



CONTAMINACIÓN DEL AGUA Y SUELO EN EL ECOSISTEMA RÍO AGUA PRIETA, SONORA, MÉXICO

SOIL AND WATER POLLUTION IN AGUA PRIETA RIVER ECOSYSTEM FROM SONORA, MEXICO

Arturo Israel Villalba Atondo^{1*}, José María del Castillo Alarcón¹, Agustín Gómez Álvarez², Ana María Pérez Villalba¹, Gerardina Nubes Ortiz¹, Sol Villalba Urquidí³ y Aimé Salcido Esquer¹

¹Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. Universidad de Sonora. Blvd. Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma, Col. Centro. CP 83000, Hermosillo, Sonora, México | ²Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia. Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Av. Rosales s/n, Col. Centro. CP 83000, Hermosillo, Sonora, México | ³Licenciatura en Nutrición. Universidad de Sonora. Blvd. Colosio s/n, entre Sahuaripa y Reforma, Col. Centro. CP 83000, Hermosillo, Sonora, México.

RESUMEN

El estudio consistió en evaluar la contaminación en el Río Agua Prieta, Sonora, México, desde un punto previo a su unión con las descargas de las lagunas de oxidación de la ciudad de Agua Prieta, de la empresa Alstyle y de la Central Termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad, hasta los suelos de las parcelas forrajeras irrigadas con su agua, mismos que se encuentran aguas abajo de dichas descargas. Para tal efecto, se colectaron cinco muestras de agua y tres de suelo. Los parámetros estudiados fueron temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, arsénico, cadmio, cobre, hierro, manganeso, plomo, zinc, cromo, níquel, cianuro, demanda bioquímica de oxígeno y demanda química de oxígeno, los cuales se cuantificaron con base a metodologías recomendadas por instituciones y las normas oficiales mexicanas. Se observa que las aguas del Río Agua Prieta, proveniente de la ciudad están contaminando el ecosistema con sales minerales disueltas y níquel. La descarga de la empresa Alstyle contamina el medio por sales minerales y níquel. La descarga correspondiente a la Termoeléctrica contamina moderadamente el ambiente con sales, arsénico, cadmio y níquel. El agua de descarga de las lagunas de oxidación contamina el ecosistema con cadmio y níquel.

Palabras clave: *Río Agua Prieta, metales, contaminación, agua, suelo*

ABSTRACT

The water and soil pollution in Rio Agua Prieta, Sonora, Mexico, was evaluated from a point prior to its junction with the discharge from the oxidation pond in Agua Prieta city, from the company Alstyle and from the Federal Electricity Commission Central Thermoelectric, to the soils irrigated sustaining forage plots with water, which were located downstream of these discharges. For this purpose, eight samples were collected, five of water and three of soil. The analyzed parameters included temperature, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, arsenic, cadmium, copper, iron, manganese, lead, zinc, chromium, nickel, cyanide, biochemical oxygen demand and chemical oxygen demand,

which were quantified by means of methods proposed by the Mexican official laws. We found that Agua Prieta's water, discharged by the city is polluting the ecosystem with nickel and mineral salts. The discharge from the Alstyle Company is polluting with nickel and salts. The discharge from the Thermoelectric is moderately contaminating the environment with mineral salts, arsenic, cadmium and nickel. The discharge water from the oxidation ponds pollutes the ecosystem with cadmium and nickel.

Keywords: *Agua Prieta River, metals, pollution, water, soil*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las actividades mineras, industriales y urbanas han experimentado un desarrollo muy notorio, lo cual ha causado que, en numerosos casos, se afecte seriamente la calidad del agua y sedimento de algunos sistemas acuáticos, por ejemplo, ríos y lagos. Lo anterior se debe principalmente a la liberación de agua alterada de minas activas y abandonadas, e industria maquiladora, con altos niveles de metales pesados como cobre, hierro, manganeso y zinc (Elder, 1988).

