

Artículo

Captación de Agua de Lluvia como una opción de agua potable en la Ciudad de México

Mireya Ímaz Gispert ^{1,†}, María Aurora Armienta Hernández ^{2,*}, Enrique Lomnitz Climent ³ and María Fernanda Torregrosa Flores ^{1,†}

¹ Programa Universitario de Estrategias para la Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Mexico; mimaz@unam.mx (M.Í.G.); ftorregrosa@dgaco.unam.mx (M.F.T.F.)

² Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito de la Investigación Científica s/n Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Mexico

³ Enrique Lomnitz Climent, Isla Urbana, Epsilon 130, Col. Romero de Terreros, Coyoacán 04310, México; enrique@islaurbana.org

* Correspondence: victoria@geofisica.unam.mx; Tel.: +52-55-5622-4114

† Current address: Dirección General de Atención a la Comunidad, Oficinas exteriores Zona Cultural Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, Mexico.

Recibido: 22 Agosto 2018; Aceptado: 10 Octubre 2018; Publicado: 26 Octubre 2018

Resumen: La Ciudad de México es una de las ciudades con mayor estrés hídrico en el mundo; existe agua de poca calidad en varias zonas de la misma. El uso de sistemas de captación de agua de lluvia como una fuente de agua potable está ganando aceptación en muchos contextos, pero el agua obtenida no ha sido suficientemente estudiada. Este artículo presenta los resultados de estudios de calidad de agua, de muestras tomadas en cada uno de los componentes del sistema de captación de agua de lluvia, instalado por Isla Urbana en la Universidad Nacional Autónoma de México, al sur de la Ciudad. El sistema de captación de agua de lluvia termina con un dispensador que provee de agua a estudiantes y otros miembros de la comunidad universitaria. Las muestras fueron tomadas de Agosto de 2014 a Noviembre de 2015, aproximadamente una por mes. Los resultados muestran que con la adecuada operación del sistema de captación de agua de lluvia los iones mayores, así como flúor, zinc, arsénico, plomo, hierro, cobre, cromo, aluminio, nitratos y los coliformes totales, cumplen con los estándares nacionales e internacionales para agua potable. Así, la captación de agua de lluvia constituye una opción viable para proveer de agua de buena calidad a una megaciudad, la cual enfrentará cada vez un mayor estrés hídrico debido al cambio climático.

Palabras clave: sistema de captación de agua de lluvia; calidad del agua; sustentabilidad; megaciudad; metales pesados; contaminación

1. Introducción

Como la escasez de agua se ha vuelto un tema de presión en todo el mundo, desarrollar opciones viables y sustentables es ahora de mayor importancia. La captación de agua de lluvia es una potencial fuente sustentable para entornos urbanos. Para hacer un uso más eficiente de la captación de agua de lluvia se deben explorar la viabilidad económica, la cantidad de agua que se puede recolectar en un lugar específico, los métodos potenciales de implementación y la calidad del agua[1]. En este artículo, describimos un proyecto de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México- una ciudad que de acuerdo a la lista de 2015 del Nature Conservancy, se encuentra entre las de mayor estrés hídrico en el mundo[2]. La Ciudad de México con sus aproximadamente 22 millones de habitantes depende para el abasto de agua de dos fuentes principales: Primero, de un acuífero intensamente sobreexplotado y en segundo lugar, de un sistema de alto consumo de energía que bombea agua 1100 m cuesta arriba por 162 Km de distancia. [3]. Agrava el problema, el extremo y desigual hundimiento de la tierra, debido a la intensiva extracción de agua subterránea, los continuos daños en la red, lo que lleva a una pérdida estimada del 25% debido a fugas, y un 14% adicional que queda sin medir y no se contabiliza [4].

Además, décadas de urbanización de áreas de recarga natural han llevado a una situación de rápido deterioro, en la que cada vez, es más problemático proporcionar un acceso continuo a agua de calidad aceptable. Esta situación no tiene en cuenta los efectos del cambio climático, con lo cual se espera que se intensifique el ciclo hidrológico de la Ciudad de México y disminuya la disponibilidad de agua dulce, al tiempo que genera escasez en las zonas que suministran agua a la ciudad [5]. El aumento de la población solo exacerbará estos problemas.

Además, mientras que algunas partes de la ciudad reciben abundante agua de buena calidad, aproximadamente 310,000 hogares no tienen acceso al agua corriente dentro de la casa [6]. La mala calidad del agua es un problema en varias partes de la ciudad, muchas de ellas ubicadas en zonas de bajos ingresos. De acuerdo a la cita de Muller [7], nos corresponde a nosotros tomar medidas para ayudar a las comunidades urbanas de bajos recursos a ser más resilientes a los posibles impactos del cambio climático. Esta acción debe tener en cuenta y basarse en la estrecha relación que hay entre el ciclo hidrológico, los ecosistemas urbanos y la sociedad. La gestión del agua en un área urbana tan extensa, como la Ciudad de México es un tema complejo que implica considerar la existencia de interacciones entre factores sociales, institucionales, biofísicos y urbanos [8]. Dentro de este contexto, la captación de agua de lluvia como fuente de agua doméstica constituye una opción para hacer frente al estrés hídrico. Aunque actualmente se están llevando a cabo múltiples programas piloto en la Ciudad de México, la calidad del agua que puede obtenerse mediante los sistemas de captación de agua de lluvia, no se ha estudiado lo suficiente. La Ciudad de México sufre problemas de contaminación del aire [9], un hecho que lleva a muchas personas a concluir que el agua de lluvia recolectada debe ser de mala calidad. Sin embargo, hasta ahora, los estudios en la Ciudad de México se han centrado en la calidad de la lluvia directa, que puede ser muy diferente de la calidad del agua de lluvia recolectada. Hasta la fecha, y hasta donde sabemos, no se han realizado estudios detallados que analicen específicamente la calidad del agua recolectada y tratado en los sistemas de captación de agua de lluvia.

Este documento presenta los resultados de las pruebas de calidad del agua llevadas a cabo en muestras colectadas aproximadamente cada mes entre agosto de 2014 y noviembre de 2015, en un sistema de captación de agua de lluvia en el campus principal de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en el sur de la Ciudad de México. Las pruebas incluyeron una amplia gama de contaminantes en diferentes puntos a lo largo de un sistema diseñado profesionalmente y bien mantenido.

2. Material y Métodos

2.1 Descripción del Sistema de Captación de Agua de Lluvia

El sistema de captación de agua de lluvia usado en este estudio está localizado en el campus de Ciudad Universitaria de la UNAM al sur de la Ciudad de México. Fue diseñado e instalado por Isla Urbana, un proyecto dedicado a promover la sustentabilidad del agua y la cosecha de agua de lluvia en México. El sistema (Figura 1) está integrado por los siguientes componentes:

- A. Superficie de captación. Es una superficie de vidrio templado que cubre el patio interior del edificio. El techo mide aproximadamente 193.22 m² y el agua es canalizada a través de un sistema de canales de acero galvanizado.
- B. Tubería. El agua es transportada a través de tubos de polipropileno.
- C. Separador de primeras aguas. Se utilizan dos unidades idénticas de primera descarga desarrolladas por Isla Urbana llamadas Tlaloques para desviar los 400 L iniciales de cada aguacero para lavar el techo antes de que se permita el ingreso de agua a la cisterna.
- D. Cisterna. Hecha de geomembrana de polietileno de alta densidad contenida en una malla de acero galvanizado. La cisterna tiene una capacidad de 30,000 L. La entrada de la cisterna tiene instalado un dispositivo reductor de turbulencias que aminora la perturbación de las partículas sedimentadas en el fondo por el agua que entra.

