

CONCENTRACIÓN DE METALES TRAZA EN EL AGUA CONDENSADA DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA EN EL VALLE DE MÉXICO

Ana Laura Bautista-Olivas, Jorge Leonardo Tovar-Salinas, Oscar Raúl Mancilla-Villa, Héctor Flores-Magdaleno, Carlos Ramírez-Ayala, Ramón Arteaga-Ramírez y Mario Vázquez-Peña

RESUMEN

La escasez de agua potable es un grave problema que hace necesario buscar nuevas opciones para mitigarla, siendo una opción el aprovechamiento del agua atmosférica. Sin embargo, es necesario garantizar la calidad del agua obtenida, sobre todo en zonas con altos niveles de contaminación atmosférica, como es el Valle de México. Este estudio consistió en evaluar en el agua obtenida por condensación en el Valle de México las siguientes variables: conductividad eléctrica (CE) y pH, medidos con un conductímetro/potenciómetro; y concentraciones de Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn, determinados mediante un espectrofotómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP), empleando métodos recomendados por EPA y APHA. El estudio se realizó en tres zonas:

una en Texcoco, estado de México, y dos en la Ciudad de México (zonas centro y norte). En cada sitio se tomaron 25 muestras entre mayo y agosto 2010. El agua se captó con el prototipo de un aparato denominado 'Higroimán', el cual disminuye la temperatura de la superficie de contacto con el ambiente, para inducir el punto de rocío y condensar la humedad atmosférica. Se aplicó una prueba de medias (Tukey, $P \leq 0,05$) a los resultados obtenidos y éstos se compararon con los límites permisibles de agua potable establecidos por la OMS. La CE del agua atmosférica se encuentra entre 56,4 y 87,05 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, mientras que los valores de pH están entre 6,58 y 6,63. En algunas muestras, el Al, Fe y Pb rebasan los límites permisibles.

Introducción

La demanda de agua para consumo humano es un pro-

blema político, social y económico en el mundo. Las predicciones indican que los problemas seguirán aumentando,

debido a que la población humana se incrementa de manera exponencial y el suministro de agua no aumenta de

igual manera y, en algunos casos, se está agotando o se encuentra contaminada. Por lo anterior, es necesario explorar

PALABRAS CLAVE / Condensación de Agua Atmosférica / Ciudad de México / Metales Trazas / Recursos Hídricos /

Recibido: 26/08/2013. Modificado: 11/03/2014. Aceptado: 13/03/2014.

Ana Laura Bautista Olivas. Ingeniera en Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. M.C. y Doctora en Ciencias en Hidrociencias, Colegio de Postgraduados (COLPOS), México. Profesora-Investigadora, Universidad de Sonora, México. e-mail: analaura@colpos.mx

Jorge Leonardo Tovar Salinas. Ingeniero Agrónomo Especialista en Suelos, UACH, México. M.C. en Edafología y Ph.D. en Suelos, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS,

México. e-mail: jtovar@colpos.mx

Oscar Raúl Mancilla Villa. Ingeniero en Recursos Naturales y Agropecuarios, Universidad de Guadalajara (UdeG), México. M.C. y Doctor en Ciencias en Hidrociencias, COLPOS, México. Profesor Investigador, UdeG, México. Dirección: Departamento de Producción Agrícola del Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara; Av. Independencia Nacional, # 151 C.P. 48.900, Autlán de Navarro,

Jalisco, México. oscar.mancilla@cucsur.udg.mx,

Héctor Flores Magdaleno. Ingeniero en Irrigación, UACH, México. M.C. en Agrometeorología, COLPOS, México. Ph.D. en Meteorología Agrícola, University of Nebraska, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, México. e-mail: mhector@colpos.mx

Carlos Ramírez Ayala. Ingeniero Agrónomo, UdeG, México; M.C. y Doctor en Hidrociencias, COLPOS, México. Profesor Investigador, COLPOS, México. e-mail: cara@colpos.mx

Ramón Arteaga Ramírez. Ingeniero en Irrigación, UACH, México. M.C. en Hidrociencias en Colegio de Postgraduados México y Ph. D. en Hidrociencias en la misma institución. Profesor Investigador, UACH, México. e-mail: arteagar@correo.chapingo.mx

Mario Alberto Vázquez Peña. Ingeniero en Irrigación, UACH, México. M.C. en Hidrociencias y Doctor en Estadística, COLPOS, México. Profesor Investigador, UACH, México. e-mail: mavp52@hotmail.com.

TRACE METALS CONCENTRATION IN CONDENSED WATER FROM THE ATMOSPHERIC HUMIDITY IN THE VALLEY OF MEXICO

Ana Laura Bautista-Olivas, Jorge Leonardo Tovar-Salinas, Oscar Raúl Mancilla-Villa, Héctor Flores-Magdaleno, Carlos Ramírez-Ayala, Ramón Arteaga-Ramírez and Mario Vázquez-Peña

SUMMARY

The shortage of drinking water is a serious problem that makes it necessary to seek new options to mitigate it, being atmospheric water harvesting an option. However, it is necessary to ensure the obtained water quality, especially in areas with high levels of air pollution, such as the Valley of Mexico. This study evaluated, in water collected by condensation in the Valley of Mexico, the following variables: electric conductivity (EC) and pH, measured with a conductivity meter/potentiometer; and concentrations of Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb and Zn, determined by an inductively coupled plasma (ICP) spectrophotometer, following the methods recommended by EPA and APHA. The study was conducted in three areas:

one in Texcoco, State of Mexico; and two in Mexico City (central and northern areas). In each site, 25 samples were taken from May to August 2010. Water was collected with a prototype called 'Higroiman' (hygro-magnet), which lowers the temperature of the contact surface with environment to induce the dew point and condense the atmospheric humidity. A test of means (Tukey, $P \leq 0,05$) was applied to the results and these were compared with the permissible limits of drinking water established by WHO. The EC of atmospheric water is between 56,4 and 87,05 $\mu S \cdot cm^{-1}$, while pH values are between 6,58 and 6,63. In some samples, Al, Fe and Pb exceeded the permissible limits.