El Río Agua Prieta, Sonora, es transfronterizo y se considera la principal fuente de abastecimiento de agua para las actividades industriales, agrícolas y ganaderas que se desarrollan a lo largo de su cauce en el Ejido Agua Prieta. Además de ser un deteriorado hábitat para las especies naturales e inducidas que prevalecen en la región, es un potencial componente importante de contaminación a los mantos freáticos, fuente única de abastecimiento para consumo humano en la Cd. de Agua Prieta.

En la región de Agua Prieta es importante la realización de estudios de calidad del agua en beneficio de su conservación ambiental. Existe la necesidad de intensificar y diversificar monitoreos ambientales en función de las fuentes de contaminación que prevalecen en la región. Particularmente la cuenca del Río Agua Prieta exige especial atención toda vez que su cauce proviene de Estados Unidos de América, cruzando las ciudades de Douglas, Arizona, y Agua Prieta, Sonora, con la consecuente influencia de potencial contaminación minera, industrial y urbana.

*Autor para correspondencia: Arturo Israel Villalba Atondo
Correo electrónico: villalba@guayacan.uson.mx

Recibido: 19 de septiembre de 2012
Aceptado: 3 de diciembre de 2012

De esta forma, a consecuencia de dichas actividades, los estudios deben considerar aspectos físico-químicos en el agua, sedimento y suelo agrícola en los cuales se involucren metales pesados que pueden ser nocivos para la salud humana, en los recursos faunísticos y florísticos de la región, y en las actividades productivas como la agricultura y ganadería.

Por lo anteriormente expuesto, la presente investigación tiene como objetivo realizar la evaluación de la calidad de agua y suelo agrícola del Río Agua Prieta, desde una ubicación previa a su unión con las descargas de las lagunas de oxidación, de la empresa Alstyle y de la Central Termoeléctrica, hasta las parcelas agrícolas forrajeras irrigadas con su agua y que se encuentran aguas abajo de dichas descargas. Para el logro de esta meta, el objetivo del trabajo fue estudiar la condición de calidad del cuerpo de agua (incluyendo el agua superficial y el suelo), afectada por las descargas de aguas residuales y aguas abajo de las lagunas de oxidación de la Cd. de Agua Prieta, Sonora, mediante el análisis de los parámetros pH, temperatura, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, arsénico, cadmio, cobre, cianuro, cromo total, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc.

Los objetivos particulares fueron: (a) estudiar la calidad del agua del Río Agua Prieta antes de mezclarse con las aguas de las lagunas de oxidación y las descargas de la empresa maquiladora Alstyle y de la Central Termoeléctrica, (b) determinar la calidad del agua residual de la maquiladora Alstyle antes de su descarga en las lagunas de oxidación, (c) determinar la calidad del agua residual de la Termoeléctrica antes de su descarga en el Río Agua Prieta, (d) determinar la calidad del agua negra de las lagunas de oxidación antes de descargar al Río Agua Prieta, (e) determinar la calidad del agua, pendiente abajo, de las descargas referidas en los objetivos particulares anteriores, agua con la cual son irrigadas las parcelas agrícolas del Ejido Agua Prieta, y (f) evaluar la carga de contaminación en los suelos de las parcelas del Ejido Agua Prieta, que son irrigadas con el agua del río del mismo nombre.

MATERIALES Y MÉTODOS

La estructura del trabajo gira en torno al diseño y realización de un muestreo de agua y suelo en ocho puntos estratégicos en los primeros kilómetros del Río Agua Prieta, desde una ubicación anterior a la primera descarga directa a las lagunas de oxidación correspondientes a la Cd. de Agua Prieta, Sonora, y en puntos de descargas de la empresa maquiladora Alstyle y de la Central Termoeléctrica (Figura 1).