- E. Filtro de malla de acero inoxidable. Las aperturas de la malla tienen un tamaño de 1 x 2 mm para eliminar hojas y partículas grandes.
- F. Manguera con pichancha flotante. Dentro de la cisterna el agua es extraída a través de una manguera conectada a una pichancha flotante, para extraer el agua que está a una profundidad aproximada de 25 cm por debajo de la superficie, evitando el fondo del tanque, donde se depositan sedimentos y otros contaminantes.
- G. Clorador. Dentro de la cisterna, un dispositivo flotante con capacidad para 1 tableta de 200 g, es usado para dispensar el cloro en tabletas que contienen hipoclorito de calcio al 65%, el cual se agrega cada tres meses.
- H. Tren de filtrado. El tubo de salida de la cisterna pasa a través de un tren de filtrado que está formado por los siguientes elementos:
 - (i) Filtro de partículas de 90 µm.
 - (ii) Filtro con cuerpo de fibra de vidrio de 9" × 48" relleno con carbón activado granulado y KDF (Kinetic Degradation Fluxion), una mezcla de cobre y zinc usado en purificadores de agua.
 - (iii) Filtro de cartucho reemplazable de 20 "× 4" con un cartucho de bloque de carbón comprimido de 10 µm.
 - (iv) Generador de ozono.
- I. Tubería al edificio. El agua continúa desde los filtros hasta los bebederos, a lo largo de dos líneas de polipropileno de grado potable con juntas y acoplamientos termofundidos para evitar fugas o la entrada de contaminantes.
- J. Grifo.
- K. Dispensador de agua potable. Como última etapa de tratamiento, el dispensador de agua potable tiene un tren de filtración que consiste en un filtro de sedimentos de 5 micrones y un filtro de carbón activado comprimido de 3 micrones, impregnado con plata coloidal como desinfectante final.

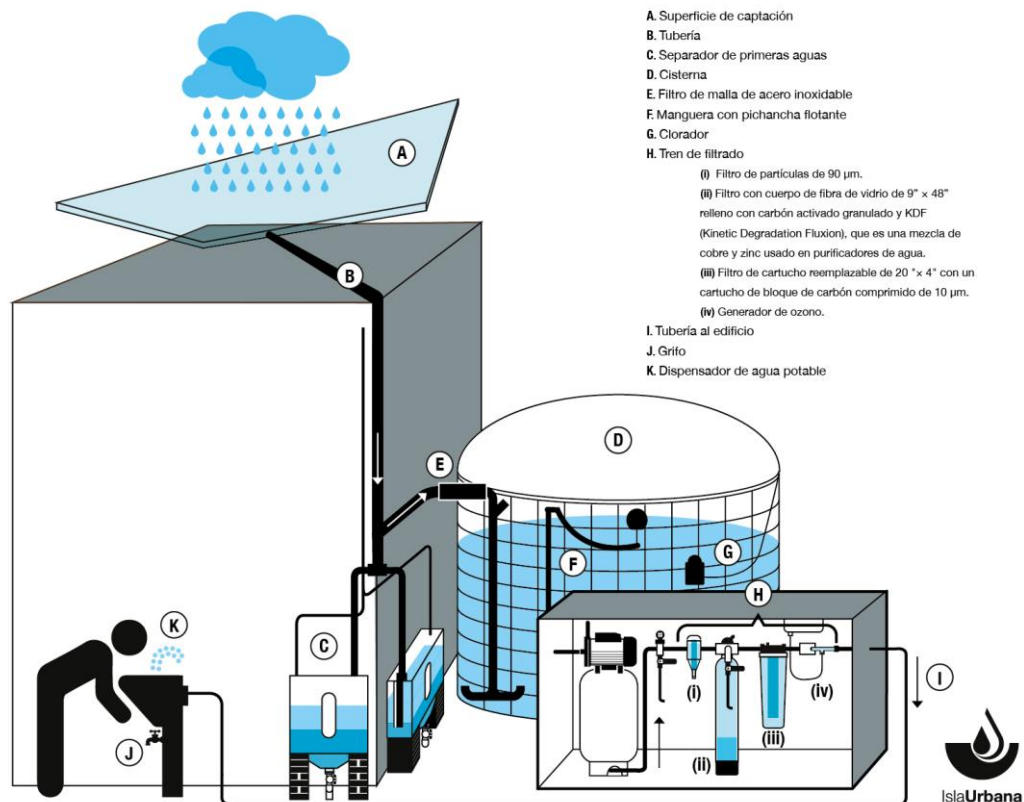


Figura 1. Diagrama del sistema de captación de agua de lluvia.

El sistema fue diseñado con un tratamiento para garantizar agua de calidad potable. Adicionalmente, para permitir una reducción de la contaminación atmosférica y los depósitos en los techos, no se recolectó agua de lluvia durante las dos primeras semanas de la temporada de lluvias (iniciando la captación cuando se produjeron tres o más eventos de lluvia por semana durante dos semanas consecutivas).

1.1. Muestreo y Análisis

Comparamos la calidad antes y después de las diferentes etapas de la filtración (Figura 1). Las muestras de agua se tomaron en la cisterna (punto D), en el flujo de salida del filtro de partículas (punto i dentro del tren de filtro), después del tren de filtrado, en un punto de salida que se encuentra inmediatamente después del generador de ozono (punto iv), en un grifo antes del dispensador de agua potable en el edificio (punto J), y en el dispensador de agua potable en el edificio (punto K).

Las muestras de agua se recolectaron de agosto de 2014 a noviembre de 2015, siguiendo los métodos establecidos por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés) [10]. Se tomaron muestras de la cisterna con vasos de vidrio previamente lavados con ácido y enjuagados con agua desionizada, y en otros puntos usando botellas de polietileno lavadas con el mismo procedimiento de limpieza. Las muestras fueron transportadas al laboratorio, llegando a los 30 minutos de la recolección.

La temperatura, la conductividad y el pH se midieron in situ. Los iones principales se analizaron siguiendo los métodos estándar [10] en el Instituto de Geofísica. Las concentraciones de fluoruro y cloruro se determinaron con electrodos de iones selectivos. Los sólidos disueltos totales se midieron por análisis gravimétrico. SiO₂ y Cr (VI) se analizaron colorimétricamente (Thermo Evolution 300 visible a UV). Cobre, Cr total, Zn y Fe se midieron por espectrofotometría de absorción atómica con flama (Perkin Elmer AAnalyst 200), As por generación de hidruros y Pb por horno de grafito. El nitrato se midió mediante espectrofotometría UV y se verificó con cromatografía iónica (marca Waters). El aluminio se determinó mediante ICP-MS con un Thermo Scientific iCAP. Las curvas de calibración se prepararon con soluciones de estándares de alta pureza. Los límites de detección fueron: As (0.001 mg / L), Pb (0.0005 mg / L), Fe (0.05 mg / L), Zn (0.05 mg / L), Cu (0.05 mg / L), Ni (0.01 mg / L).), Cr (0,05 mg / l), Cr (VI) (0,01 mg / l), SiO₂ (3 mg / l), Al (0.0001 mg / L), Na +

Sustainability **2018**, *10*, 3890; doi:10.3390/su10113890www.mdpi.com/journal/sustainability

(1 mg / L), K⁺ (0.5 mg / L), SO₄²⁻ (4 mg / L), Ca²⁺ (0.8 mg / L), Mg²⁺ (0.8 mg / L), NO₃⁻ (0.9 mg / L), F⁻ (0.01 mg / L), Cl⁻ (0.04 mg / L).