CONCENTRAÇÃO DE METAIS TRAÇO NA ÁGUA CONDENSADA DA UMIDADE ATMOSFÉRICA NO VALE DO MÉXICO

Ana Laura Bautista-Olivas, Jorge Leonardo Tovar-Salinas, Oscar Raúl Mancilla-Villa, Héctor Flores-Magdaleno, Carlos Ramírez-Ayala, Ramón Arteaga-Ramírez e Mario Vázquez-Peña

RESUMO

A escassez de água potável é um grave problema que traz a necessidade de buscar novas opções para mitigá-la, sendo uma opção o aproveitamento da água atmosférica. No entanto, é necessário garantir a qualidade da água captada, principalmente em zonas com altos níveis de contaminação atmosférica, como é o Vale do México. Este estudo consistiu em avaliar na água obtida por condensação no Vale do México as seguintes variáveis: condutividade elétrica (CE) e pH, medidos com um condutivímetro /potenciômetro; e concentrações de Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn, determinados mediante um espectrofotômetro de plasma acoplado indutivamente (ICP), empregando métodos recomendados por EPA e APHA. O estudo se realizou em três zonas: uma em Texcoco, estado de Méxi-

co, e duas na Cidade do México (zonas centro e norte). Em cada sitio se tomaram 25 amostras entre maio e agosto 2010. A água se captou com o protótipo de um aparelho denominado 'Higroimán', o qual diminui a temperatura da superfície de contato com o ambiente, para induzir o ponto de rocío e condensar a umidade atmosférica. Aplicou-se uma prova de médias (Tukey, $P \leq 0,05$) aos resultados obtidos e estes foram comparados com os limites permissíveis de água potável, estabelecidos pela OMS. A CE da água atmosférica se encontra entre 56,4 e 87,05 $\mu S \cdot cm^{-1}$, enquanto que os valores de pH estão entre 6,58 e 6,63. Em algumas amostras, o Al, Fe e Pb superam os limites permissíveis.

fuentes no convencionales para obtener agua (Schemenauer y Joe, 1989).

Nikolayev *et al.* (1996) indicaron que la humedad atmosférica puede ser una alternativa viable, en las zonas áridas y semiáridas, para obtener agua para consumo humano, debido a que aun en las zonas más secas del mundo hay humedad atmosférica (Shanyengana *et al.*, 2002). Sin embargo, es necesario garantizar la calidad del agua que se capta de la atmósfera, para no afectar la salud de quien la consuma.

Diversas investigaciones muestran los riesgos en la salud por metales pesados encontrados en el agua (Spain,

2003; Lucho *et al.*, 2005; Mapanda *et al.*, 2005; Tahri *et al.*, 2005). La importancia de estudiar los metales pesados radica en su capacidad de combinarse con una gran variedad de moléculas orgánicas y su fácil incorporación en el agua de lluvia y el agua atmosférica. De éstos, los más peligrosos son Pb, Mg, Cd, As, Cu, Zn y Cr, ya que influyen en diversas formas en los procesos fisiológicos de los organismos en los que tienden a bioacumularse (Marcovecchio *et al.*, 1991; Sresty y Rao, 1999).

Schemenauer y Cereceda (1992), Muselli *et al.* (2006), y Gandhidasan y Abualhamayel (2007) mencionan que la cali-

dad del agua condensada de la atmósfera depende de varios factores: la composición de la humedad atmosférica, el material del condensador atmosférico, la cantidad y la composición química del material que se deposita en los condensadores. Además, Jacob *et al.* (1985) y Fuzzi *et al.* (1984) señalan que la temperatura del aire y la radiación solar influyen en la concentración de los compuestos químicos en el agua atmosférica.

En general, el agua obtenida de la humedad atmosférica tiene bajo contenido de minerales y metales en zonas poco contaminadas (Gandhidasan y Abualhamayel, 2007). Sin embargo, en

sitios de alta contaminación se incorporan los elementos traza y partículas presentes en el aire en las gotas de agua (Fuzzi *et al.*, 1992).

La presencia de metales traza en el agua atmosférica puede derivarse de procesos naturales o de actividades antropogénicas. No obstante, en el plano regional, la fuente de contaminación atmosférica por metales se debe a las emisiones generadas por la actividad humana (Kabat-Pendias y Pendias, 1992; Tucker, 1991).

En el Valle de México se concentra una parte importante de la actividad industrial, política y comercial del país, lo cual trae como consecuencia la

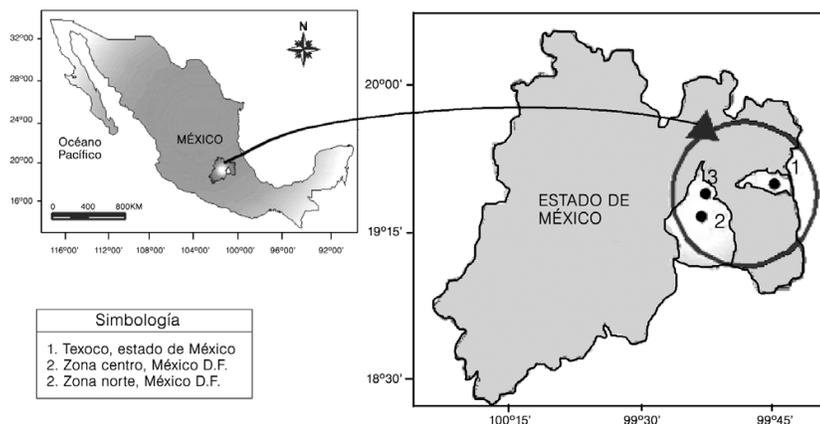


Figura 1. Localización de los sitios de estudio.

