

METALES PESADOS, ARSÉNICO Y BORO EN AGUA DE RIEGO SUBTERRÁNEA EN ZACOALCO DE TORRES Y AUTLÁN DE NAVARRO, JALISCO

HEAVY METALS, ARSENIC AND BORON IN UNDERGROUND IRRIGATION WATER OF ZACOALCO DE TORRES AND AUTLÁN DE NAVARRO, JALISCO

Oscar Raúl **Mancilla-Villa**¹, Blanca Noemy **Anzaldo-Cortes**², Rubén Darío **Guevara-Gutiérrez**², Omar **Hernández-Vargas**², Héctor Manuel **Ortega-Escobar**³, Héctor **Flores-Magdalen**³, Álvaro **Can-Chulim**⁴, José Luis **Olguín-Lopez**², Isabel **Mendoza-Saldivar**⁵, Edgar Iván **Sánchez-Bernal**⁶, Elia **Cruz-Crespo**⁴, Oscar Arturo **Barreto-García**²

¹Departamento de Producción Agrícola del Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara; Avenida Independencia Nacional # 151. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco, México. (oscar.mancilla@academicos.udg.mx). ²Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Avenida Independencia Nacional # 151, Autlán de Navarro, Jal. 48900. ³Hidrociencias. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México, México. ⁴Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Carretera Tepic-Compostela Km. 9. 63155. Xalisco, Nayarit, México. ⁵Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo ITESA; Carretera Apan-Tepeapulco, Las Peñitas, 43900 Apan, Hidalgo. ⁶Departamento de Ecología, Universidad del Mar. Ciudad Universitaria. 70902. Puerto Ángel, Pochutla, Oaxaca, México.

RESUMEN

Las concentraciones altas de metales pesados en aguas subterráneas utilizadas para el riego tienen el potencial de causar daños fisiológicos en los cultivos agrícolas, disminuir la calidad y el rendimiento de las cosechas. Además hay efectos en la salud humana por el consumo de productos contaminados. El objetivo de esta investigación fue determinar la concentración de Cd, Hg, Pb, As y B en el agua subterránea de uso agrícola en los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco, México, ambos con una gran actividad agrícola. El estudio se realizó de febrero a abril y de agosto a noviembre de 2017, y se analizaron 24 muestras de agua subterránea por temporada. Las evaluaciones fueron: potencial de hidrogeno (pH) y la conductividad eléctrica (C.E.); cuantificación de los metales pesados cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb) y el metaloide arsénico (As); contenido de boro (B) en el agua subterránea dada su importancia nutricional y tóxica. Los metales pesados se determinaron con la técnica de espectrometría de emisión atómica. Las concentraciones encontradas se compararon con los lineamientos de la NOM-001-ECOL-1996. En promedio la conductividad eléctrica fue $665 \mu\text{S cm}^{-1}$ y el pH 7.7, valores que no representan restricción en cuanto al uso del agua en riego agrícola. En los metales pesados el Hg excedió en 100% de las muestras los límites máximos

ABSTRACT

The high concentrations of heavy metals in groundwater used for irrigation have the potential of causing physiological damage in agricultural crops, as well as reducing the quality and yield of harvests. Furthermore, there are effects on human health due to the consumption of contaminated products. The objective of the present study was to determine the concentration of Cd, Hg, Pb, As and B in the groundwater for agricultural use in the municipalities of Autlán de Navarro and Zacoalco de Torres, Jalisco, Mexico, both with high agricultural activity. The study was conducted from February to April and from August to November of 2017, and 24 samples of groundwater were analyzed per season. The evaluations were as follows: potential of hydrogen (pH) and electric conductivity (C.E.); quantification of the heavy metals cadmium (Cd), mercury (Hg), lead (Pb) and the metalloid arsenic (As); content of boron (B) in the groundwater given its nutritional and toxic importance. The heavy metals were determined by atomic emission spectrometry and the concentrations found were compared with the guidelines of the NOM-001-ECOL-1996. On the average, electric conductivity was $665 \mu\text{S cm}^{-1}$ and the pH 7.7, values that do not represent restriction with respect to the use of agricultural irrigation water. In the heavy metals, the Hg exceeded in 100% of the samples the maximum limits established with an average concentration of 0.14 mg L^{-1} , the metalloid As exceeded in 16% of the samples the maximum limit with an average concentration of 0.13 mg L^{-1} , but Cd, Pb and B did not surpass the values established as

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.
Recibido: Mayo, 2020. Aprobado: Septiembre, 2020.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 54: 995-1007. 2020.

establecidos con una concentración promedio de 0.14 mg L^{-1} , el metaloide As excedió en 16% de las muestras el límite máximo con una concentración promedio de 0.13 mg L^{-1} , pero Cd, Pb y B no superaron los valores establecidos como límite permisible para el uso del agua en riego agrícola.

Palabras clave: agricultura, calidad de agua, toxicología, elementos tóxicos.

INTRODUCCIÓN

Para la agricultura de riego la calidad del agua es muy importante, porque de esto depende la obtención de buenos resultados en la cosecha. En las aguas de riego se analizan las concentraciones iónicas, concentraciones de sales, conductividad eléctrica, etc. El análisis de metales pesados es de suma importancia dada su estrecha relación con el desarrollo fisiológico de las plantas, porque hay evidencia de que la presencia de estos elementos tóxicos afecta la germinación, el desarrollo de los cultivos, el rendimiento y la calidad de las cosechas (Olivares *et al.*, 2013). La evaluación de las concentraciones de metales pesados en el agua subterránea es importante porque estos metales son parte de la corteza terrestre, en forma de rocas o minerales, y no se pueden degradar mediante procesos biológicos o físicos, son bioacumulables y con alta toxicidad, lo cual causa problemas ambientales y de salud humana (Bautista *et al.*, 2017).

Los metales más analizados en diferentes matrices ambientales (agua, suelo, biota) son: plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd) y mercurio (Hg), que pueden introducirse a los mantos freáticos y contaminar las aguas subterráneas utilizadas en riego agrícola. Los metales proceden desde desechos industriales, vertederos de aguas urbanas sin tratamiento, lixiviados de basureros, y desde los campos agrícolas donde se utilizan herbicidas y pesticidas. Estos elementos tóxicos en las aguas subterráneas usadas para riego agrícola pueden acumularse en los suelos, y por su naturaleza no biodegradable ingresan a las plantas por medio de las raíces, lo que propicia riesgo de toxicidad y afectaciones en el desarrollo fisiológico; la consecuencia es una disminución de los rendimientos de la cosecha y la calidad de los productos (Reyes *et al.*, 2016).

Las plantas poseen mecanismos especializados en acumular, absorber y translocar sustancias, ya que los metales pesados son equivalentes químicamente a los

permisible limit for the use of water in agricultural irrigation.

Key words: agriculture, water quality, toxicology, toxic elements

INTRODUCTION

For irrigation agriculture, water quality is very important, because obtaining good results in harvest depends on it. In irrigation water, analyses are carried out of ionic concentrations, salt concentrations, electric conductivity, etc. The analysis of heavy metals is of vital importance because of its close relationship with the physiological development of the plants, given that there is evidence that the presence of these toxic elements affects the germination, crop development, yield and quality of harvests (Olivares *et al.*, 2013). The evaluation of the heavy metals concentrations in groundwater is important, because these metals are part of the earth's crust, in the form of rocks or minerals, and they cannot be degraded through biological or physical processes, they are bio-accumulable and with high toxicity, which causes problems for the environment and human health (Bautista *et al.*, 2017).