Muestreo

Los procedimientos para la colecta de las muestras y los métodos de garantía de calidad que se describen en esta sección fueron obtenidos del Manual de Métodos de Análisis (CNA, 1995) y del Manual de Aseguramiento de Calidad (CNA, 1993). Ambos manuales fueron editados y publicados por la Comisión Nacional del Agua (CNA), México. Asimismo,

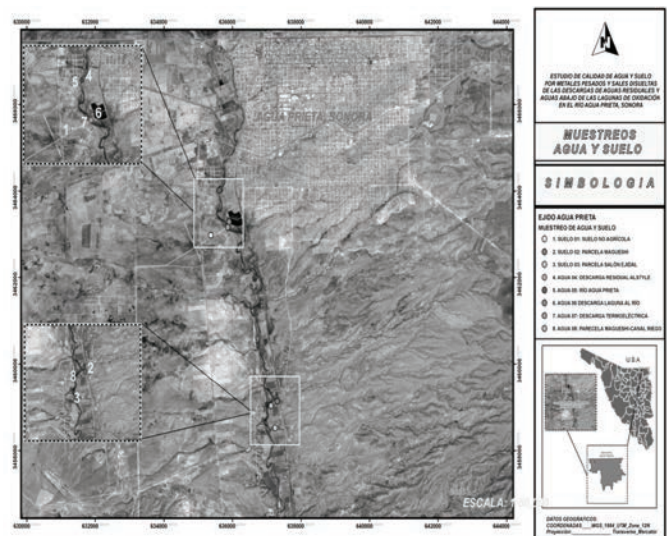


Figura 1. Localización del área de estudio y ubicación de los puntos de muestreo

Figure 1. Location of the study area and location of sampling points

se revisaron y tomaron en cuenta métodos del Manual de Campo para el Muestreo de la Calidad del Agua, editado por el Departamento de Calidad Ambiental de Arizona (ADEQ, Arizona Department of Environmental Quality) y por el Centro de Investigaciones de los Recursos Hidráulicos (WRRC) (Documento Técnico TM-94-3 de marzo de 1995).

Los siguientes grupos de parámetros fueron analizados en las muestras colectadas durante el desarrollo del presente estudio, los cuales se definieron en función de la naturaleza de la fuente de contaminación.

a) Análisis inorgánicos en el agua superficial: arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, hierro, manganeso, níquel, plomo, zinc.

b) Parámetros de campo: temperatura (°C), potencial de hidrogeno pH, conductividad eléctrica (C.E.) y oxígeno disuelto (OD).

c) Análisis inorgánico en suelo: arsénico, cadmio, cianuro, cobre, cromo, hierro, manganeso, níquel, plomo, zinc, conductividad eléctrica (C.E.) y sólidos disueltos totales (SDT).

d) Análisis de metales: método de Espectroscopía de Absorción Atómica por Flama (Marca Perkin-Elmer, Modelo 3110). Para el caso particular del arsénico en agua se empleó la técnica de generador de hidruros.

e) Oxígeno disuelto: Oxímetro YSI Modelo 52CE.

f) Potencial hidrógeno: pH metro Hatch Modelo EC10.

g) Para la medición de la temperatura del agua se utilizó un termómetro de bulbo 0-110 °C.

h) Para la medición de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO) y cianuro (CN), se utilizaron los métodos 8043-Hach, 8000-Hach y 8027-Hach, respectivamente.

i) Para la cuantificación de la conductividad eléctrica se utilizó un conductímetro Myron, L Company, Modelo DC H4.

j) Para la ubicación geográfica de los puntos de mues-

treo se utilizó un GPS Garmin Etrex Vista H Datum WGS84.

Evaluación de la Calidad del Agua y Suelo

Para evaluar la calidad del agua superficial del Río Agua Prieta se utilizaron los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CCA-001/89), publicados en el Diario Oficial de la Federación el 2 de Diciembre de 1989 (S.E.D.U.E., 1989), donde se establecen los criterios que los cuerpos de agua deben cubrir para ser aptos y ser utilizados como fuente de abastecimiento de agua potable, en actividades recreativas con contacto primario, para riego agrícola, para uso pecuario, en la acuicultura, o para la protección de la vida acuática.

Por otro lado, dado que el estudio incluye descargas de aguas residuales dependientes de industrias maquiladoras y una termoeléctrica, hacia un cuerpo de agua natural (Río Agua Prieta), también se aplicó la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Para la evaluación de la contaminación de suelos por salinidad se utilizó como referencia la norma NOM-021-REC-NAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad y clasificación de suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Temperatura

Se ha documentado ampliamente que la temperatura es el parámetro ambiental más importante de todos los factores climáticos, ya que una modificación de la misma trae como consecuencia la alteración de los procesos físicos, químicos, y la actividad biológica en diversos sistemas acuáticos (Branco-Murgel, 1984). Particularmente, la temperatura del agua en los puntos de muestreo osciló de 16 a 20 °C, varia-

ción que puede obedecer al horario de la toma de muestra, el cual se realizó de 8:00 am a 1:00 pm (Tabla 1).