concentración de $21,7 \times 10^6$ personas, 20% de la población nacional, lo que origina valores importantes de contaminación ambiental, debido a los procesos de industrialización, el uso de automóviles y el alto consumo de combustibles fósiles. Esto deteriora la calidad atmosférica en la Ciudad de México (Negrete-Salas, 2000). La influencia de tales actividades afecta la calidad del aire y, por consecuencia, la calidad del agua condensada.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la conductividad eléctrica, el pH y la concentración de 11 metales traza en el agua obtenida por condensación con el Higroimán CP-H1-03, en tres sitios, y comparar los resultados con los estándares de agua potable establecidos por la OMS (1994).

Materiales y Métodos

La investigación se efectuó en tres sitios (Figura 1): 1) Texcoco, estado de México, $19^{\circ}30'44,29''N$, $98^{\circ}52'31,42''O$, altitud 2259m; 2) Zona centro, México D.F., $19^{\circ}24'27,11''N$, $99^{\circ}08'22,43''O$, altitud 2230m; y 3) Zona norte, México D.F., $19^{\circ}28'55,32''N$, $99^{\circ}04'55,32''O$, altitud 2236m. Texcoco se localiza vientos arriba al sureste, a 25km de distancia de la Ciudad de México.

Los datos promedio de humedad relativa y temperatura ambiental de los días en que se tomaron las muestras de agua atmosférica, se registraron con un higrotermógrafo instalado junto al prototipo empleado

para condensar la humedad.

La zona de estudio se encuentra dentro de la cuenca del Valle de México, rodeada por una cadena montañosa integrada por las formaciones de la sierra de Monte Bajo, sierra de Las Cruces, sierra del Chichinautzin, sierra Nevada y sierra de Río Frio, siendo el contenido de O_2 del aire de la zona metropolitana del Valle de México 23% menor que al nivel del mar. Esto contribuye a que los procesos de combustión sean menos eficientes y se emitan una mayor cantidad de contaminantes. El estudio de las concentraciones de contaminantes atmosféricos que se generan en grandes zonas urbanas como la Ciudad de México, indica que 58,6% de los días se presentan concentraciones mayores a los límites establecidos (ICVM, 2001).

El muestreo de aguase llevó a cabo de mayo a agosto 2010. Estos meses se caracterizan por ser época de secas en la región central de México y es precisamente en este lapso que se espera una mayor concentración de contaminantes. Se obtuvieron 25 muestras en cada sitio, para un total de 75 muestras de agua atmosférica.

Para obtener el agua se empleó un prototipo del Higroimán CP-HI-03, el cual fue colocado a una altura de 1m del suelo para asegurar que no hubiese resuspensión de polvo que contamine las muestras.

El Higroimán es una variante de un sistema de refrigeración que consta de: 1) compresor, 2) filtro, 3) tubo capilar, 4)

condensador, 5) serpentín o evaporador (tubería de cobre y aluminio), 6) termostato, 7) dos termómetros y 8) gas freón (R-12), cuya función es inducir a las moléculas de agua de la humedad atmosférica a condensarse en la superficie del serpentín, al disminuir la temperatura de éste (Bautista-Olivas *et al.*,

2011). El aparato fue utilizado de 6:00 a 21:00 para obtener las muestras de agua atmosférica en este horario considerando dos aspectos: a) Para que se obtenga agua del aire es necesario encender el aparato por varias horas, ya que el promedio de condensación de agua del Higroimán es de $2l \cdot m^2/día$. b) García-Reynoso *et al.* 2007 indican que la mayor concentración de PM_{10} (partículas $<10\mu m$) se encuentra entre las 17:00 y 21:00 horas.

Las muestras de agua atmosférica se colectaron según lo señalado por la APHA (1995). El primer litro de agua colectado se utilizó para determinar la CE y el pH, con la metodología descrita en APHA (1995). Para determinar los metales traza se utilizó el segundo litro de agua; la muestra se preservó con ácido nítrico concentrado, a $pH < 2$. En la determinación de los metales traza (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb y Zn) se empleó un espectrofotómetro de plasma acoplado inductivamente (IPC) Perkin-Elmer, Modelo 5300, en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México. El ICP fue calibrado de acuerdo con EPA (1996).

Para asegurar la confiabilidad de los resultados en el análisis de metales traza se preparó un blanco con agua tipo II, el cual se obtuvo de un destilador Perkin-Elmer; además, el agua se pasó por un sistema de rayos UV (modelo EtixR20, Perkin Elmer). Esta agua se mantuvo la misma

cantidad de horas dentro de un recipiente con una superficie de contacto del mismo material con la que se condensa el agua en el prototipo.

Los resultados de la concentración de metales traza, la CE y el pH se analizaron estadísticamente por comparación de medias (Tukey, $P \leq 0,05$) con el programa *Statistical Analysis System*, para conocer si existen diferencias entre sitios de estudio; además, los valores encontrados se compararon con los límites permisibles establecidos por la OMS (1994).

Resultados y Discusión

La humedad relativa y la temperatura son fenómenos meteorológicos que cambian constantemente a lo largo del día y determinan la cantidad de agua que se puede obtener con el Higroimán. En promedio se captaron 2 litros de agua en una superficie activa de $1,7m^2$ en 7h de trabajo continuo del Higroimán. La humedad relativa y temperatura ambiental presentes durante el periodo de condensación se presentan en la Tabla I.