The metals most analyzed in different environmental matrices (water, soil, biota) are: lead ((Pb), arsenic (As), cadmium (Cd) and mercury (Hg), which can be introduced to the groundwater and contaminate the underground water used in agricultural irrigation. The metals proceed from industrial waste, untreated urban waste water, lixiviates from garbage dumps, and from agricultural fields where herbicides and pesticides are used. These toxic elements in the groundwater used for agricultural irrigation can accumulate in the soils, and due to their non-biodegradable nature, enter plants by means of the roots, which propitiates risk of toxicity and impact on physiological development; the consequence is a reduction in yields of the crops and in quality of the products (Reyes *et al.*, 2016).

Plants have mechanisms that are specialized in accumulating, absorbing and translocating substances, given that the heavy metals are chemically equivalent to the nutrients that they normally absorb. The heavy metals enter the trophic chain in plants irrigated with contaminated water. By their nature, the metals are not biodegradable and bioaccumulate in the tissues of organisms, causing chronic toxic effects (Reyes *et al.*, 2016).

nutrientes que absorben de manera normal. Los metales pesados ingresan a la cadena trófica en las plantas irrigadas con aguas contaminadas. Por su naturaleza los metales no son biodegradables y se bioacumulan en los tejidos de los organismos, lo cual causa efectos tóxicos crónicos (Reyes *et al.*, 2016).

La mayoría de las aguas superficiales contienen cantidades aceptables de boro (B), pero las aguas de los pozos profundos en algunas áreas contienen cantidades tóxicas (Can-Chulim, 2011). Este elemento entra a las aguas superficiales y subterráneas a través de dos vías: el intemperismo de rocas que contienen B (borosilicatos del tipo turmalina y axinita), y aguas residuales (Mancilla-Villa *et al.*, 2014). El B es un elemento esencial pero tóxico para las plantas cuando excede apenas ligeramente el nivel óptimo; los límites establecidos de tolerancia al B aplican para varios cultivos, por lo cual se proponen intervalos de toxicidad para: 1) cultivos sensibles ($< 0.33 \text{ mg L}^{-1}$); 2) cultivos semitolerantes ($< 0.67 \text{ mg L}^{-1}$); y 3) cultivos tolerantes ($< 1.00 \text{ mg L}^{-1}$) (Mancilla-Villa *et al.*, 2014).

En los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, estado de Jalisco, México, existe una alta actividad agrícola y los cultivos principales son caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), maíz (*Zea mays*) y hortalizas. Esta actividad es muy importante para la economía de las dos regiones y municipios estudiados. Además del agua de riego superficial, se utiliza agua subterránea para irrigar los campos de cultivo. El objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones de los metales pesados: plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), el metaloide arsénico (As) y boro (B) en el agua subterránea, así como definir el riesgo de utilizar esa agua para regar los campos agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El municipio de Zacoalco de Torres está en el sureste del estado de Jalisco, en $20^{\circ} 01' 30''$ a $20^{\circ} 21' 05''$ N y $103^{\circ} 30' 30''$ a $103^{\circ} 41' 25''$ O, a una altitud promedio de 1354 m; el clima es semiárido cálido con precipitación media anual de 828 mm y temperatura promedio anual de 20.2°C (CEA, 2015) (Figura 1). El municipio de Autlán de Navarro está en el suroeste del estado, en $19^{\circ} 34' 30''$ a los $19^{\circ} 53' 45''$ N, y $104^{\circ} 07' 00''$ a $104^{\circ} 27' 35''$ O; su clima es semiseco y semicálido con precipitación media de 719.9 mm, temperatura media anual de 23.5°C , y una

Most of the surface water contains acceptable amounts of boron (B), but the waters of the deep wells in some areas contain toxic amounts (Can-Chulim, 2011). This element enters the surface and underground water in two ways: the weathering of rocks that contain B (borosilicates of the types tourmaline and axinite) and waste water (Mancilla-Villa *et al.*, 2014). Boron is an essential element, but toxic for plants when it even slightly exceeds the optimal level; the established limits of tolerance to B apply to a variety of crops, thus intervals of toxicity are proposed for: 1) sensitive crops ($< 0.33 \text{ mg L}^{-1}$); 2) semi-tolerant crops ($< 0.67 \text{ mg L}^{-1}$); and 3) tolerant crops ($< 1.00 \text{ mg L}^{-1}$) (Mancilla-Villa *et al.*, 2014).

In the municipalities of Autlán de Navarro and Zacoalco de Torres, state of Jalisco, Mexico, there is high agricultural activity, and the principal crops are sugar cane (*Saccharum officinarum*), maize (*Zea mays*) and vegetables. This activity is very important for the economy of the two regions and municipalities studied. In addition to surface irrigation water, groundwater is used to irrigate the field crops. The objective of the present study was to determine the concentrations of the heavy metals: lead (Pb), cadmium (Cd), mercury (Hg), the metalloid arsenic (As) and boron (B) in the groundwater, as well as to define the risk of utilizing this water to irrigate agricultural fields.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The municipality of Zacoalco de Torres is in the southeast of the state of Jalisco, at $20^{\circ} 01' 30''$ to $20^{\circ} 21' 05''$ N and $103^{\circ} 41' 25''$ to $103^{\circ} 30' 30''$ W, at an average altitude of 1354 m; the climate is warm semiarid with mean annual precipitation of 828 mm and average annual temperature of 20.2°C (CEA, 2015) (Figure 1). The municipality of Autlán de Navarro is located in the southwest of the state, at $19^{\circ} 34' 30''$ to $19^{\circ} 53' 45''$ N, and $104^{\circ} 27' 35''$ W; its climate is semidry and semi-warm with mean rainfall of 719.9 mm, mean annual temperature of 23.5°C , and an average altitude of 920 m (CEA, 2015). The study zone was comprised of phaeozems, regosols and cambisols; although in a lesser proportion of vertisols, luvisols and lithosols. The origin of these soils is due to the presence of extrusive igneous rock, alluvial soils, rhyolite limestone rock, andesite and basalt, among others (CONAGUA, 2018).

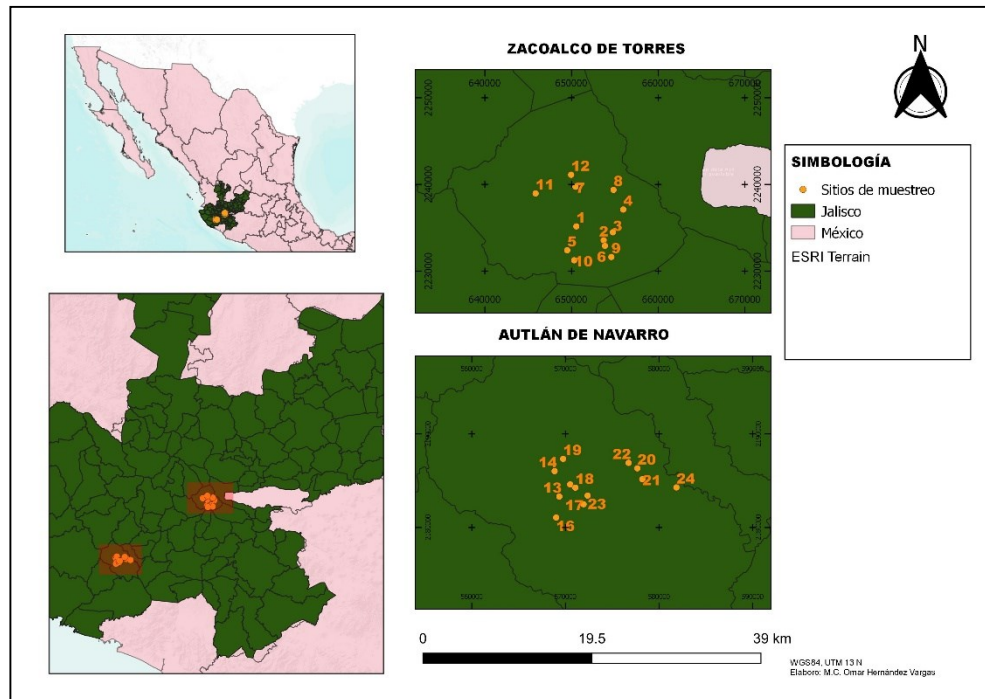


Figura 1. Ubicación geográfica de los sitios de muestreo en los municipios de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres.
Figure 1. Geographic location of sampling sites in the municipalities of Autlán de Navarro and Zacoalco de Torres.