Las pruebas microbiológicas fueron realizadas por la Dirección General de Atención a la Salud de la Universidad siguiendo los métodos oficiales mexicanos aplicando el método de NMP de 10-tubos [10]. El cloro residual libre se estimó con un kit de prueba de cloro (cloroscopio).

2. Resultados y Discusión

Los iones principales mantuvieron las concentraciones por debajo de los límites establecidos por las Normas mexicanas y los estándares internacionales de agua potable [11–13] a lo largo de los puntos muestreados del sistema de captación de agua de lluvia (Tabla 1). El magnesio y el bicarbonato fueron los iones principales, alcanzando valores máximos de 4.90 mg / L y 68.20 mg / L respectivamente. Las concentraciones máximas de iones en las mediciones de la cisterna (Tabla 2) disminuyeron como HCO₃⁻, NO₃⁻, Na⁺, SO₄²⁻, Mg₂⁺, K⁺ y F⁻ (esto no se aplica a Ca²⁺ y Cl⁻, ya que se agregaron en la cisterna para la desinfección). El pH promedio en la captación de agua de lluvia fue de 6.35 (Tabla 1), con un mínimo de 4.11 en septiembre de 2014 en la cisterna y máximo de 8.26 en agosto de 2014 en el grifo. La conductividad también presentó el valor máximo en la misma fecha, probablemente debido al lavado inicial del sistema de captación de agua de lluvia, y mantuvo los valores entre 44 µS / cm y 101 µS / cm durante el resto del período de muestreo.

Las concentraciones de metales pesados y nitratos en cada fecha de muestreo y en cada punto de muestreo se pueden ver en las Figuras 2-5. El cromo total y el hexavalente estuvieron por debajo de los niveles de detección en todas las muestras. El cobre tuvo concentraciones por encima de los niveles de detección en solo siete muestras en dos fechas de muestreo, alcanzando un máximo de 0.16 mg / L en agosto de 2015 en la muestra recolectada en el filtro de partículas.

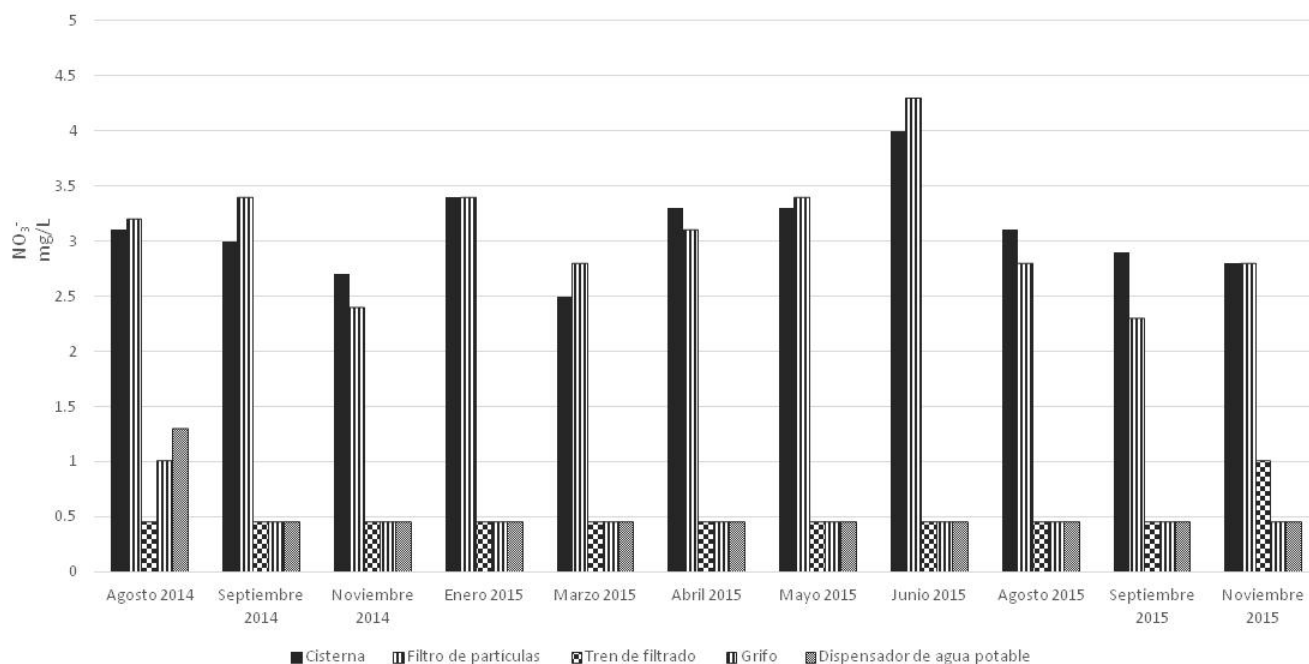


Figura 2. Concentración de nitratos en el sistema de captación de agua de lluvia durante el periodo de muestreo.

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos, concentraciones de especies químicas mayores y menores (promedio, máximos y mínimos) medidas en el sistema de captación de agua de lluvia de agosto del 2014 a noviembre del 2015; los estándares Mexicanos de Agua Potable, de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) [11,12], y de la Organización Mundial de la Salud (WHO, por sus siglas en inglés) [13] están incluidos para comparar con el estudio.

Parámetros	Norma Mexicana de agua potable		USEPA Estándares de Agua Potable de EUA		OMS Estándares para agua potable	
	Promedio	Desviación	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Temperatura °C	16.49	20.20	8.80	2.20		
pH In situ	6.36	8.26	4.11	0.94		
Conductividad en µS/cm	79.14	191.00	44.00	24.59		
Alcalinidad (como CaCO ₃ mg/L)	6.14	55.9	0.0	10.66		
pH Lab	6.22	7.61	4	0.99	6.5–8.5	6.5–8.5 *
HCO ₃ ⁻ mg/L	13.80	68.2	0.0	12.33		
SO ₄ ²⁻ mg/L	16.75	23.90	b.d.l. ð		400	250 *
Cl ⁻ mg/L	11.34	17.10	2.00	3.87	250	250 *

F ⁻ mg/L	0.07	0.21	0.04	0.03	1.5	4	1.5
Na ⁺ mg/L	2.20	6.40	b.d.l.		200		50
K ⁺ mg/L	0.50	0.5	b.d.l.				
Dureza total como CaCO ₃ mg/L (Carbonato de calcio)	28.24	56.4	6.5	7.69	500		
Ca ²⁺ mg/L	8.47	14.5	2.6	2.10			
Mg ²⁺ mg/L	1.82	4.9	b.d.l.				
SiO ₂ mg/L	2.32	8.3	b.d.l.				
NO ₃ ⁻ mg/L	1.90	4.3	b.d.l.				50
Nitratos (como N mg/L)	0.48	1.0	b.d.l.		10	10	
As mg/L	0.003	0.004	b.d.l.		0.025	0.01	0.01
Pb mg/L	0.002	0.010	b.d.l.		0.01	0.015	0.01
Cu mg/L	0.106	0.160	b.d.l.		2	1.3	2
Zn mg/L	0.468	1.16	b.d.l.		5	5 *	
Fe mg/L	0.089	0.20	b.d.l.		0.3	0.3 *	
Al mg/L	0.042	0.207	b.d.l.		0.2	0.05 to 0.2 *	
Cr(VI) mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.		0.05 (cromo total)	0.1 (cromo total)	0.05 (cromo total)
TDS mg/L	52.71	103.00	24.00	16.73	1000	500 *	

Nota: È por debajo de los límites de detección (b.d.l., por sus siglas en inglés); * USEPA Regulaciones Secundarias de Agua potable. USEPA [12] recomienda normas secundarias a los sistemas de agua pero no requiere que los sistemas las cumplan.