Por otro lado, debido a que en las normas de la OMS, de 1994, no se considera la CE dentro de los estándares de calidad de agua potable, para este ítem se tomó en cuenta el trabajo de Shanyengana *et al.* (2002), al utilizar los estándares de CE de la calidad de agua potable de Namibia (Tabla II), donde se presentan resultados para evaluar agua de niebla.

Los tres sitios de estudio se encuentran en el intervalo de CE de excelente calidad, según la DWA (1998). Sin embargo, existe una diferencia significativa entre la CE del agua condensada de Texcoco y la CE de los dos sitios del Distrito Federal, aunque los tres se encuentran en el mismo intervalo de calidad excelente (Tabla III). Los valores obtenidos para CE están por debajo de los $100\mu S \cdot cm^{-1}$, sin embargo, la baja concentración de electrolitos pudiera afectar la potabilidad del agua condensada Shanyengana *et al.* (2002).

TABLA I
 PROMEDIO DE HUMEDAD RELATIVA Y TEMPERATURA AMBIENTAL EN HORARIO DE 14:00 A 21:00 DE LOS DÍAS QUE SE OBTUVO AGUA ATMOSFÉRICA CON EL HIGROIMAN EN LOS TRES SITIOS DE ESTUDIO

Muestra	Fecha	Texcoco, Estado de México		Fecha	Ciudad de México (Zona Centro)		Fecha	Ciudad de México (Zona Norte)	
		Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)		Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)
1	02-mayo-10	48,37	21,86	15 junio 2010	49,04	20,87	13 julio 2010	61,13	22,35
2	20-mayo-10	41,75	23,08	16 junio 2010	70,69	18,53	14 julio 2010	57,90	18,57
3	21-mayo-10	70,50	17,55	17 junio 2010	65,55	17,83	15 julio 2010	54,25	20,45
4	22-mayo-10	52,75	19,55	18 junio 2010	61,02	18,84	16 julio 2010	57,03	19,70
5	23-mayo-10	34,00	20,87	19 junio 2010	43,97	21,45	17 julio 2010	45,81	20,30
6	24-mayo-10	55,60	21,40	20 junio 2010	50,90	20,33	18 julio 2010	53,97	20,60
7	25-mayo-10	53,20	22,10	21 junio 2010	45,23	22,06	19 julio 2010	54,02	21,07
8	26-mayo-10	57,40	24,10	22 junio 2010	49,66	21,64	20 julio 2010	62,06	18,95
9	27-mayo-10	43,87	23,10	23 junio 2010	47,74	21,64	21 julio 2010	60,55	19,71
10	28-mayo-10	61,00	20,48	24 junio 2010	48,04	20,98	22 julio 2010	73,06	17,50
11	29-mayo-10	36,87	24,75	25 junio 2010	47,81	20,61	23 julio 2010	78,69	17,62
12	30-mayo-10	21,12	26,75	26 junio 2010	50,48	21,94	24 julio 2010	91,93	15,64
13	31-mayo-10	23,50	25,85	27 junio 2010	41,10	23,00	25 julio 2010	74,58	18,44
14	1 junio 2010	21,75	25,25	28 junio 2010	44,62	21,99	26 julio 2010	70,23	18,32
15	2 junio 2010	24,00	25,73	29 junio 2010	49,86	20,62	27 julio 2010	54,23	20,83
16	3 junio 2010	27,00	24,88	30 junio 2010	48,60	22,34	28 julio 2010	63,09	19,22
17	4 junio 2010	22,87	26,46	1 julio 2010	65,20	20,51	29 julio 2010	60,15	20,15
18	5 junio 2010	35,62	24,02	2 julio 2010	52,34	23,01	30 julio 2010	47,13	19,40
19	6 junio 2010	35,75	25,20	3 julio 2010	53,79	21,11	31 julio 2010	52,67	20,32
20	7 junio 2010	37,52	24,13	4 julio 2010	51,88	21,45	1 agosto 2010	60,48	21,47
21	8 junio 2010	61,02	20,07	5 julio 2010	56,04	20,92	2 agosto 2010	56,81	22,30
22	9 junio 2010	52,04	22,42	6 julio 2010	60,74	20,60	3 agosto 2010	59,02	22,14
23	10 junio 2010	57,85	21,78	7 julio 2010	65,20	19,74	4 agosto 2010	62,27	20,56
24	11 junio 2010	60,27	20,33	8 julio 2010	73,97	18,26	5 agosto 2010	55,27	21,19
25	12 junio 2010	60,60	20,67	9 julio 2010	88,83	15,99	6 agosto 2010	64,25	22,03

TABLA II
 ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA POTABLE PARA LA CE EN NAMIBIA

Grupos	Conductividad ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Grupo A (excelente calidad)	100-1500
Grupo B (buena)	1500-3000
Grupo C (bajo riesgo para la salud)	3000-4000
Grupo D (alto riesgo para la salud)	>4000

Fuente: DWA (1998).

Al considerar los valores de la CE, en la presente investigación se obtuvieron datos que sugieren una excelente calidad del agua en los tres sitios de estudio, con referencia al contenido electrolítico (Tabla II). Lo encontrado coincide con los resultados de Shanyengana *et al.* (2002), quienes reportan agua colectada de la niebla de Namibia de excelente calidad. Por su parte Gandhidasan y Abualhamayel (2007), presentan resultados de agua condensada de niebla en Arabia Saudita con calidad excelente para 50% de sus muestras y el otro 50% de las muestras de agua clasificadas como de calidad buena de acuerdo a DWA (1998).

En la Figura 2 se muestra el promedio de la concentración de los metales traza, siendo orden: $\text{Cu} > \text{Al} > \text{Zn} > \text{Fe} > \text{Cr} > \text{Ba} > \text{Pb} > \text{Mn} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{As}$. El Cu tuvo una concentración mayor en la zona de Texcoco, mientras que el As y el Hg tienen las menores concentraciones en los tres sitios de estudio.