altitud promedio de 920 m (CEA, 2015). La zona de estudio se conforma por suelos feozems, regosoles y cambisoles; aunque en menor proporción se presentan los vertisoles, luvisoles y litosoles. El origen de estos suelos se debe a la presencia de roca ígnea extrusiva, suelos aluviales, roca caliza riolita, andesita y basalto, entre otros (CONAGUA, 2018).

En el estudio se analizaron 24 pozos de agua, 12 en el municipio de Zacoalco de Torres y los demás se distribuyen en el municipio de Autlán de Navarro. Los pozos seleccionados en el municipio de Zacoalco de Torres están en un área en la cual se cultiva alfalfa (*Medicago sativa*), caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), aguacate (*Persea americana*), zarzamora (*Rubus fruticosus*), arándano (*Vaccinium myrtillus*), higo (*Ficus carica*) y limón (*Citrus limon*); en el municipio de Autlán de Navarro los pozos se distribuyen en su mayoría sobre el valle donde se desarrolla el cultivo de caña de azúcar, hortalizas y maíz.

Muestreo y análisis

Por temporada se seleccionaron 24 sitios, 12 en Zacoalco de Torres y 12 en Autlán de Navarro. Estos sitios se eligieron por ser pozos de agua subterránea destinada para riego agrícola, y la información de ellos se obtuvo de las capas de aprovechamientos subterráneos inscritos en el Registro Público de Derechos de

An analysis was made of 24 water wells, 12 in the municipality of Zacoalco de Torres, and the others were distributed in the municipality of Autlán de Navarro. The wells selected in the municipality of Zacoalco de Torres are in an area of cultivation of alfalfa (*Medicago sativa*), sugar cane (*Saccharum officinarum*), avocado (*Persea americana*), blackberry (*Rubus fruticosus*), bilberry (*Vaccinium myrtillus*), fig (*Ficus carica*) and lemon (*Citrus limón*); in the municipality of Autlán de Navarro, most of the wells are distributed over a valley where sugar cane, garden vegetables and maize are grown.

Sampling and analysis

Per season, 24 sites were selected, 12 in Zacoalco de Torres and 12 in Autlán de Navarro. These sites were chosen for being wells of groundwater destined for agricultural irrigation, and the information pertaining to them was obtained from the layers of underground deposits registered in the Registro Público de Derechos de Agua (Public Registry of Water Rights) (REPDA) and from the Sistema de Información Geográfica del Agua (Geographic Water Information System) (SIGA) obtained from CONAGUA (2015). All of the sites were geo-referenced by means of GPS Garmín MAP 60, which was also used to establish the approximate altitude of each site (Figure 1).

Agua (REPDA) y a través del Sistema de Información Geográfica del Agua (SIGA) obtenidos de CONAGUA (2015). Todos los sitios se georreferenciaron mediante un GPS Garmín MAP 60, el cual también se usó para establecer la altitud aproximada de cada sitio (Figura 1).

Dos muestreos de tipo probabilístico dirigido se realizaron; es decir, los sitios se seleccionaron por sus características funcionales (pozos de agua subterránea destinada para riego agrícola); de febrero a abril y de agosto a noviembre en 2017. Para recolectar las muestras se utilizaron frascos de polietileno de alta densidad y de 500 mL, cada muestra se recolectó por duplicado y se analizó por triplicado; a cada una se le agregó ácido nítrico concentrado (pH < 2), se colocaron en hieleras para su transporte (Mancilla-Villa *et al.*, 2017), y en cada envase se colocó una etiqueta con la fecha, nombre y localización del sitio. Después, en los laboratorios del Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR) de la Universidad de Guadalajara y en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, se determinó pH y conductividad eléctrica (Ortiz-Vega *et al.*, 2019), metales pesados, As y B (Mancilla-Villa *et al.*, 2012).

La determinación de los metales pesados Cd, Hg, Pb y el metaloide As se realizó con la técnica de espectrometría de emisión atómica con el ICP Perkin Elmer 5300 Óptima. Los límites de cuantificación para los metales fueron: Cd (5.0), Hg (0.024), Pb (8.0) y As (1.5) $\mu\text{g L}^{-1}$. Los valores de recuperación obtenidos en las muestras fortificadas en agua desionizada fueron: Cd 100.35%, Hg 106.15%, Pb 96.93% y As 109.1%, y están dentro del intervalo recomendado y cercanos a 100% (Mancilla-Villa *et al.*, 2011).

Para evaluar la calidad del agua subterránea, así como definir el riesgo de su utilización, se tomaron como referencia los criterios de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establecen los límites máximos permisibles para metales pesados contenidos en el agua para uso agrícola y urbano (Cuadro 1). El análisis estadístico se realizó con ANDEVA ($p \leq 0.05$) en el programa SPSS v. 25.0; así como la comparación de las medias de las variables analizadas con la prueba de Tukey entre las dos temporadas de muestreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ANDEVA mostró efecto significativo ($p \leq 0.05$) sólo en la variable pH (Cuadro 2) entre las variables fisicoquímicas y los metales determinados en las aguas subterráneas de los 24 sitios de muestreo.

Variables fisicoquímicas

En la Figura 2 se presentan los valores de conductividad eléctrica. El valor promedio de la C.E. en la

Two directed probabilistic samplings were made; that is, the sites were selected for their functional characteristics (groundwater wells destined for agricultural irrigation), from February to April and from August to November in 2017. To collect the samples, high density polyethylene jars of 500 mL were used, each sample was collected in duplicate and analyzed in triplicate; concentrated nitric acid (pH < 2) was added to each one. These were placed in coolers for their transport (Mancilla-Villa *et al.*, 2017), and each container was labelled with the date, name and location of the site. Later, in the laboratories of the Centro Universitario de la Costa Sur (CUCSUR) of the Universidad de Guadalajara and in the Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, pH and electric conductivity were determined (Ortiz-Vega *et al.*, 2019), along with heavy metals, As and B (Mancilla-Villa *et al.*, 2012).

The determination of the heavy metals Cd, Hg, Pb and the metalloid As was made with the technique of atomic emission spectrometry with the ICP Perkin Elmer 5300 Óptima. The limits of quantification for the metals were: Cd (5.0), Hg (0.024), Pb (8.0) and As (1.5) $\mu\text{g L}^{-1}$. The values of recovery obtained in the samples fortified in deionized water were: Cd 100.35%, Hg 106.15%, Pb 96.93% and As 109.1%, and are within the recommended interval and close to 100% (Mancilla-Villa *et al.*, 2011).

To evaluate the quality of the groundwater, and to define the risk of its use, the criteria of the NOM-001-SEMARNAR-1996 were taken as reference, which establish the maximum limits permissible for heavy metals contained in water for agricultural and urban use (Table 1). The statistical analysis was made with ANOVA ($p \leq 0.05$) in the program SPSS v. 25.0; the comparison of means of the variables was made with the Tukey test between the two sampling seasons.