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos, concentraciones de especies químicas mayores y menores (promedio, máximos y mínimos) medidas en la cisterna de agosto del 2014 a noviembre del 2015. Determinaciones en agua de lluvia reportadas por García et al. [14] y Báez et al. [15] están incluidas para comparar con el estudio.

Parámetros	Sept 2014	Nov 2014	Ene2015	Mar 2015	Abr 2015	May 2015	Jun 2015	Ago 2015	Sept 2015	Nov 2015	Promedio	Báez et al., 2007 (µeq/L)	García et al., 2009 (mg/L)					
Ago											Máximo							
											Mínimo							
											Estándar							
Temperatura °C		17.7	18.5	16.8	16.2	18.6	20.2	19	15.3	18.7	16.7	18.6	17.85	20.20	15.30	1.44		
pH In situ	4.48	4.11	5.06	5.56	5.78	5.5	5.3	6.99	5.44	5.03	6.12	5.40	6.99	4.11	0.77			
Conductividad en µS/cm	48	54	52	68	63	65	69	74	80	93	68.64	93	48	14.59				
Alcalinidad (como CaCO ₃ mg/L)	0.0	2.0	2.0	4.2	4.0	5.2	3.7	7.4	4.2	4.0	5.0	3.79	7.4	0.0	1.94			
pH Lab	4.28	4	4.5	4.9	5.4	5.4	6.14	7.11	5.44	5.19	6.12	5.32	7.11	4	0.91	5.08	5.75	
HCO ₃ ⁻ mg/L	0	2.4	2.5	5.2	4.9	6.4	4.5	9	5.77	4.86	6.13	4.70	9	0	2.39			
SO ₄ ²⁻ mg/L	b.d.l. Ë	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	61.9	2.37	
Cl ⁻ mg/L	5.3	5.7	7.4	8.4	10.4	11.4	11.7	16.2	13	13.2	13.7	10.58	16.2	5.3	3.50	9.6	0.38	
F ⁻ mg/L	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0.07	0.07	0.04	0.07	0.05	0.06	0.06	0.08	0.04	0.011			
Na ⁺ mg/L	b.d.l.	b.d.l.	1.2	1.8	1.9	1.8	1.8	2.9	2	2.3	3		3	b.d.l.		7.0	0.31	
K ⁺ mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	2.2	0.09	
Dureza total como CaCO ₃ mg/L	6.5	14.8	20	25	27.8	25.1	25.8	32.7	24.4	23.4	29.8	23.21	32.7	6.5	7.28			
Ca ²⁺ mg/L	2.6	5.9	6.4	7	8	8.4	7.7	10.6	8.1	7.7	9.8	7.47	10.6	2.6	2.11	26.4	0.2	
Mg ²⁺ mg/L	b.d.l.	b.d.l.	1.0	1.8	1.9	1.0	1.6	1.5	1.0	1.0	1.3		1.9	b.d.l.		2.5	0.04	
SiO ₂ mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.			
NO ₃ ⁻ mg/L	3.1	3	2.7	3.4	2.5	3.3	3.3	4	3.1	2.9	2.8	3.10	4	2.5	0.405	42.6	2.064	
Nitratos (como N mg/L)	0.70	0.67	0.60	0.80	0.60	0.80	0.74	0.90	0.60	0.60	0.60	0.70	0.9	0.60	0.107			
As mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.0013		0.0013	b.d.l.				
Pb mg/L	0.003	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.002	b.d.l.	0.000	b.d.l.	0.002	0.001		0.003	b.d.l.			0.00541	
Cu mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.13	b.d.l.	b.d.l.		0.13	b.d.l.				
Zn mg/L	0.26	0.27	0.24	0.25	0.24	0.26	0.28	0.27	0.32	0.34	0.3	0.28	0.34	0.24	0.032			
Fe mg/L	0.06	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.11	0.11	0.11	0.15	b.d.l.	0.14		0.15	b.d.l.			0.07734	
Al mg/L	0.050	0.044	0.037	0.022	0.041	0.027	0.029	0.001	0.026	0.065	0.018	0.033	0.065	0.001	0.017		0.08394	
Cr(VI) mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.			0.00124	
SDT mg/L	24	45	28	46	32	45	66	86	40	40	57	46.27	86	24	17.883			

Notes: Ë por debajo de los límites de detección (b.d.l., por sus siglas en inglés)

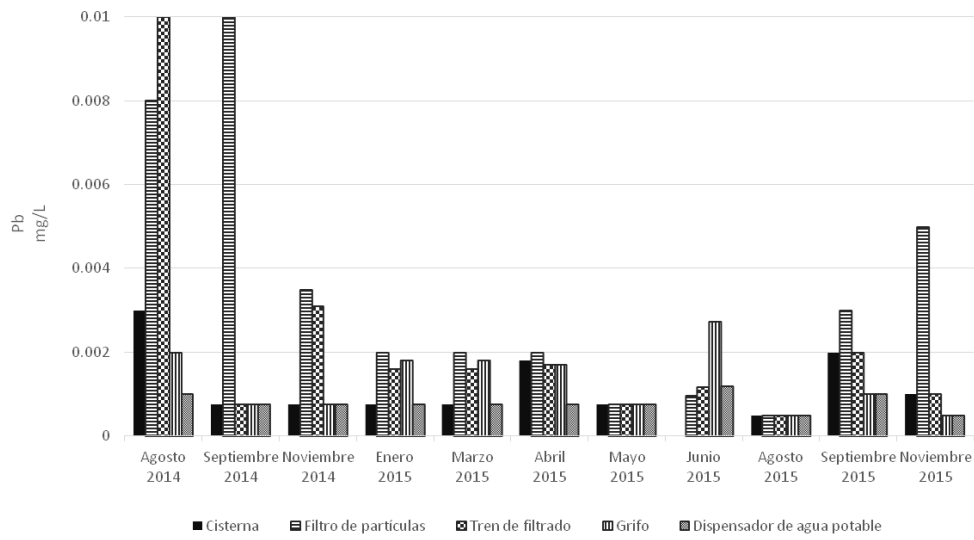


Figura 3. Concentración de plomo (mg/L) en el sistema de captación de agua de lluvia durante el periodo de muestreo.