La presencia de metales traza en el agua condensada por el Higroimán se debe a diversos procesos naturales y antropogénicos que acidifican la atmósfera. Estos procesos están determinados por la neutralización de compuestos ácidos (CO_2 , SO_2 , H_2SO_4 , HNO_3 y HCOOH), los cuales, al impactar el suelo liberan metales como el Al, Hg, Cd, Cr, por lo

TABLA III
 CE PROMEDIO EN LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

Sitio	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Texcoco, estado de México	87,051 a
Zona centro, México D.F.	63,704 b
Zona norte, México D.F.	56,474 b

Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0,05$).

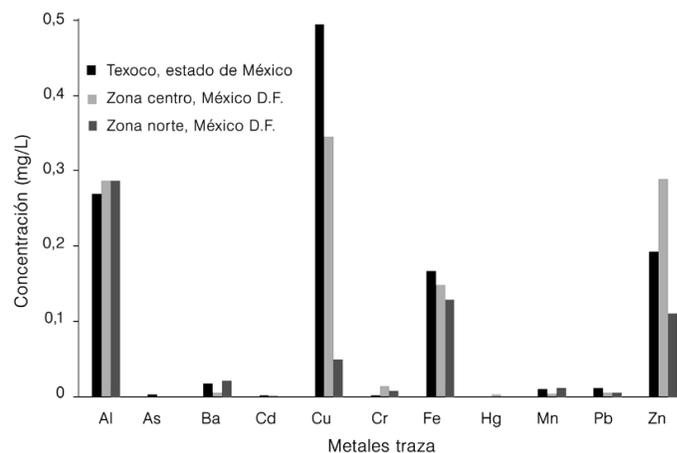


Figura 2. Promedio de la concentración de los metales traza en los tres sitios de estudio.

que la concentración de éstos se incrementa en el aire (Spumy, 1996).

En la Tabla IV se presentan los valores promedio de pH, los cuales se encuentran dentro

TABLA IV
COMPARACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE CALIDAD DE AGUA POTABLE DE OMS (1994) CON LAS
CONCENTRACIONES DE PH Y 11 METALES TRAZA

pH	Al	As	Ba	Cd	Cu	Cr (total)	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn	Referencia
6,5-8,5	0,20	0,01	0,3	0,003	2	0,05	0,3	0,001	0,5	0,01	3	OMS, 1994
6,62 a	0,27 a	0,002 a	0,017 a	0,0017 a	0,493 a	0,001 b	0,0119 a	0 a	0,0107 a	0,011 a	0,192 a	Texcoco *
6,63 a	0,29 a	0,0003 b	0,005 a	0,0013 a	0,344 b	0,01 a	0,003 a	0 a	0,003 b	0,003 a	0,288 a	Zona centro, México D.F. *
6,58 a	0,28 a	0,0002 a	0,021 b	0,0009 b	0,0498 c	0,007 ab	0,005 a	0 a	0,011 a	0,005 a	0,11 a	Zona norte, México D.F. *
7,66	—	—	—	—	—	—	0,62	—	0,03	—	0,041	Gandhidasan y Abualhamayel (2007) Arabia
4-6,5	—	—	—	—	—	0,10-3,9	0,29-0,96	—	0,1-0,9	0,10	—	Patel <i>et al.</i> (1998) India
4,02	—	—	—	—	—	—	0,167	—	0,0274	0,207	0,81	Millet <i>et al.</i> (1996) France
7,4	—	0,001	—	0,0005	0,005	0,005	0,06	—	0,014	0,0005	—	Schemenauer y Cereceda (1992) Arabia
4,8	—	—	—	—	—	—	0,586	—	0,027	0,1036	0,653	Joos y Baltensperger (1991) Suiza
4,99	0,023	0,0071	—	0,0005	0,013	0,0009	0,052	—	0,012	0,0076	0,02	Schemenauer y Cereceda (1991) Chile
—	—	—	—	—	—	—	0,558	—	0,027	0,103	—	Jacob <i>et al.</i> (1986) EEUU
4,02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,414	0,32	Johnson <i>et al.</i> (1987) Suiza
3,66	—	—	—	—	—	—	1,67	—	0,082	0,828	—	Jacob <i>et al.</i> (1985) EEUU

* Presente estudio. Medias con distinta letra en una columna son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$).

de los límites permisibles y no hay diferencia significativa entre los tres sitios. Sin embargo,

al analizar los valores individuales de cada muestra se observa que en la Zona 2 se re-

gistraron los valores extremos de 6,03 y 7,2; además, 22,6% de las muestras presentan pH

<6,5 que es el valor indicado por la OMS (1994) como aceptable para agua potable.

Además, en la Tabla IV se presentan los valores de los límites permisibles de 11 metales traza, de acuerdo con la OMS (1994) y se muestran los valores promedio de metales obtenidos en cada sitio en este trabajo, así como los resultados de otros estudios. La concentración de Al, Fe, Hg, Pb y Zn no presenta diferencias significativas entre los tres sitios en este estudio, mientras que en el resto de los metales traza sí existen diferencias.

En este trabajo se detectaron As, Cd y Cr en cantidades mínimas, lo que concuerda con Gandhidasan y Abualhamayel (2007), quienes reportaron ausencia de estos metales traza en Arabia Saudita. Sin embargo, Patel *et al.* (1998) encontraron concentraciones de Cr que superan los estándares de la OMS (1994) y su presencia está relacionada con el proceso de productos de la industria manufacturera (ATSDR, 2007).

Los valores de Mn y Zn están por debajo de 0,15 y $5\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$, respectivamente, lo que coincide con Gandhidasan y Abualhamayel (2007). Dichas concentraciones cumplen con la norma de la OMS (1994).