RESULTS AND DISCUSSION

The ANOVA showed significant effect ($p \leq 0.05$) only in the variable pH (Table 2) between the

Cuadro 1. Límites máximos permisibles para metales pesados en agua para uso en riego agrícola.

Table 1. Maximum limits permissible for heavy metals in water for use in agricultural irrigation.

Metal (mg L^{-1})	Uso en riego agrícola		Aguas naturales
	Promedio	Diario	
As	0.2	0.4	0.05
Cd	0.2	0.4	0.01
Hg	0.01	0.02	0.002
Pb	0.5	1	0.0015

Mancilla-Villa *et al.*, 2012.

Cuadro 2. Análisis de varianza para las variables fisicoquímicas, metales pesados y boro determinados en las aguas subterráneas de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco.
Table 2. Analysis of variance for the physiochemical variables, heavy metals and boron determined in the groundwater of Autlán de Navarro and Zacoalco de Torres, Jalisco.

Parámetro	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p≤0.05
pH	16.38	1	6.09	27.27	0.02 [†]
C.E.	2653699.47	1	9775	0.17	0.68
As	0.27	1	0.004	0.71	0.40
Cd	0.10	1	0.002	1.04	0.31
Hg	0.11	1	0.002	0.65	0.42
Pb	0.25	1	0.001	0.16	0.68
B	0.11	1	0.001	0.01	1.0

[†]Diferencia significativa (Tukey, p≤0.05). ♦ [†]Significant difference (Tukey, p≤0.05).

estación seca fue 648 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y en la estación lluviosa 523 $\mu\text{S cm}^{-1}$ ($p > 0.05$). Estos valores no representan riesgo alguno para el uso del recurso hídrico para el riego agrícola en las regiones de estudio, porque los valores de restricción se establecen al superar los 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Can-Chulim *et al.*, 2014).

En la Figura 3 se presentan los valores de pH determinados en los sitios de muestreo; en la estación seca los valores promedio fueron 7.4 y en la estación lluviosa 8.1, y las diferencias fueron significativas ($p=0.02$) entre ambas temporadas de muestreo. Estos valores se consideran de alcalinidad media (7.4-8.5) y no representan restricción en el uso del agua en riego agrícola. Para usar el recurso hídrico en el riego se

physiochemical variables and the metals determined in the groundwater of the 24 sampling sites.

Physiochemical variables

Figure 2 shows the values of electric conductivity. The average value of the C.E. in the dry season was 648 $\mu\text{S cm}^{-1}$ and in the rainy season 523 $\mu\text{S cm}^{-1}$ ($p > 0.05$). These values do not represent any risk for the use of the hydric resource for agricultural irrigation in the regions of study, because the values of restriction are established at above 1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Can-Chulim *et al.*, 2014).

Figure 3 presents the values of pH determined in the sampling sites; in the dry season the average

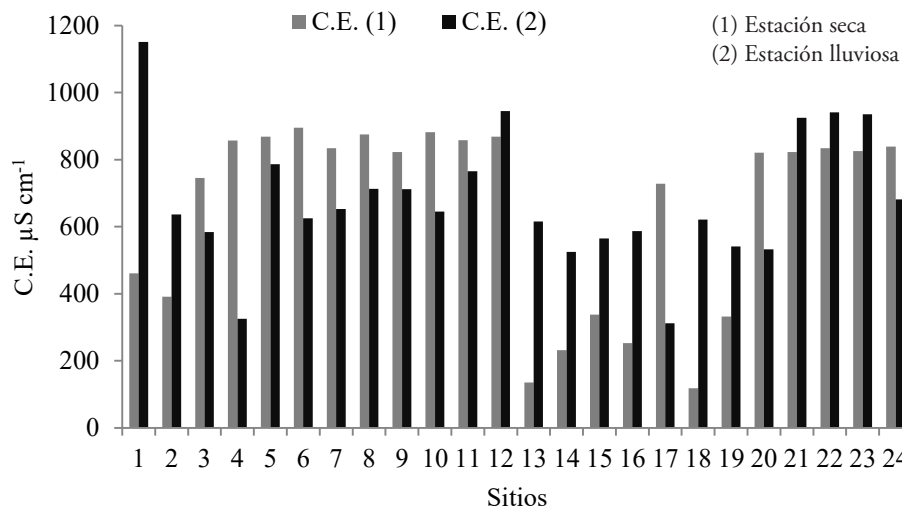


Figura 2. Valores de conductividad eléctrica por temporada de muestreo.
Figure 2. Values of electric conductivity by sampling season.

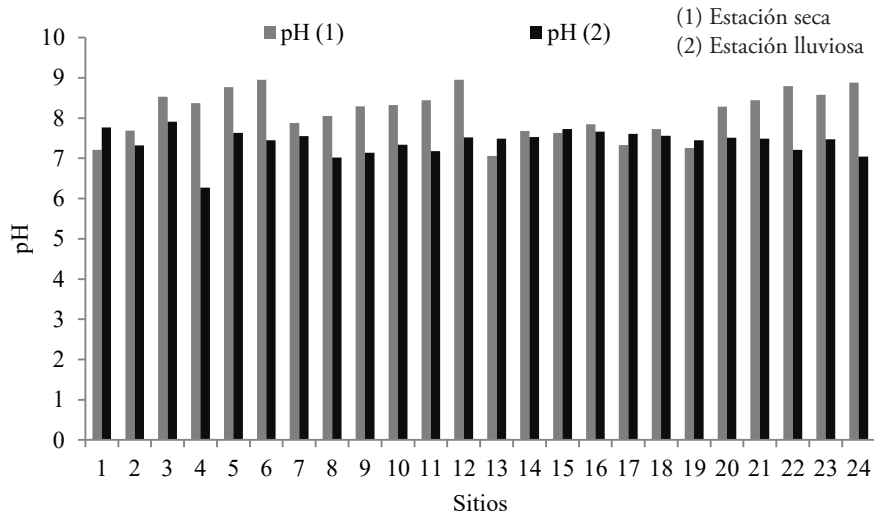


Figura 3. Valores de pH por temporada de muestreo.
Figure 3. Values of pH by sampling season.

recomiendan valores de 5.5 a 6.5, porque la mayoría de los iones estará disponible para la planta (Ortiz-Vega *et al.*, 2019).

El contenido de metales pesados en las temporadas evaluadas mostró fluctuaciones (Figura 4); el Cd

values were 7.4 and in the rainy season 8.1, and the differences were significant ($p=0.02$) between the two sampling seasons. These values are considered to be of medium alkalinity (7.4 - 8.5) and do not represent restriction in the use of agricultural irrigation water.