Potencial Hidrógeno (pH)

La NOM-001-SEMARNAT-1996, establece un intervalo de 5,0 a 10,0 como valor permisible en aguas residuales. En los resultados encontrados, el pH cumple con lo establecido en dicha norma; sin embargo, se observa que en todos los casos el pH es de condición alcalina, principalmente en el punto de muestreo 4, referente a la descarga de aguas residuales de la empresa maquiladora Alstyle. En cualquiera de los casos, el pH mostró valores más cercanos a 10 que a 5, lo cual representa un foco de atención.

En el estudio realizado por Villalba y Gómez (2011) el pH en el agua del río después de las descargas varió de 7,38 a 7,82, lo cual las ubica en aguas prácticamente neutras.

Por su parte, las muestras de suelo 1, 2 y 3 mostraron valores de 8,08, 8,10 y 8,82, los cuales según la NOM-021-REC-NAT-2000, los clasifican como suelos medianamente alcalinos (Tabla 2).

Tabla 2. pH, conductividad eléctrica y cianuro determinado en el suelo en el Ejido Agua Prieta, Sonora

Table 2. pH, electrical conductivity and cyanide determined in soil, Ejido Agua Prieta, Sonora

Muestra	pH	C.E. mS/cm	Cianuro
1	8,08	0,70	<0,002
2A	8,10	7,29	<0,002
2B	8,07	7,26	----
3	8,82	7,33	<0,002

2A, 2B: muestras duplicadas

Tabla 1. Parámetros físico químicos determinados en el agua residual, Ejido Agua Prieta, Sonora

Table 1. Physical-chemical parameters determined in brackish water, Ejido Agua Prieta, Sonora

Muestra	Temperatura °C	C.E. mS/cm	pH	O.D. (mg/L)	DBO ₅ mg/L	DQO mg/L	Cianuro mg/L
4A	38	17,50	9,93	7,2	343	420	<0,002
4B	38	17,25			328	466	<0,002
5	16	2,12	8,10	2,1	288	318	<0,002
6	18	3,79	8,23	0,6	290	312	<0,002
7	20	9,69	8,49	1,5	270	290	<0,002
8	18	4,25	8,83	1,8	188	210	<0,002
NOM	N.C	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	200	3,0
CE	N.C	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C	0,02

N.C. = No contemplado

NOM-001-SEMARNAT-1996 (agrícola)

CE-CCA-001/89 (agrícola)

4A, 4B: muestras duplicadas

El Potencial de Hidrógeno (pH) es un factor importante en los sistemas biológicos y químicos de las aguas naturales. El grado de disociación de ácidos y bases débiles es afectado por cambios en el pH. El efecto es importante debido a que la toxicidad de algunos compuestos es afectada por el grado de disociación; por ejemplo, la disponibilidad y toxicidad de los metales pesados (Lobban *et al.*, 1985; Gómez *et al.*, 2011).

Oxígeno Disuelto

El oxígeno disuelto no está contemplado en la NOM-001-SEMARNAT-1996. Los valores encontrados son normales en aguas residuales (comparativamente con aguas residuales de similares características), principalmente el valor 0,6 mg/L, determinado en el punto 6 correspondiente a la descarga de la laguna de oxidación, se considera como un valor bajo. Los puntos 5 (Río Agua Prieta), punto 7 (descarga residual de la Termoeléctrica) y el punto 8 (canal de riego a parcelas agrícolas), se interpretan también como valores bajos, en el intervalo de 1,5 a 2,1 mg/L. Particularmente el punto 4 (descarga residual Alstyle) mostró un alto contenido de oxígeno disuelto (7,2 mg/L), debido a que se refiere a una alcantarilla donde la muestra se colectó de un flujo de agua con alta velocidad y con caída libre de aproximadamente 2 m.