El Al, Fe y Pb superan, en algunas muestras, el límite permisible establecido por los estándares, por lo que se hace

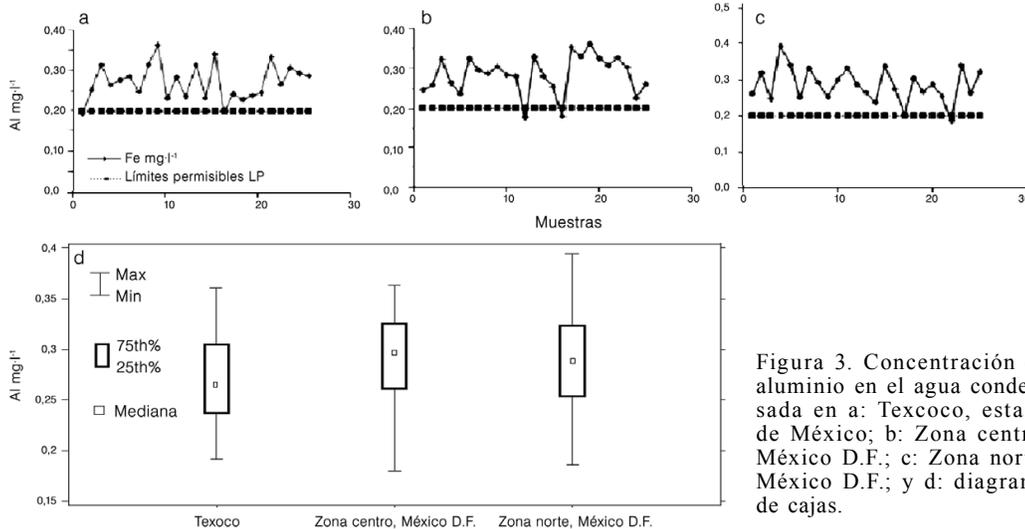


Figura 3. Concentración de aluminio en el agua condensada en a: Texcoco, estado de México; b: Zona centro, México D.F.; c: Zona norte, México D.F.; y d: diagrama de cajas.

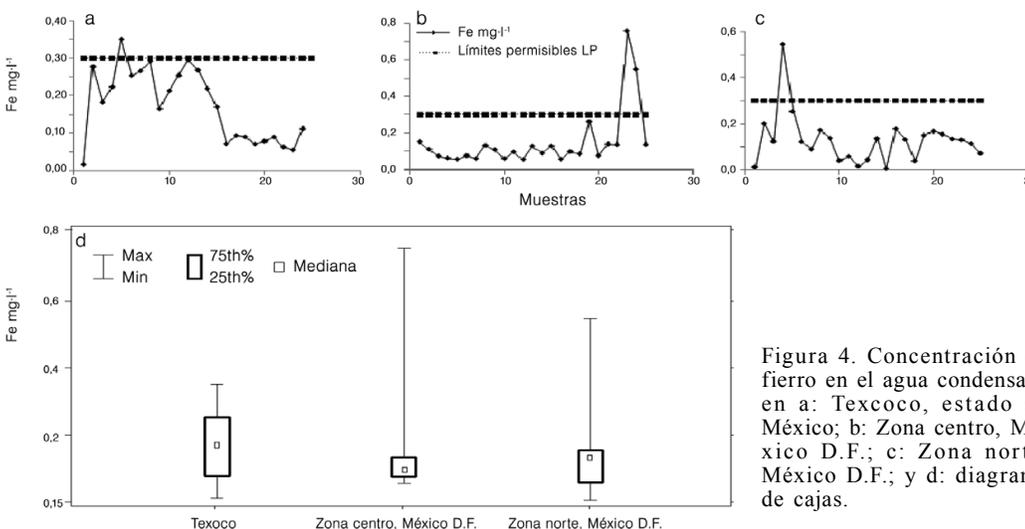


Figura 4. Concentración de hierro en el agua condensada en a: Texcoco, estado de México; b: Zona centro, México D.F.; c: Zona norte, México D.F.; y d: diagrama de cajas.

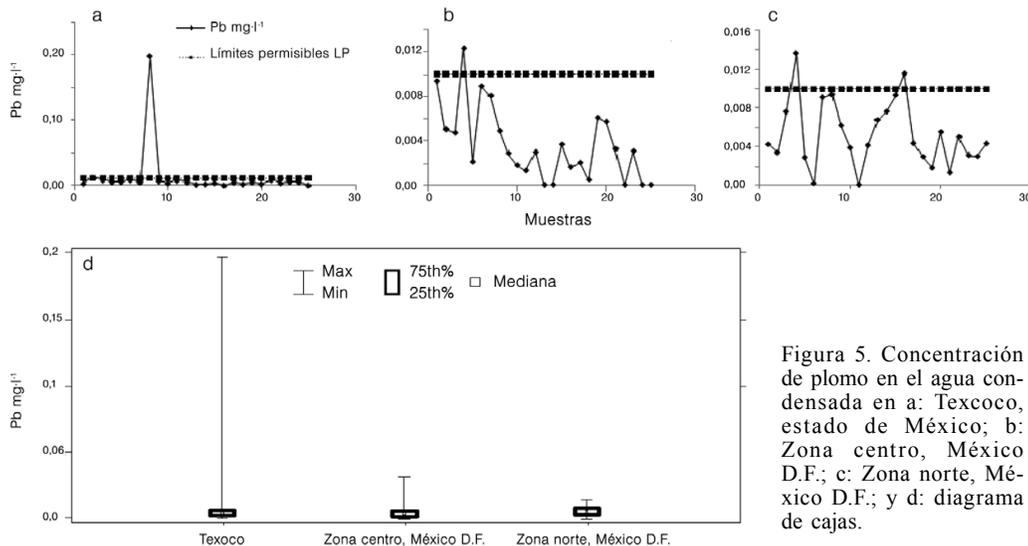


Figura 5. Concentración de plomo en el agua condensada en a: Texcoco, estado de México; b: Zona centro, México D.F.; c: Zona norte, México D.F.; y d: diagrama de cajas.

una discusión más extensa de estos (Figuras 3, 4 y 5).