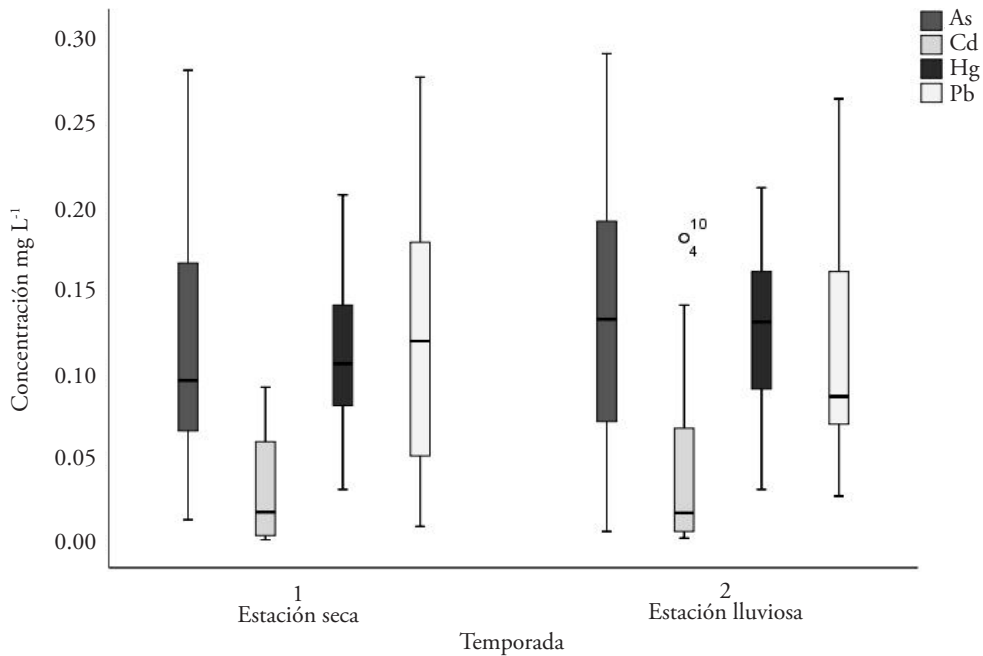


Figura 4. Diagrama de cajas (desviación estándar y cuartiles) de las concentraciones de metales pesados determinadas en las aguas subterráneas de Autlán de Navarro y Zacoalco de Torres, Jalisco.

Figure 4. Diagram of boxes (standard deviation and quartiles) of the concentrations of heavy metals determined in the groundwater of Autlán de Navarro and Zacoalco de Torres, Jalisco.

presentó los valores más bajos con un límite superior de 0.06 mg L⁻¹, en contraparte para el metaloide As los valores más altos tienen un límite superior de 0.14 mg L⁻¹. La secuencia de concentraciones de metales pesados de mayor a menor es la siguiente: As > Pb > Hg > y Cd.

Las concentraciones de As en ambas regiones de estudio variaron de 0.1 a 0.29 mg L⁻¹, sin diferencias significativas (p=0.40) entre temporadas de muestreo (Figura 5).

En el municipio de Zacoalco de Torres en la estación seca ninguna de las muestras superó el límite permisible para riego agrícola (0.2 mg L⁻¹), pero en la estación lluviosa el sitio dos rebasó el límite establecido. En el municipio de Autlán de Navarro en la estación seca, tres sitios de muestreo fueron mayores a los límites para riego agrícola.

For use of the hydric resource in irrigation, values of 5.5 to 6.5 are recommended, given that most of the ions will be available for the plant (Ortiz-Vega *et al.*, 2019).

The content of heavy metals in the seasons evaluated showed fluctuations (Figure 4); the Cd presented the lowest values with an upper limit of 0.06 mg L⁻¹, in counterpart for the metalloid As the highest values have an upper limit of 0.14 mg L⁻¹. The sequence of concentrations of heavy metals from higher to lower is as follows: As > Pb > Hg > and Cd.

The concentrations of As in both regions of study varied from 0.1 to 0.29 mg L⁻¹, without significant differences (p=0.40) between sampling seasons (Figure 5).

In the municipality of Zacoalco de Torres in the dry season, none of the samples surpassed the

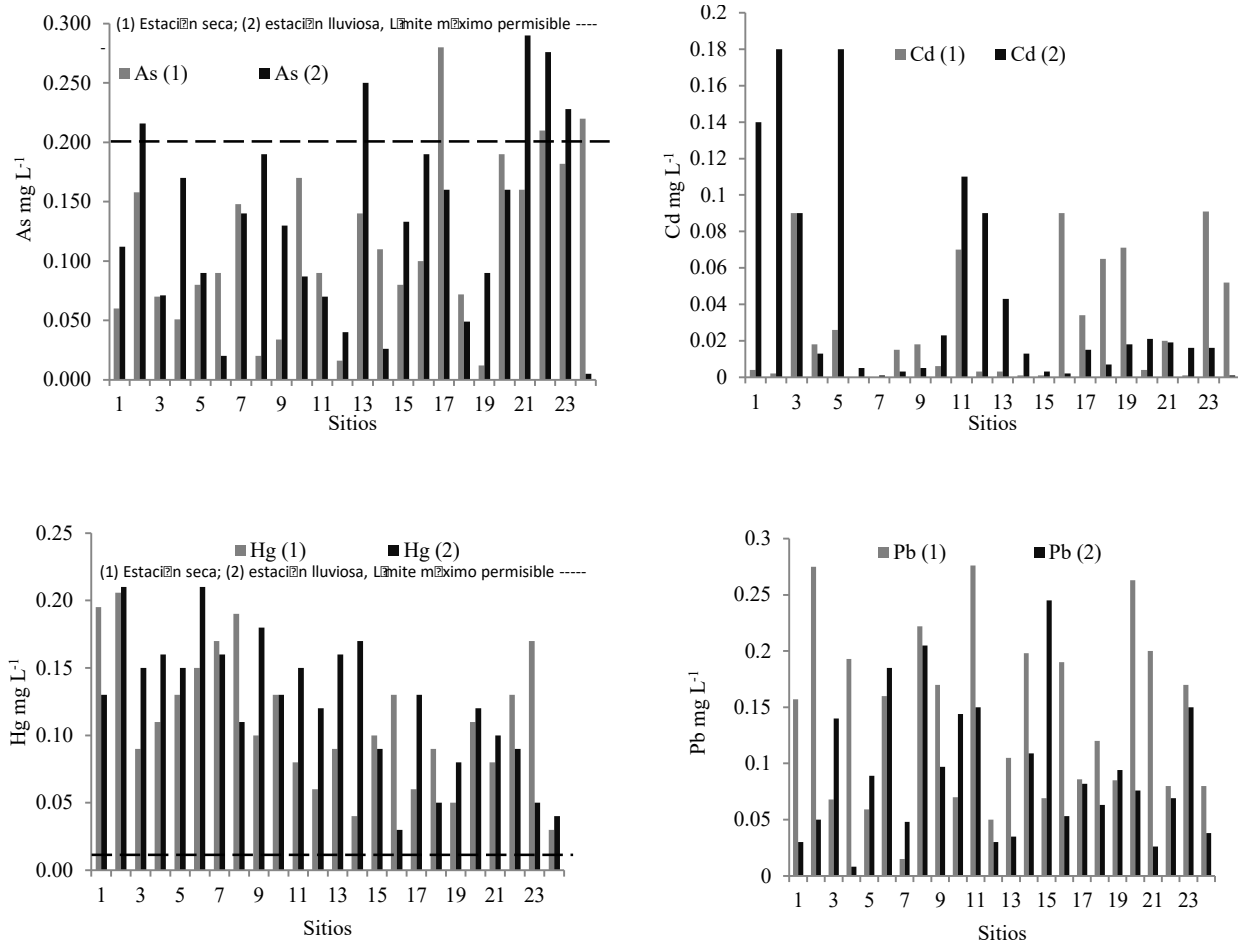


Figura 5. Concentración de metales pesados en las aguas subterráneas de los sitios muestreados.
 Figure 5. Concentration of heavy metals in the groundwater of the sampled sites.