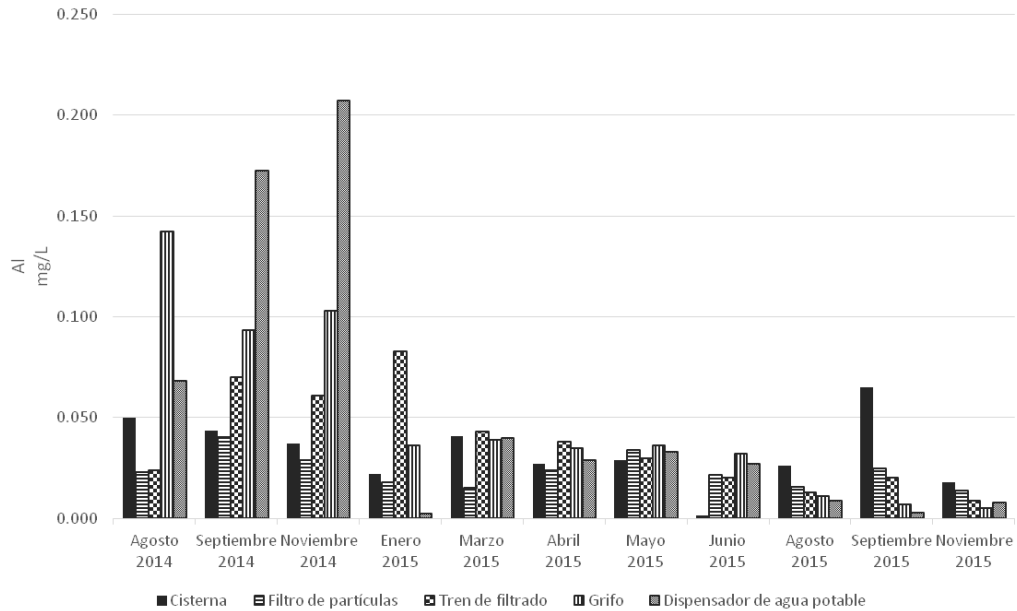


Figura 4. Concentración de aluminio (mg/L) en el sistema de captación de agua de lluvia durante el periodo de muestreo.

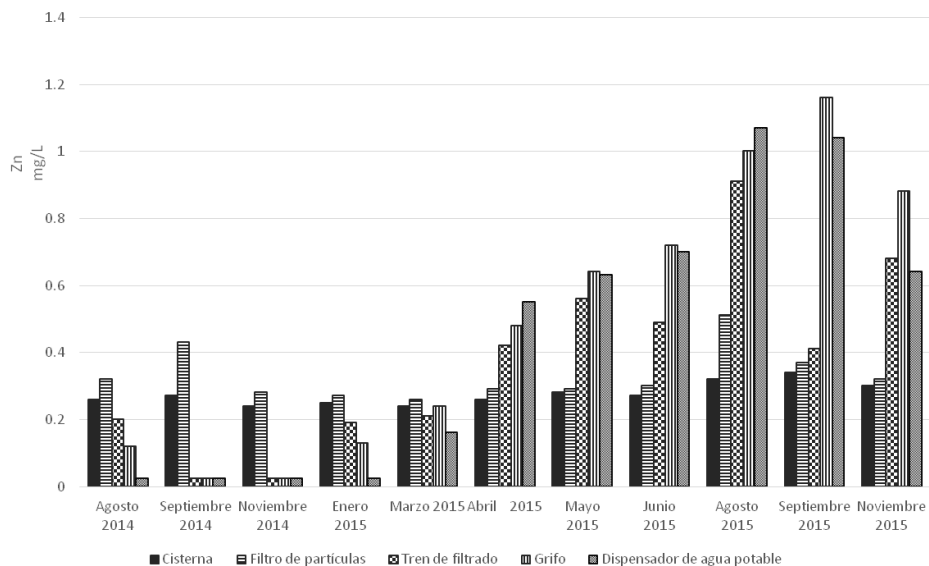


Figura 5. Concentración de zinc (mg/L) en el sistema de captación de agua de lluvia

durante
el periodo de muestreo.

El fluoruro fue una de las especies químicas analizadas, ya que está presente en concentraciones por encima de los Estándares de Agua Potable de México (NOM 127) [11] y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [13] en aguas subterráneas en muchas áreas del país. Se estima que alrededor de 4 millones de personas viven en áreas naturalmente enriquecidas en fluoruro [16,17]. Se han notificado efectos en la salud en diversos estados, incluidos fluorosis dental y esquelética, y efectos cognitivos [18-20]. En contraste, en el sistema de captación de agua de lluvia, el fluoruro mantuvo concentraciones por debajo de los límites del agua potable de 1.5 mg/L [11] durante todo el período de muestreo (Tabla 1). El agua de lluvia recolectada en la cisterna contenía niveles bajos de fluoruro (por debajo de 0.1 mg / L) durante todas las fechas de muestreo (Tabla 2), que se mantuvieron con ligeros cambios a lo largo del sistema de captación de agua de lluvia, excepto en agosto de 2014, cuando se midieron 0.21 mg / L en la fuente de agua potable (Tabla 3), probablemente debido a un lavado inicial de los materiales de la captación de agua de lluvia, ya que el sistema se puso en funcionamiento a fines de julio y la primera recolección de agua se hizo en agosto.

El arsénico es también uno de los elementos tóxicos ampliamente distribuidos en los acuíferos mexicanos, principalmente debido a los procesos de interacción agua-roca [17,21]. Se ha detectado arsenicosis relacionada con el consumo de agua contaminada en varias áreas [22-25]. En contraste, el arsénico mantuvo niveles muy bajos en el sistema de captación de agua de lluvia durante el período estudiado (Tabla 1) con una concentración máxima de 0.004 mg / L, muy por debajo de los límites de la NOM 127 [11] (0.025 mg / L) y los estándares de la OMS [13] (0.010 mg / l).

Las concentraciones de nitrato (Figura 2) variaron de menos de 0.9 mg / L a 4.3 mg / L (correspondiente a 0.2 a 0.97 mg / L N-NO₃⁻), manteniendo los valores por debajo de los límites de la NOM 127 [11] y los estándares de la USEPA [12] de 10 mg / L N-NO₃⁻. Las concentraciones fueron similares a las reportadas por García et al. [14] en el agua de lluvia de la Ciudad de México (de 0.47 mg / L a 5.58 mg / L de nitrato). El flujo de salida de la cisterna y el filtro de partículas presentaron las concentraciones más altas en todas las fechas de muestreo; en el tren de filtrado disminuyeron los nitratos hasta el nivel de detección de septiembre a noviembre. El ligero aumento en la concentración de nitrato en el grifo y en el dispensador de agua potable en agosto de 2014 pudo deberse también al lavado del sistema. Se han reportado niveles de nitrato por encima del estándar de agua potable en fuentes superficiales y subterráneas de agua en México. Se identificaron varios orígenes, como fertilizantes, aguas residuales y estiércol [26-28]. El nitrato también está presente en las aguas subterráneas de la Ciudad de México [29,30]. La falta de sistemas de alcantarillado en las áreas de recarga y las fugas en las tuberías de drenaje son posibles causas de contaminación de nitratos al sur de la ciudad [31]. Se informaron concentraciones de hasta 2.8 µg / m³ y 3.6 µg / m³ de material particulado (PM, por sus siglas en inglés) 10 y PM 2.5 (fracción soluble en agua) recolectadas en la Ciudad de México relacionadas con las emisiones del tráfico [32]. Los cambios diarios en el comportamiento del nitrato en la atmósfera relacionados con su presencia como NH₄NO₃, evaporación y reacción de HNO₃ con el polvo fueron explicados por Molina et al. [33] y sus referencias. También indican que los nitratos constituyen una gran parte de los NO_x en la atmósfera de la Ciudad de México. Las concentraciones más altas de nitrato en el sistema de captación de agua de lluvia se alcanzaron en junio de 2015 en la cisterna y la salida del filtro de partículas. Concentraciones similares medidas en la cisterna y en el filtro de partículas muestran que no elimina los nitratos. Sin embargo, las concentraciones por debajo del nivel de detección medido en la mayoría de las fechas en las muestras obtenidas después del tren de filtrado completo, en el grifo y en el bebedero, mostraron la eficiencia general del sistema para su eliminación.