En la Figura 3a, b y c se observa que en los tres sitios de estudio, el Al sobrepasa los límites permisibles establecidos por la OMS (1994) en 94% de las muestras, mientras que en 6% de las muestras restantes la concentración se encuentra cercana a dichos límites.

Schemenauer y Cereceda (1992), Muselli *et al.* (2006) y Gandhidasan y Abualhamayel (2007) mencionan que la calidad del agua condensada de la atmósfera depende entre otros factores del material del condensador atmosférico. La superficie utilizada para la condensación de la humedad está hecha de Al, lo que provee de este elemento al agua condensada, como se corroboró en el blanco analizado.

En la Figura 3d se observa que en 50% de las muestras, en los tres sitios, la concentración de Al se encuentra es $<0,27\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Además, no hay datos atípicos que rebasen los límites, superior e inferior, de la dispersión de las concentraciones del Al. En los tres sitios, los datos son similares y no hay diferencia significativa entre ellos. En el Distrito Federal, zona norte, se detectó la mayor dispersión de la concentración de Al.

En la Figura 4a, b c se observa que en las tres zonas de estudio en 4, 12 y 4% de las

muestras de agua, respectivamente, el Fe superó los estándares establecidos por la OMS (1994) y en 4, 8 y 4% de las muestras de agua se encontraron concentraciones de Fe cercanas a los límites permisibles del estándar (OMS, 1994). Gandhidasan y Abualhamayel (2007) encontraron que 50% de las muestras de agua de niebla superaron el límite permisible en la concentración del Fe.

En la Figura 4d se aprecia que la dispersión de los valores de Fe es mayor en la zona centro México D.F. que en los otros dos sitios, debido a que el límite superior se encontró con una concentración de $0,75\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Además, en Texcoco se presenta una distribución simétrica en la concentración de Fe. En 75% de las muestras obtenidas en los tres sitios de estudio, la concentración de Fe está es $<0,3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Lo anterior indica que 75% de los datos cumplen con los límites permisibles (OMS, 1994).

En cuanto al Pb, en la Figura 5a, b, c se muestra que en los tres sitios, en promedio, 5,3% de las muestras de agua no cumplen con lo establecido por la OMS (1994). Además, se detectó la concentración máxima de $0,2\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de Pb en una muestra de agua en la zona de Texcoco (Figura 5a).

La Figura 5d indica que en 75% de las muestras de agua, en los tres sitios de estudio, la concentración de Pb se encuen-

tra es $<0,01\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Además, la Figura 5d muestra que la distribución de la concentración de Pb en Texcoco y la zona centro son asimétricas, mientras que en la zona norte la tendencia es simétrica.

Gandhidasan y Abualhamayel (2007) no detectaron Pb en ninguna muestra de agua de niebla. En el presente trabajo, la presencia de Pb en las muestras se debe a que la zona metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se caracteriza por ser una zona de alta industrialización y tráfico vehicular. A pesar de que en México se redujo el uso de este metal en las gasolinas y en la manufactura de productos con compuestos de plomo, las cantidades existentes en el ambiente aún son altas (Caridi y Kreiner, 1989). Esto se debe a que una vez liberado el Pb en la atmósfera es removido del aire por la lluvia y el que cae al suelo permanece fuertemente unido a partículas del suelo por años, por lo que el uso del Pb en el pasado tiene un impacto considerable en la cantidad de este metal en la atmósfera (ATSDR, 2007). Lo anterior explica la presencia de Pb en el agua condensada con el Higroimán.

Conclusiones

La superficie de contacto del Higroimán y la calidad del aire en el Valle de México influyen

en la calidad del agua obtenida del aire por el aparato que induce el punto de rocío.

Al considerar los estándares de calidad de Namibia, el agua de la atmósfera en los tres sitios de estudio se considera agua de excelente calidad. En cuanto al pH en las muestras analizadas 77,4% presentan una calidad excelente y en 22,6% es buena.

Se encontró que no hay diferencias significativas en la detección de Al, Fe, Hg, Zn y pH, en los tres sitios de estudio. En algunas muestras, el Al, Fe y Pb rebasaron los estándares de calidad de la OMS.

De acuerdo a la concentración de metales traza en la mayoría de las muestras de agua condensada de la atmósfera en el Valle de México, la calidad de dicho recurso es excelente.

Se recomienda que la superficie de contacto del Higroimán sea de acero inoxidable para evitar contaminación de las muestras por el aluminio o cobre de las superficies actuales.

Se recomienda continuar investigando la calidad del agua que se puede obtener de la atmósfera en el Valle de México, considerando el análisis de coliformes fecales y *E. coli*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) la beca de postgrado otorgada a Ana Laura Bautista Olivas; a la unidad de mantenimiento de equipo del Colegio de Postgraduados, Marcos Arévalo Godínez y Mario Vázquez García, por fabricar el Higroimán con el cual se obtuvieron las muestras de agua; al Laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados por las facilidades para realizar los análisis de metales pesados; y a Carmen Olivas Rodríguez por su participación en la toma de muestras.