La solubilidad del oxígeno es un factor de suma importancia debido a que la oxidación biológica aumenta con la temperatura y por consiguiente se incrementa la demanda de oxígeno. La contaminación del agua a través de la descarga de desechos orgánicos producidos por las actividades domésticas e industriales, pueden reducir el contenido de oxígeno disuelto de los cuerpos de agua (Branco-Murgel, 1984).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO₅)

El valor mayor corresponde a la muestra 4 (descarga de la empresa Alstyle) con 343 mg/L. Las siguientes cuatro muestras mostraron una tendencia gradual de disminución, con valores de 288, 290, 270 y 188 para los puntos 5, 6, 7 y 8, respectivamente. En cualquiera de los casos se supera el valor máximo permitido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, la cual establece un intervalo de 75 a 150 mg/L.

Cuando la DQO₅ sobrepasa los límites de la NOM-001-SEMARNAT 1996, como en el presente estudio, significa que el sistema acuático requiere un proceso de tratamiento antes de que sea descargado al suelo o a aguas no contaminadas (Branco-Murgel, 1984).

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La NOM-001-SEMARNAT-1996, no indica valores permisibles para DQO, sin embargo se encontró que el punto 4 (descarga de Alstyle) es la muestra de agua que demanda más oxígeno desde el punto de vista químico, con 466 mg/L, lo cual puede deberse a la carga de contaminantes químicos determinados en esta agua. Dicho valor tiende a disminuir en los demás puntos de muestreo considerados con 318, 312, 290 y 210 mg/L para los puntos 5, 6, 7 y 8, respectivamente.

Conductividad Eléctrica (CE)

Las normas utilizadas en el presente estudio no contemplan valores máximos permisibles para este parámetro en agua, sin embargo, a partir de la CE se calculan los sólidos disueltos totales (SDT), que es la cantidad de sales minerales en mg/L que existe en el agua. Los valores encontrados de sales y su correspondiente clasificación se observan en la Tabla 3. Se encontró que el punto de muestreo 4, correspondiente a la descarga de la empresa Alstyle, es donde se descarga una mayor cantidad de sales al medio, con 11200 mg/L, clasificándose como altamente salina. Le sigue en importancia la descarga del punto 7 (Central Termoeléctrica) con 6201,6 mg/L de sales, clasificándose como moderadamente salina. El resto de los puntos de muestreo se ubican en la clasificación de ligeramente salina. Cabe destacar que el agua del Río Agua Prieta, antes de mezclarse con las descargas de las empresas y las lagunas de oxidación contiene 1356,8 mg/L de sales, en tanto que la descarga de las lagunas de oxidación y las aguas en el canal de riego alcanzan valores de 2425,6 y 2720,0 mg/L, respectivamente (Tabla 3). El problema ya se torna en un foco serio de atención, toda vez que dichos niveles de sales son fácilmente acumulables en el suelo, ocasionando deterioro en el mismo, generando dificultades para el cultivo de especies forrajeras y hortalizas (Solís *et al.* 2011). Por otro lado, los mamíferos mayores como el ganado vacuno deben consumir agua dulce, la cual debe poseer menos de 1000 mg/L, valor que no se obtuvo en ninguna de las muestras de agua, incluso en la 5, correspondiente al agua del Río Agua Prieta, antes de mezclarse con las descargas de las industrias Alstyle y Central Termoeléctrica, y con las lagunas de oxidación.

Tabla 3. Conductividad eléctrica, Sólidos disueltos totales y clasificación por sales de las muestras de agua

Table 3. Electrical conductivity, total dissolved solids and salts classification for water samples

Punto	CE mS/cm	SDT mg/L	Clasificación (UNESCO, 1981)
4A	17,50	11200	Altamente salada (10000<SDT<35000)
4B	17,25	11040	Altamente salada (10000<SDT<35000)
5	2,12	1356,8	Levemente salada (1000<SDT<3000)
6	3,79	2425,6	Levemente salada (1000<SDT<3000)
7	9,85	6201,6	Moderadamente salada (3000<SDT<10000)
8	4,25	2720,0	Levemente salda (1000<SDT<3000)