Se han encontrado polvo y metales en muestras de PM recolectadas en la Ciudad de México, principalmente asociadas con la industria y fuentes móviles [33]. Los metales pesados (Fe, Zn, Mn, Pb, Hg, Sn, Cr, Ni, Ti, V y Ag) están unidos principalmente a partículas nanométricas [32] que pueden ser transportadas por la lluvia, lo que contribuye a su presencia en el agua de lluvia captada. Sin embargo, las concentraciones de Cr, Cr (VI) y Fe totales estuvieron por debajo de los niveles de detección en todo el período de muestreo en todos los puntos muestreados del sistema de captación de agua de lluvia.

Si bien las concentraciones de Pb cumplieron con el límite de la norma mexicana para agua potable [11], en agosto y septiembre de 2014 alcanzaron una concentración de 0.01 mg / L en el filtro de partículas y el tren de filtrado (Figura 3). Estos máximos, como se mencionó anteriormente, pueden haberse debido al lavado del sistema. No obstante, todas las concentraciones medidas en la cisterna fueron inferiores a la media de 0.00541 mg / L informada por García et al. [14] (Tabla 2).

Las concentraciones más altas de aluminio se midieron en el bebedero en septiembre y noviembre de 2014 (Figura 4), alcanzando el límite permitido establecido en la NOM 127 (0.2 mg / L). Este pico se debió a una boquilla Vénturi de aluminio en el inyector de ozono, que fue rápidamente reemplazada por un equivalente plástico. Desde entonces, mantuvo valores bajos que van desde concentraciones por debajo del nivel de detección hasta 0.065 mg / L en la cisterna en septiembre de 2015 (Figura 4). La presencia de aluminio en la cisterna puede deberse a la entrada de polvo atmosférico. El aluminio en el agua de lluvia se relacionó principalmente con fuentes naturales (geológicas) por García et al. [14]. Además, los materiales del techo y las características fisicoquímicas de la lluvia pueden agregar contaminantes metálicos al agua de lluvia recolectada [34].

Aunque el zinc mantuvo concentraciones por debajo de los límites establecidos por la NOM 127, se observó un aumento, principalmente desde el flujo de salida del filtro de partículas y los siguientes puntos de muestreo, de abril a septiembre de 2015 (Figura 5). Este aumento pudo deberse a la disolución del material del filtro de KDF, las canaletas galvanizadas y las tuberías que aumentan a valores de pH más ácidos (se determinó una correlación inversa $R^2 = 0.692$ entre el Zn y el pH del agua del bebedero). Las tuberías son reportadas como una fuente de zinc en el agua potable por la OMS [13]. La presencia de zinc en la cisterna se puede producir a partir de la interacción del agua de lluvia con la atmósfera, ya que este metal presentó las concentraciones más altas de los metales pesados medidos en la Ciudad de México (482 ng / m³) en la campaña MILAGRO [33]. Sin embargo, la OMS [13] no ha establecido una guía para este elemento en el agua potable, afirmando que por encima de 4 mg / L produce un sabor astringente al agua.

Aunque el sulfato no es tan tóxico como el As ó los metales pesados, su concentración máxima también se establece en las normas para agua potable en 400 mg / l. La OMS [35] recomienda informar a las autoridades sanitarias si el agua potable contiene más de 500 mg / L debido a los efectos gastrointestinales a niveles altos de sulfato (efectos laxantes a 1000 mg / L). El sulfato en la atmósfera de la Ciudad de México puede estar relacionado con el SO₂ de emisiones industriales, aunque esta fuente disminuyó con el reemplazo del combustóleo por gas natural en las centrales termoeléctricas [36]. Además, las emisiones del volcán Popocatepetl también se han identificado como una fuente de SO₂ en la atmósfera de la Ciudad de México [33] y también pueden contribuir a la presencia de sulfato en el agua de lluvia en algunas fechas.

El análisis microbiológico de la calidad del agua potable mostró que en todos los casos, excepto en dos, no había presencia de coliformes totales en el bebedero. En noviembre de 2014, los resultados fueron de 0,51 / 100 ml, y en enero de 2015, el resultado fue de 0,051 / 100 ml. Esto se debió a que el personal de limpieza del edificio usaba una toalla no desechable para limpiar la fuente de agua potable. Posteriormente se les indicó que usaran toallitas desechables de cloro, después de lo cual los resultados volvieron a niveles no detectables. El cloro libre mantuvo valores entre 0.3 y 1.5 mg / l.

Las concentraciones de iones medidas por García et al. [14] en el agua de lluvia recolectada en un sitio cercano al sistema de captación de agua de lluvia en la Ciudad de México de 2003 a 2004 son similares a las medidas en la cisterna (Tabla 2). Las concentraciones más altas de calcio y cloruro resultan de la disolución de tabletas de hipoclorito de calcio agregadas en la cisterna para la desinfección. El sulfato fue el ión más abundante, seguido de Ca²⁺, NH₄⁺, H⁺, NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, K⁺ y F⁻ en el agua de lluvia recolectada en la megaciudad de Shenzhen en China [15].

Aunque el sulfato también fue el ión más abundante en el agua de lluvia de la Ciudad de México, otros iones reportados por García et al. [14] siguieron una tendencia diferente.

Tabla 3. Parámetros fisicoquímicos, concentraciones de especies químicas mayores y menores medidas en el dispensador de agua potable de agosto 2014 a noviembre de 2015.