La contaminación por As se debe de manera principal a actividades antropogénicas, es uno de los metales más distribuidos en la naturaleza y se encuentra como material de cobalto en el subsuelo y en la superficie combinado con azufre o metales, pero el principal mineral del As es el FeAsS (arsenopirita) y se usa en tratamiento de maderas y en productos agrícolas (pesticidas, herbicidas). Por lo tanto, es posible que las concentraciones y las variaciones encontradas correspondan de forma principal a la geología de las regiones de estudio y a la utilización de pesticidas y herbicidas en la agricultura (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

En un estudio realizado en aguas subterráneas de Córdoba-Argentina por Bécher y Blarasin (2014), se encontraron concentraciones de As en el agua similares a las del presente estudio. La provincia de Córdoba exhibe problemas asociados con el recurso hídrico, entre ellos, la agricultura intensiva y el uso de pesticidas; situación muy similar a la de nuestra zona de estudio.

Las concentraciones de Cd en las dos regiones de estudio variaron de 0.01 a 0.18 mg L⁻¹, sin diferencias significativas entre temporadas de muestreo ($p=0.31$); ninguna de las muestras superó el límite permisible (0.2 mg L⁻¹). En las plantas el Cd es un metal no nutritivo que interfiere en la entrada, transporte y uso de elementos esenciales; además, se encuentra de manera natural en los suelos agrícolas de los cultivos tropicales. Las razones son la composición natural de los suelos, enmiendas y abonos provenientes de fertilizantes fosforados. El cadmio se moviliza desde el perfil del suelo a la cadena trófica a través de los cultivos y puede afectar la salud humana (Quevedo y Meneses, 2014).

Las aguas subterráneas de los municipios presentan concentraciones relativamente bajas de Cd, en comparación con sitios asociados con afluentes de contaminación minera donde las concentraciones exceden 1 mg L⁻¹. Entonces, se infiere que la contaminación por Cd en las regiones de estudio procede de los fondos geológicos, el uso de pesticidas y herbicidas, la introducción de lixiviados de rellenos sanitarios urbanos y depósito atmosférico en los suelos agrícolas debido a quemas agrícolas e incendios forestales (Cartagena *et al.*, 2018).

En un estudio en aguas subterráneas en Argentina, Espósito *et al.* (2017) reportaron concentraciones de Cd de 0.001 a 0.006 mg L⁻¹, valores bajos comparados con los de nuestro estudio, y esos autores infieren

permissible limit for agricultural irrigation (0.2 mg L⁻¹), but in the rainy season site two exceeded the established limit. In the municipality of Atlán de Navarro in the dry season, three sampling sites were above the established limits for agricultural irrigation.

Contamination by As is principally due to anthropogenic activities. It is one of the most highly distributed metals in nature and is found as material of cobalt in the subsoil and on the surface combined with sulfur or metals, but the principal mineral of the As is the FeAsS (arsenopyrite), which is used in treatment of wood and agricultural products (pesticides, herbicides). Therefore, it is possible that the concentrations and variations found correspond principally to the geology of the regions of study and to the utilization of pesticides and herbicides in agriculture (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

In a study carried out in groundwaters of Córdoba-Argentina by Bécher and Blarasin (2014), concentrations of As were found in the water similar to those of the present study. The province of Córdoba exhibits problems associated with the hydric resource, among them, intensive agriculture and the use of pesticides; a situation very similar to that of our study zone.

The concentrations of Cd in both study regions fluctuated from 0.01 to 0.18 mg L⁻¹, with no significant differences between sampling seasons ($p=0.31$); none of the samples surpassed the permissible limit (0.2 mg L⁻¹). In plants, Cd is a non-nutritious metal that interferes in the access, transport and use of essential elements, and agricultural soils contain it naturally in the soils of the tropical crops. The reasons for this include the natural composition of the soils, amendments and fertilizers from phosphorated fertilizers. Cadmium mobilizes from the soil profile to the trophic chain through the crops and can affect human health (Quevedo and Meneses, 2014).

The groundwaters of the municipalities present relatively low concentrations of Cd, compared with sites associated with affluents of mining contamination where the concentrations exceed 1 mg L⁻¹. Therefore, it is inferred that the contamination by Cd in the regions of study proceed from the geological depths, the use of pesticides and herbicides, the introduction of lixiviates of urban waste landfills and atmospheric deposit in the agricultural soils due to agricultural burns and forest fires (Cartagena *et al.*, 2018).

In a study in groundwater in Argentina, Espósito *et al.* (2017) reported concentrations of Cd of

que tales concentraciones son de origen litológico y no derivados de alguna actividad antropogénica. En comparación con nuestra zona de estudio, los incendios forestales y las quemadas agrícolas, así como el lixiviado de rellenos sanitarios, se podrían inferir como fuentes posibles de contaminación.

Las concentraciones de Hg en ambas regiones de estudio fluctuaron de 0.03 a 0.21 mg L⁻¹ y no hubo diferencias significativas entre temporadas de muestreo ($p=0.42$), pero todas las muestras superaron el límite permisible (0.01 mg L⁻¹). El Hg se libera al ambiente como resultado de la ruptura de minerales de rocas y suelos a través de la exposición al viento y agua. Aunque gran parte del Hg se libera de manera natural, algunas actividades humanas como la aplicación de fertilizantes en la agricultura y los vertidos de aguas residuales son las responsables de su emisión hacia los suelos o el agua (Montilla-Bravo *et al.*, 2016).

Las concentraciones de Hg en cada área de estudio no se deben a la contaminación por actividades antropogénicas mineras, sino que se relacionan con la fluctuación en los valores de pH de las aguas subterráneas. En los sitios con valores de pH ácidos-neutros, las concentraciones de Hg aumentaron porque este metal se concentra y se moviliza en pH de 5 a 7. Otra causa es que 70% de las muestras se recolectaron en zonas agrícolas y se infiere que la presencia de mercurio se relaciona con el uso de fertilizantes y pesticidas (Díaz-Arriaga, 2014).

En un estudio realizado en Castellón, España, por López-Gutiérrez *et al.*, (2010), se determinó que la concentración máxima de Hg en aguas subterráneas fue 0.007 mg L⁻¹, la cual es baja en comparación con las de nuestro estudio. Esos autores señalaron que la presencia del Hg en las aguas subterráneas de Castellón no se asociaba del todo con la actividad antropogénica, sino con el origen geológico y la litología de la zona. En comparación con nuestra zona de estudio, hay fuentes posibles de contaminación como la extracción minera, el uso de pesticidas en la agricultura y la introducción de aguas residuales urbanas sin tratamiento a los cauces hídricos.

Mancilla-Villa *et al.* (2017) evaluaron el contenido de metales pesados en las aguas superficiales en la cuenca del río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería, Jalisco, y en 100% de las muestras las concentraciones (0.02 a 0.23 mg L⁻¹) fueron mayores a los límites permisibles para riego agrícola y uso urbano por la

0.001 to 0.006 mg L⁻¹, low values compared with those of our study, and these authors infer that these concentrations are of lithologic origin and not derived from any anthropogenic activity. In comparison with our zone of study, forest fires and agricultural burns, as well as leachates from waste landfills could be inferred as possible sources of contamination.

The concentrations of Hg in both study regions fluctuated from 0.03 to 0.21 mg L⁻¹, without significant differences between sampling seasons ($p=0.42$); none of the samples surpassed the permissible limit (0.01 mg L⁻¹). The Hg is released into the environment as a result of the rupture of minerals of rocks and soils through the exposure to wind and water. Although a large part of Hg is released naturally, some human activities such as the application of fertilizers in agriculture and waste water channels are responsible for its emission into soils or water (Montilla-Bravo *et al.*, 2016).

