-and-strategies>