	Sept 2014	Nov 2014	Enc2015	Mar 2015	Abr 2015	May 2015	Jun 2015	Ago 2015	Sept 2015	Nov 2015	Promedio	Desviac					
											Maximo	Mínimo					
Temperatura -C			8.8	15	13.3	14.7	9.4	18.2	14.6	14.8	16.7	14.2	15.5	14.11	18.2	8.8	2.80
pH In situ	8.02	7.45	7.66	7.05	7.36	6.92	7	6.76	6.69	6.71	6.87	7.14	8.02	6.69	0.43		
Conductividad en µS/cm	191	77	69	77	78	75	72	101	89	82	98	91.73	191	69	34.48		
Alcalinidad (como CaCO ₃ mg/L)	55.9	16.8	15.5	14.6	13	14.6	11.6	14.8	12.6	12	13.1	17.68	55.9	11.6	12.77		
pH Lab	6.71	6.93	6.8	6.7	6.2	6.7	7.14	7.25	6.98	6.98	7.31	6.88	7.31	6.2	0.31		
HCO ₃ - mg/L	68.2	20.5	19.0	17.8	15.9	17.8	13.6	18.0	15.3	14.6	15.9	21.50	68.2	13.6	15.62		
SO ₄₂₋ mg/L	23.9	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	23.9	b.d.l.			
Cl- mg/L	3.5	8.9	8.9	12.4	12	12.6	12.5	16.9	14.5	15	16.8	12.18	16.9	3.5	3.93		
F- mg/L	0.21	0.08	0.08	0.06	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.04	0.072	0.21	0.04	0.05		
Na+ mg/L	6.4	1	1.2	2	1.8	1.8	1.8	2.9	2.1	2.2	2.9	2.37	6.4	1	1.46		
K+ mg/L	0.5	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.5	b.d.l.			
Dureza Total como CaCO ₃ mg/L (Carbonato de calcio)	56.4	33.2	31.9	30.2	27.8	33.9	31.6	35.1	29.1	26.6	33.9	33.61	56.4	26.6	8.02		
Ca ₂₊ mg/L	14.5	7.7	8	7.6	8	9.3	9.2	11.4	10	9	11.6	9.66	14.5	7.6	2.11		
Mg ₂₊ mg/L	4.9	3.4	2.9	2.8	1.9	2.6	2.1	1.6	1	1	1.2	2.31	4.9	1	1.18		
SiO ₂ mg/L	6.6	1.7	b.d.l.	1.2	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.8	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	6.6	b.d.l.			
NO ₃ - mg/L	1.3	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	1.3	b.d.l.			
Nitratos (como N mg/L)	0.3	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.3	b.d.l.			
As mg/L	0.004	0.0025	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.004	b.d.l.			
Pb mg/L	0.001	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.001	b.d.l.	0.001	b.d.l.	b.d.l.	0.001	b.d.l.			
Cu mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.1	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.1	b.d.l.			
Zn mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	0.16	0.55	0.63	0.7	1.07	1.04	0.64		1.07	b.d.l.			
Fe mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.			
Al mg/L	0.068	0.1724	0.207	b.d.l.	0.04	0.029	0.033	0.0273	0.009	b.d.l.	0.008		0.207	b.d.l.			
Cr(VI) mg/L	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.	b.d.l.			
TDS mg/L	103	50	51	47	28	40	54	68	79	79	61	60	103	28	21.09		

Notas: Ë por debajo de los límites de detección (b.d.l., por sus siglas en inglés)

3. Conclusiones

Este estudio determinó la viabilidad de utilizar el agua de lluvia como fuente de agua de calidad potable en la Ciudad de México, utilizando un sistema con varias etapas para capturar, almacenar y tratar el agua de lluvia.

A pesar de la presencia de contaminación del aire en la Ciudad de México y el escepticismo que esto causa naturalmente sobre la conveniencia del agua de lluvia para el uso humano directo, este estudio demuestra que un sistema de recolección de agua de lluvia adecuadamente diseñado puede proporcionar agua de muy alta calidad, que cumple con las normas mexicanas y los estándares internacionales de calidad de agua. Curiosamente, el agua en el tanque que aún no había pasado por el tren de filtrado, y que solo había pasado por un tamiz de hojas, el separador de primeras aguas y la cloración, también cumplía con los estándares de agua potable para todos los parámetros probados. Los bajos niveles medidos de fluoruro y arsénico son particularmente relevantes, demostrando que la captación de agua de lluvia puede ser una opción para evitar la exposición de la población a estos contaminantes dañinos, que están presentes en varios acuíferos que son utilizados para el suministro de agua potable en México.

Es necesario realizar investigaciones adicionales para comprender hasta qué punto estos resultados, obtenidos de un sistema único, cuidadosamente monitoreado y mantenido, se aplican en entornos menos controlados, como los hogares individuales.

Las variaciones en el tipo de techo, diseño del sistema y área geográfica podrían resultar en diferentes calidades de agua. Recomendamos efectuar investigaciones sobre la calidad del agua en sistemas de captación de agua de lluvia ubicados en distintas áreas geográficas con contrastes de calidad del aire, patrones de lluvia, clima e incluir otros parámetros y contaminantes como turbidez, Hg, Cd y COV, y pruebas microbiológicas más exhaustivas. Los resultados sugieren claramente que, si se hace correctamente, el agua de lluvia es una fuente viable de agua potable de alta calidad en el contexto de una megaciudad como la Ciudad de México.

Los sistemas de captación también contribuyen a aumentar la resiliencia urbana al cambio climático en la Ciudad de México.

Contribución de los autores: Conceptualización, M.Í.G., M.A.A.H., M.F.T.F. y E.L.C.; Adquisición de fondos, M.Í.G.; Investigación, M.Í.G., M.A.A.H. y M.F.T.F.; Metodología, M.Í.G., M.A.A.H. y E.L.C.; Administración del proyecto, M.Í.G. y M.F.T.F.; Supervisión, M.Í.G. y M.F.T.F.; Imagen, E.L.C.; Escritura del borrador original, M.A.A.H., M.F.T.F. y E.L.C.; Escritura—revisión y edición, M.Í.G., M.A.A.H., M.F.T.F. y E.L.C.

Fondos: Esta investigación no recibió financiamiento externo

Agradecimientos: Agradecemos la participación de Olivia Cruz, Alejandra Aguayo, y Nora Cenicerros en las determinaciones analíticas. A la Dirección General de Atención a la Salud de la UNAM nuestro reconocimiento por las pruebas microbiológicas y las determinaciones de cloro libre. Agradecemos a Renata Fenton por el soporte gráfico, y a Monserrat Martínez por la revisión.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

1. Rahman, A. Recent Advances in Modelling and Implementation of Rainwater Harvesting Systems towards Sustainable Development. *Water* **2017**, *9*, 595. [CrossRef]
2. McDonald, R.I.; Weber, K.; Padowski, J.; Flörke, M.; Schneider, C.; Green, P.A.; Gleeson, T.; Eckman, S.; Lehner, B.; Balk, D.; et al. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Glob. Environ. Chang.* **2014**, *27*, 96–105. [CrossRef]
3. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). *Estadísticas del Agua en México, Edición 2016*, 1st ed.; Secretariade Medio Ambiente y Recursos Naturales: Ciudad de México, Mexico, 2016; pp. 118–121.
4. Banco Mundial. *Agua urbana en el Valle de México: ¿Un Camino verde para Mañana?* 1st ed.; Banco Mundial: Washington, DC, USA, 2013; p. 92.
5. Romero Lankao, P. Water in Mexico City: What will climate change bring to its history of water-related hazards and vulnerabilities? *Environ. Urban.* **2010**, *22*, 157–178. [CrossRef]
6. INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Available online: <http://www3.inegi.org.mx/Sustainability> **2018**, *10*, 3890; doi:10.3390/su10113890www.mdpi.com/journal/sustainability

- sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385 (accessed on 6 June 2018).
7. Muller, M. Adapting to climate change: Water management for urban resilience. *Environ. Urban.* **2007**, *19*, 99–113. [CrossRef]
 8. Moreno-Mata, A.; Villasis-Keever, R.; Morat ó, J. Climatic change, management of water rain and flood risk in the metropolitan area of San Luis Potosí, México. In *Urban Resilience for Risk and Adaptation Governance*; Brunetta, G., Caldarice, O., Tollin, N., Rosas-Casals, M., Morato, J., Eds.; Springer: New York, NY, USA, 2018.
 9. Molina, L.T.; Molina, M.J. *Air Quality in the Mexico Megacity: An Integrated Assessment*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, 2002.
 10. APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation); Eaton, A.D. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*; de Edición, N., Ed.; APHA/WWA/WEF: Washington, DC, USA, 2005; ISBN 0-87553-047-8.
 11. Secretaría de Salud Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (2000). Salud Ambiental. Agua Para uso y Consumo Humano. Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos a que se Debe Someter el Agua Para su Potabilización. Available online: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html> (accessed on 7 June 2018).
 12. United States Environmental Protection Agency National Primary Drinking Water Regulations. Available online: https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf (accessed on 7 June 2018).
 13. WHO (World Health Organization). Guidelines for Drinking-Water Quality. Available online: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf (accessed on 8 June 2018).
 14. García, R.; Belmont, R.; Padilla, H.; Torres, M.C.; Báez, A. Trace metals and inorganic ion measurements in rain from Mexico City and a nearby rural area. *Chem. Ecol.* **2009**, *25*, 71–86. [CrossRef]
 15. Báez, A.; Belmont, R.; García, R.; Padilla, H.; Torres, M.C. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico. *Atmos. Res.* **2007**, *86*, 61–75. [CrossRef]
 16. Estupiñán-Day, S.V.; Heriberto; Duchon, K.; Soto Navarro, P.R.; Vega Gleason, S. Final report Task force meeting: Defluoridation systems for Latin America and the Caribbean. In *Task Force Meeting Defluoridation Systems for Latin America and the Caribbean*; Pan American Health Organization, Ed.; Pan American Health Organization: Washington, DC, USA, 2005; p. 81.
 17. Armienta, M.A.; Segovia, N. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environ. Geochem. Health* **2008**, *30*, 345–353. [CrossRef] [PubMed]
 18. Grimaldo, M.; Borja-Aburto, V.H.; Ramírez, A.L.; Ponce, M.; Rosas, M.; Díaz-Barriga, F. Endemic fluorosis in San Luis Potosi, Mexico. I. Identification of risk factors associated with human exposure to fluoride. *Environ. Res.* **1995**, *68*, 25–30. [CrossRef] [PubMed]
 19. Alarcón-Herrera, M.; Martín-Dominguez, I.; Trejo-Vazquez, R.; Dozal, S. Well water fluoride, dental fluorosis, and bone fractures in the Guadiana Valley of Mexico. *Fluoride* **2001**, *34*, 139–149.
 20. Valdez Jimenez, L.; Lopez Guzman, O.D.; Cervantes Flores, M.; Costilla-Salazar, R.; Calderon Hernandez, J.; Alcaraz Contreras, Y.; Rocha-Amador, D.O. In utero exposure to fluoride and cognitive development delay in infants. *Neurotoxicology* **2017**, *59*, 65–70. [CrossRef] [PubMed]
 21. Morales-Arredondo, I.; Rodríguez, R.; Armienta, M.A.; Villanueva-Estrada, R.E. The origin of groundwater arsenic and fluorine in a volcanic sedimentary basin in central Mexico: A hydrochemistry hypothesis. *Hydrogeology* **2016**, *24*, 1029–1044. [CrossRef]
 22. Sampayo-Reyes, A.; Hernández, A.; El-Yamani, N.; López-Campos, C.; Mayet-Machado, E.; Rincón-Castañeda, C.B.; Limones-Aguilar, M.L.; López-Campos, J.E.; de León, M.B.; González-Hernández, S.; et al. Arsenic induces DNA damage in environmentally exposed Mexican children and adults. Influence of GSTO1 and AS3MT polymorphisms. *Toxicol. Sci.* **2010**, *117*, 63–71. [CrossRef] [PubMed]
 23. Camacho, L.M.; Gutiérrez, M.; Alarcón-Herrera, M.T.; Villalba, M.D.L.; Deng, S. Occurrence and treatment of arsenic in groundwater and soil in northern Mexico and southwestern USA. *Chemosphere* **2011**, *83*, 211–225. [CrossRef] [PubMed]
 24. Del Razo, L.M.; García-Vargas, G.G.; Valenzuela, O.L.; Castellanos, E.H.; Sánchez-Peña, L.C.; Currier, J.M.; Drobná, Z.; Loomis, D.; Stýblo, M. Exposure to arsenic in drinking water is associated with increased prevalence of diabetes: A cross-sectional study in the Zimapán and Lagunera regions in Mexico. *Environ. Health* **2011**, *10*, 73. [CrossRef] [PubMed]

25. Currier, J.M.; Ishida, M.C.; González-Horta, C.; Sánchez-Ramírez, B.; Ballinas-Casarrubias, L.; Gutiérrez-Torres, D.S.; Cerón, R.H.; Morales, D.V.; Terrazas, F.A.B.; Del Razo, L.M.; et al. Associations between Arsenic Species in Exfoliated Urothelial Cells and Prevalence of Diabetes among Residents of Chihuahua, Mexico. *Environ. Health Perspect.* **2014**, *122*, 1088–1094. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Canter, L.W. *Nitrate in Groundwater*; Lewis Publishers: Boca Raton, FL, USA, 1997.
27. Muñoz, H.; Armienta, M.A.; Vera, A.; Cenicerros, N. Nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla, Tlaxcala, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **2004**, *20*, 91–97.
28. Almasri, M.N. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2007**, *27*, 220–242. [[CrossRef](#)]
29. Ryan, M.C. An investigation of inorganic nitrogen compounds in the groundwater in the Valley of Mexico. *Geofis. Int.* **1989**, *28*, 417–433.
30. Edmunds, W.; Carrillo-Rivera, J.; Cardona, A. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *J. Hydrol.* **2002**, *258*, 1–24. [[CrossRef](#)]
31. Montiel-Palma, S.; Armienta Hernández, M.A.; Rodríguez Castillo, R.; Domínguez Mariani, E. Identificación de zonas de contaminación por nitratos en el agua subterránea de la zona sur de la Cuenca de México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* **2014**, *30*, 149–165.
32. Querol, X.P.; Pey, J.; Minguillón, M.C.; Pérez, N.; Alastuey, A.; Viana, M.; Moreno, T. PM Speciation and sources in Mexico during the MILAGRO-2006 Campaign. *Atmos. Chem. Phys.* **2008**, *8*, 111–128. [[CrossRef](#)]
33. Molina, L.T.M.; Madronich, S.; Gaffney, J.S.; Apel, E.; de Foy, B.; Fast, J.; Ferrare, R.; Herndon, S.; Jimenez, J.L.; Lamb, B.; et al. An overview of the MILAGRO 2006 Campaign: Mexico City emissions and their transport and transformation. *Atmos. Chem. Phys.* **2010**, *10*, 8697–8760. [[CrossRef](#)]
34. Abbasi, T.; Abbasi, S.A. Sources of Pollution in Rooftop Rainwater Harvesting Systems and Their Control. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* **2011**, *41*, 2097–2167. [[CrossRef](#)]
35. WHO (World Health Organization). Sulfate in Drinking-Water: Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Available online: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/sulfate.pdf (accessed on 20 June 2018).
36. Báez, A.P.; Belmont, R.D.; García, R.M.; Torres, M.C.B.; Padilla, H.G. Rainwater chemical composition at two sites in Central Mexico. *Atmos. Res.* **2006**, *80*, 67–85. [[CrossRef](#)]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).