The concentrations of Hg in each area of study are not the result of contamination from anthropogenic mining activities, but rather, are related to the fluctuation in the values of pH of the groundwaters. In the sites with values of pH acid-neutral, the concentrations of Hg increased because this metal is concentrated and is mobilized in pH of 5 to 7. Another cause is that 70% of the samples were collected in agricultural zones and it is inferred that the presence of mercury is related to the use of fertilizers and pesticides (Díaz-Arriaga, 2014).

In a study conducted in Castellón, Spain, by López-Gutiérrez *et al.* (2010), the concentration of Hg was determined in groundwater and the maximum concentration was 0.007 mg L⁻¹, which is low compared with those of our study. These authors pointed out that the presence of Hg in the groundwater of Castellón was not totally associated with anthropogenic activity, but with geologic origin and the lithology of the zone. In comparison with our study zone, there are possible sources of contamination such as mining extraction, the use of pesticides in agriculture and the introduction of untreated urban waste water to the waterways.

Mancilla-Villa *et al.* (2017) evaluated the content of heavy metals in the surface waters in the basin of the river Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería, Jalisco, and in 100% of the samples the concentrations (0.02 to 0.23 mg L⁻¹) surpassed the permissible limits for agricultural irrigation and urban use outlined by

NOM-001-ECOL-1996. Esos valores coinciden con las concentraciones máximas y mínimas encontradas en las dos áreas de estudio.

Las concentraciones de Pb en ambas regiones de estudio variaron de 0.01 a 0.28 mg L⁻¹, sin diferencias significativas entre temporadas de muestreo ($p=0.68$). Ninguna muestra superó el límite permisible (0.5 mg L⁻¹). El Pb representa cerca de 0.002% de la corteza de la tierra y es el elemento más abundante entre los metales pesados. El contenido de Pb de las rocas ígneas varía de 8 mg kg⁻¹ a 20 mg kg⁻¹ y niveles similares se encuentran en rocas sedimentarias, desde 7 mg kg⁻¹ a 20 mg kg⁻¹ (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

En las plantas el Pb no es un elemento esencial para el crecimiento, pero está en los sistemas suelo-agua de las plantas, y permanece en los suelos ya sea por adsorción o formando complejos con componentes inorgánicos y orgánicos del suelo. El Pb tiende a acumularse cerca de la superficie del suelo proveniente de las aguas de riego. Los cultivos con raíces poco profundas están expuestos a concentraciones relativamente más altas que los cultivos con raíces más profundas y éstas tienden a reducir su crecimiento (Isaza-Guzmán, 2013).

En un estudio sobre la inhibición de germinación y crecimiento de plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y maíz (*Zea mays*) en el laboratorio de la Universidad del Valle Sede Pacífico, Isaza-Guzmán (2013) encontró que una concentración de 5 g L⁻¹ de Pb afecta el proceso de germinación en los cultivos, y es más visible en el frijol. Además, se redujo el porcentaje de germinación y crecimiento en ambas especies, en especial en los órganos de raíz, tallo y hoja; por lo tanto, se producen efectos negativos en el crecimiento de los cultivos.

Las concentraciones de B en ambas regiones de estudio varían de 0.01 a 0.07 mg L⁻¹ (Figura 6), sin diferencias significativas entre temporadas de muestreo ($p=1.0$). Las concentraciones de B en las aguas subterráneas fueron menores a 0.1 mg L⁻¹; por lo tanto, las aguas muestreadas no presentan restricción en su uso. Las aguas subterráneas son de excelente calidad (< 0.33 mg L⁻¹), y se pueden usar para cultivos sensibles como trigo (*Triticum aestivum*), cebolla (*Allium cepa*), limón (*Citrus limón*), naranjo (*Citrus sinensis*) y aguacate (*Persea americana*) (Mancilla-Villa *et al.*, 2014).

Mancilla-Villa *et al.* (2014) estudiaron las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz,

NOM-001-ECOL-1996. These values coincide with the maximum and minimum concentrations in the two study areas.

The concentrations of Pb in both regions fluctuated between 0.01 and 0.28 mg L⁻¹, with no significant differences between sampling seasons ($p=0.68$). None of the samples surpassed the permissible limit (0.5 mg L⁻¹). Pb represents close to 0.002% of the earth's crust and is the most abundant element among the heavy metals. The content of Pb of igneous rocks varies from 8 mg kg⁻¹ to 20 mg kg⁻¹ and similar levels can be found in sedimentary rocks, from 7 mg kg⁻¹ to 20 mg kg⁻¹ (Londoño-Franco *et al.*, 2016).

In plants, Pb is not an essential element for growth, but is in the soil-water systems of plants, remains in the soils, whether by absorption or forming complexes with inorganic and organic components of the soil. Lead tends to accumulate close to the surface of the soil from irrigation water. The crops with shallow roots are exposed to relatively higher concentrations than the crops with deeper roots and tend to reduce their growth (Isaza-Guzmán, 2013).

In a study about the inhibition of germination and growth of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) and maize (*Zea mays*) at the laboratory of the Universidad del Valle Sede Pacífico, Isaza-Guzmán (2013) found that with a concentration of 5 g L⁻¹ of Pb, the process of germination in crops is affected, and is more visible in bean. Furthermore, the percentage of germination and growth was reduced in both species, especially in the organs of root, stem and leaf; therefore, negative effects are produced in crop growth.

The concentrations of B in both regions of study vary from 0.01 to 0.07 mg L⁻¹ (Figure 6), with no significant differences between sampling seasons ($p=1.0$). The concentrations of B in the groundwaters were less than 0.1 mg L⁻¹; therefore, the waters sampled do not present restriction for their use. The groundwaters are of excellent quality (< 0.33 mg L⁻¹), and can be used for sensitive crops such as wheat (*Triticum aestivum*), onion (*Allium cepa*), lemon (*Citrus limón*), orange (*Citrus sinensis*) and avocado (*Persea americana*) (Mancilla-Villa *et al.*, 2014).

Mancilla-Villa *et al.* (2014) carried out a study in the surface waters of Tlaxcala, Puebla and Veracruz, and found concentrations of B of less than 1 mg L⁻¹, coinciding with our study. The low concentrations of B are attributed to the fact that in the region of study the waters are in contact with sedimentary

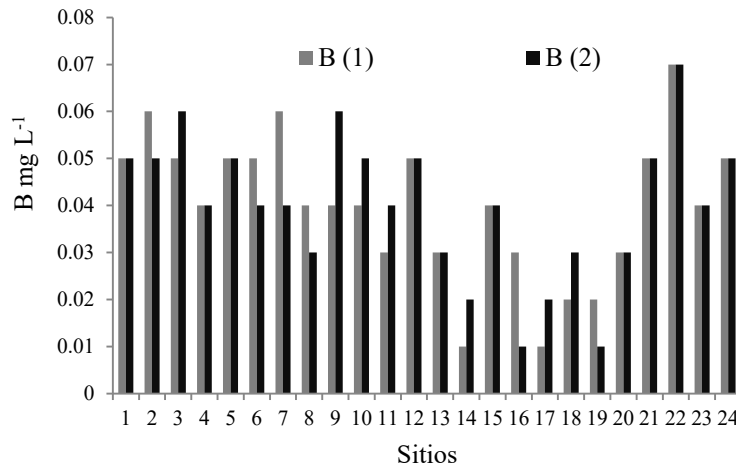


Figura 6. Concentración de boro (B) en las aguas subterráneas de los sitios muestreados.
Figure 6. Concentration of boron (B) in the groundwaters of the sampled sites.

y encontraron concentraciones de B menores a 1 mg L⁻¹, coincidente con nuestro estudio. Las concentraciones de B bajas se atribuyen a que en la región de estudio las aguas están en contacto con rocas sedimentarias, como calizas, lutitas, diatomitas, limonitas, yesos y lateritas. Además, se registraron niveles inferiores de C.E. a 1500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ lo cual indica una concentración menor de sales disueltas (Can-Chulim *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

Para los parámetros fisicoquímicos analizados pH y conductividad eléctrica, no se encontraron niveles que restrinjan el uso de las aguas subterráneas en el riego agrícola, pero se debe realizar un análisis de suelos para complementar la información y establecer de forma óptima los cultivos que se adecuen a estas condiciones.