REFERENCIAS

- APHA (1995) Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. APHA (American Public Health Association), WWA (American Water Works Association), WPCF (Water Pollution

- Control Federation), Washington, DC, USA.1030 p.
- ATSDR (2007) Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. Atlanta, GA, EEUU. www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_ifacts13.html (Cons. 6/02/2014).
- Bautista-Olivas AL, Tovar-Salinas JL, Palacios-Vélez OL, Mancilla-Villa OR (2011) La humedad atmosférica como fuente opcional de agua para uso doméstico. *Agrociencia* 45: 293-301.
- Caridi A, Kreiner AJ (1989) Plomo en la atmósfera. *Ciencia Hoy* 1: 8.
- DWA (1998) *Guidelines for the Evaluation of Drinking Water for Human Consumption with regard to Chemical, Physical and Bacteriological Quality*. Department of Water Affairs. Namibia. 761-485 pp.
- EPA (1996) *Method 6010B. Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*. Rev. 2. Environmental Protection Agency. Las Vegas, NV, EEUU. 25 pp.
- Fuzzi S, Castillo RA, Jiusto JE, Lala GC (1984) Chemical composition of radiation fog at Albany, New York and its relationship to fog microphysics. *J. Geophys. Res.* 85: 7159-7164.
- Fuzzi S, Facchini MC, Orsi G *et al.* (1992) The Po valley fog experiment. *TellusB* 44: 448-468.
- Gandhidasan P, Abualhamayel H (2007) Fog collection as a source of fresh water supply in the kingdom of Saudi Arabia. *Water Environ. J.* 21: 19-25.
- García R, Grutter M, Cintora-Juárez D (2007) Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Rev. Int. Contam. Amb.* 23: 169-175.
- ICVM (2001) *Informe Climatológico Ambiental. Cuenca del Valle de México* Secretaría Medio Ambiente. México D:F: www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/informe_climatologico_ambiental_cuenca_valle_mexico.pdf (Cons. 20/08/2010).
- Jacob DJ, Munger JW, Waldman JD, Hoffmann MR (1986) The H₂SO₄-HNO₃-NH₃ system at high humidities and in fogs: 1. Spatial and temporal patterns in the San Joaquin Valley of California. *J. Geophys. Res.* 91: 1073-1088.
- Jacob DJ, Waldman JM, Munger JW, Hoffmann MR (1985) Chemical composition of fog water collected along the California coast. *Environ. Sci. Technol.* 19: 730-736.
- Johnson CA, Sigg L, Zobrist J (1987) Case studies on the chemical composition of fog water: the influence of local gaseous emissions. *Atmos. Environ.* 21: 2365-2374.
- Joos F, Baltensperger U (1991) A field study on chemistry S. (IV) oxidation rates and vertical transport during fog conditions. *Atmos. Environ.* 25a: 217-230.
- Kabatas-Pendias D, Pendias H (1992) *Trace Elements in Soil and Plants*. Vol. 1. CRC Press, Boca Raton, FL, EEUU. 415 pp.
- Lucho CA, Prieto F, Del Razo LM, Rodríguez R, Poggi H (2005) Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico. *Agric. Ecosyst. Environ.* 108: 57-71.
- Mapanda F, Mangwayana EN, Nyamangara J, Giller KE (2005) The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 107: 151-165.
- Marcovecchio J, Moreno VJ, Pérez A (1991) Metal accumulation in tissues of sharks from the Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Mar. Environ. Res.* 31: 263-274.
- Millet M, Sanusi A, Wortham H (1996) Chemical composition of fog water in inurbane area: Strasbourg (France). *Environ. Pollut.* 94: 345-354.
- Muselli M, Beysens D, Soyeux E, Clus O (2006) Is dew water potable? Chemical and biological analyses of dew water in Ajaccio (Corsica Island, France). *J Environ Qual.* 32: 1812-1817.
- Negrete-Salas M (2000) *Dinámica Demográfica en la Ciudad de México: la Ciudad de México en el Fin del Segundo Milenio*. El Colegio de México. pp. 247-255.
- Nikolayev D, Beysens A, Gioda I, Milimouk E, Katiouchine, J, Morel P (1996) Water recovery from dew. *J. Hydro.* 182: 19-35.
- OMS (1994) www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_full_lowres.pdf?ua=1 (Consultado 19/03/2014)
- Patel KS, Tripathi A, Chandrawanshi CK, Aggarwal SG, Patel RM, Deb MK, Agnihotri PK, Patel VK (1998) Yellowish fog precipitation in Central India. Proc. 1st Int. Conf. on Fog and Fog Collection. (19-24/07/1998). Vancouver, Canada. pp. 309-312.
- Schemenauer RS, Cereceda P (1991) Monsoon cloud water chemistry on the Arabian Peninsula. *Atmos. Environ.* 26a: 1583-1587.
- Schemenauer RS, Cereceda P (1992) The quality of fog water collected for domestic and agricultural use in Chile. *J. Appl. Meteorol.* 31: 275-290.
- Schemenauer R, Joe P (1989) The collection efficiency of a massive fog collector. *Atmos. Res.* 24: 53-69.
- Shanyengana S, Henschel J, Seely M, Sanderson R (2002) Exploring fog as a supplementary water source in Namibia. *Atmos. Res.* 64: 251-259.
- Spain A (2003) Implications of microbial heavy metals tolerance in the environment. *Rev. Undergrad. Res.* 2: 1-6.
- Spurny KR (1996) Atmospheric particulate pollutants and environmental health. *Arch. Environ. Health* 5: 415-416.
- Sresty TVS, Rao Kvm (1999) Ultrastructural alterations in response to zinc and nickel stress in the root cells of pigeon pea. *Environ. Exp. Bot.* 41: 3-13.
- Tahri M, Benyaïch F, Bounakhla M (2005) Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environ. Monit. Assess.* 102: 405-417.
- Tucker ME (1991) *Sedimentary Petrology, An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 2^a ed. Backwell. Oxford, RU. 260 pp.