En todas las muestras el mercurio superó los límites máximos establecidos por la NOM-001-ECOL-1996 para su uso en riego agrícola. En 16% de las muestras el arsénico superó los límites máximos, pero Cd y Pb no los superaron.

El uso de las aguas subterráneas para irrigar campos agrícolas en los municipios de Atlán de Navarro y Zacolaco de Torres, Jalisco, contamina los suelos agrícolas con mercurio y arsénico, lo que causaría efectos adversos en el desarrollo de las plantas y la introducción de los metales pesados a la cadena trófica, con los consecuentes daños a la salud humana.

rocks, such as limestone, lutite, diatomite, limonite, gypsums and laterites. In addition, levels of C.E. lower than 1500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ were registered, which indicates a lower concentration of dissolved salts (Can-Chulim *et al.*, 2011).

CONCLUSIONS

For the physiochemical parameters pH and electric conductivity analyzed, levels were not found that would restrict the use of the groundwaters in agricultural irrigation, but an analysis of soils should be made to complement the information and optimally establish the crops that are adjusted to these conditions.

In all of the samples, mercury surpassed the maximum limits established by the NOM-001-ECOL-1996 for use in agricultural irrigation. In 16% of the samples, arsenic surpassed the maximum limits, but Cd and Pb did not.

The use of groundwaters to irrigate agricultural fields in the municipalities of Atlán de Navarro and Zacolaco de Torres, Jalisco, contaminate the agricultural soils with mercury and arsenic, which would cause adverse effects in the development of plants, and the introduction of heavy metals to the trophic chain, with consequential damage to human health.

—End of the English version—

—*—

LITERATURA CITADA

- Bautista, F., E. Campuzano, C. Delgado, y A. Goguitchaichvili. 2017. Índices de adsorción de metales pesados en suelos urbanos: el caso de Morelia, Michoacán. *Bol. Soc. Geol. Mex.* 69: 433-445.
- Bécher, F., y M. Blarasin. 2014. Arsénico y Flúor en aguas subterráneas en la planicie sudoccidental de Córdoba. Un problema ambiental analizado desde la perspectiva hidrogeológica. *Rev. Est. Ambiem.* 2: 4-23.
- Can-Chulim, A., H. M. Ortega-Escobar, N. E. García-Calderón, A. L. Reyes-Ortigoza, V. A. González-Hernández, y D. Flores-Román. 2011. Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca oriental de México. *Terra Latinoam.* 29: 189-200.
- Can-Chulim, A., H. M. Ortega-Escobar, E. I. Sánchez-Bernal, y E. Cruz-Crespo. 2014. Calidad de agua para riego en la Sierra Norte de Puebla, México. *Tecnol. Cienc. del Agua* 5: 77-96.
- Cartagena, R., D. López, E. Orantes, B. Enríquez, E. Benítez, y M. Jandrez. 2018. Determinación de mercurio, cadmio, plomo y arsénico en ríos de la zona minera de la subcuenca del río Titihuapa, Cabañas, El Salvador. *Revista Minerva* 1: 12-15.
- CEA (Comisión Estatal del Agua). 2015. Ficha Técnica Hidrológica Municipal. Zacoalco de Torres. Secretaría de Gobierno del estado de Jalisco. pp: 3-25.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. Capas de información de los aprovechamientos subterráneos inscritos del Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) <http://siga.conagua.gob.mx/repda/menu/framekmz.htm> (Consulta: diciembre 2019).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Programa hídrico estatal 2014-2018 del estado de Jalisco. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-(SEMARNAT). Coyoacán, México, D. F. pp: 178.
- Covarrubias, S. A., y J. J. Peña. 2017. Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 33: 7-21.
- Díaz-Arriaga, F. 2014. Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Rev. Salud Pública* 16: 947-957.
- Espósito, M. E., M. C. Blanco, J. D. Paoloni, y N. Amiotti. 2017. Variabilidad espacio-temporal del par As-Cd en el recurso hídrico y zonas de riesgo en el tramo sudoccidental de la llanura pampeana, Argentina. *Geoacta* 42: 24-37.
- Isaza-Guzmán, G. 2013. Efecto del plomo sobre la imbibición, germinación y crecimiento de *Phaseolus vulgaris* L. y *Zea mays* L. *Rev. Biotec. Veg.* 13: 161-167.
- Londoño-Franco, L. F., P. T. Londoño-Muñoz, y F. G. Muñoz-García. 2016. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotec. Sect. Agrop. Agroindust.* 14: 145-153.
- López-Gutiérrez, J., O. García-Mendez, y B. J. Ballesteros-Navarro. 2010. El origen del mercurio presente en el acuífero costero de la plana de Castellón (este de España). *Bol. Geol. Min.* 121: 279-298.
- Mancilla-Villa, O. R., H. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, E. Uscanga, M. Ramos-Bello, y A. Reyes-Ortigoza. 2012. Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 28: 39-48.
- Mancilla-Villa, O. R., A. L. Bautista-Olivas, H. M. Ortega-Escobar, C. Ramírez-Ayala, A. L. Reyes-Ortigoza, y H. Flores-Magdaleno. 2014. Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnol. Cienc. Agua* 5: 97-109.
- Mancilla-Villa, O. R., B. E. Fregoso-Zamorano, E. J. Hueso-Guerrero, R. D. Guevara-Gutiérrez, C. Palomera-García, J. L. Olguín-López, H. M. Ortega-Escobar, E. K. Medina-Valdovinos, y H. Flores-Magdaleno. 2017. Concentración iónica y metales pesados en el agua de riego de la cuenca de río Ayuquila-Tuxcacuesco-Armería. *IDESIA* 35: 115-123.
- Montilla-Bravo, B., R. García, M. Colina, y J. Rangel. 2016. Evaluación de la contaminación por mercurio en aguas y sedimentos del Río Catatumbo utilizando icp-ms. *Rev. CLIC* 12: 35-44.
- Olivares, S., D. García, L. Lima, I. Saborit, A. Llizo, y P. Pérez. 2013. Niveles de cadmio, plomo, cobre y zinc en hortalizas cultivadas en una zona altamente urbanizada de la ciudad de La Habana, Cuba. *Rev. Int. Contam. Ambien.* 29 :285-294.
- Ortiz-Vega, M. I., Á. Can, C. A. Romero, E. Cruz, y A. Madueño. 2019. Calidad del agua para uso agrícola del río Mololoa, México. *Terra Latinoam.* 37: 185-195.
- Quevedo, J., y L. Meneses. 2014. Determinación de factores de enriquecimiento e índices de geoacumulación de plomo, cadmio y níquel en suelos agrícolas del sector San Alfonso en Machachi. *Info Analítica* 2: 41-55.
- Reyes, Y. C., I. Vergara, O. E. Torres, M. Diaz, y E. E. González. 2016. Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Rev. Ing. Invest. Desarrollo* 16: 66-77.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y los Recursos Naturales). 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Diario Oficial de la Federación. 23 de abril de 1995. Ciudad de México, México. 35 p.