4A, 4B: muestras duplicadas

En estudios realizados por Villalba y Gómez (2011), los sólidos disueltos totales (sales) en el Río Agua Prieta, antes y después de la descarga de las lagunas de oxidación obtuvieron valores máximos de 1615 y 1047 mg/L, respectivamente. Dicha determinación se realizó antes de la presencia de las empresas Alstyle y de la Termoeléctrica, por lo que se infiere que las mismas han incrementado la presencia de sales en el Río Agua Prieta a aproximadamente tres veces más de lo que ocurría en el año 2000.

En el suelo se reportan valores de salinidad de alto riesgo y son los que están causando signos de deterioro en las parcelas de cultivo del Ejido Agua Prieta. El punto 1, muestra de sitio de referencia de un suelo no contaminado por no estar en contacto con las aguas de riego, registró 0,7 dS/m lo cual le confiere una condición de Efectos No Significativos de Salinidad según la NOM-021-RECNAT-2000. Lo anterior no ocurrió en los puntos de muestreo 2 y 3 que corresponden a las parcelas Magueshi y Salón Ejidal, respectivamente. En estos puntos se obtuvieron valores de 7,29 dS/m para el punto 2 y 7,33 dS/m para el punto 3. Dichos valores corresponden a suelos con una condición de Suelo Salino según la norma referida (Tabla 4), lo cual representa el cuarto nivel de riesgo en una escala de 1 a 7 según la norma correspondiente. Lo anterior es ocasionado por la cantidad de sales disueltas en el agua del Río después de las descargas de las empresas y de las aguas negras de las lagunas de oxidación. Es también la causa por la cual los cultivos forrajeros producen bajo rendimiento en estas parcelas.

Tabla 4. Conductividad eléctrica, Sólidos disueltos totales en el extracto de saturación y clasificación por sales de las muestras de suelo

Table 4. Electrical conductivity, total dissolved solids in the extract saturation and saline classification of soil samples

Punto	CE dS/m	SDT ppm	Clasificación (NOM-021-RECNAT-2000)
1	0,70	448	Efectos despreciables de salinidad (CE<1.0)
2	7,29	4665	Suelo salino (4.1<CE<8.0)
3	7,33	4691	Suelo salino (4.1<CE<8.0)

Arsénico

Se encuentra presente en todas las muestras de agua estudiadas, con valores desde 0,02 mg/L en la muestra 5 (agua del Río Agua Prieta antes de mezclarse con las industrias) hasta 0,18 mg/L en el punto 7, correspondiente a la descarga de la Termoeléctrica, siendo el único punto que supera el límite máximo permisible para agua de uso agrícola, según la norma CE-CCA-001/89. Otro punto crítico que estuvo cerca de alcanzar el límite permisible por la norma citada para uso agrícola es el 4 (descarga Alstyle) con 0,09 mg/L (Tabla

5). En el suelo de la zona en estudio existe presencia en los tres puntos estudiados, con un intervalo de 13,74 ppm en la muestra 3, hasta 15,57 ppm en la muestra 2A (Tabla 6).

Diferentes estudios señalan que una exposición a largo plazo de arsénico causa lesiones características en la piel, principalmente en el tronco y extremidades, o la aparición de manchas de pigmentación en la piel, así como cáncer de piel, vejiga o riñón. Así también, las altas exposiciones de arsénico inorgánico puede causar infertilidad y abortos en mujeres, pérdida de la resistencia a infecciones, perturbación en el corazón y daño del cerebro, tanto de hombres como mujeres (Aragón-Sanz et al. 2001).

Cadmio

Este elemento se encuentra prácticamente ausente en el agua del Ejido Agua Prieta. Sus registros marcan no disponible (ND), excepto en las muestras 6, 7 y 8, que alcanzaron valores de 0,02, 0,08 y 0,02 mg/L, los cuales se encuentran dentro de los límites, aunque se observó un valor superior a la norma CE-CCA-001/89 (uso agrícola y pecuario) (muestra 7), que establece un valor máximo permisible de 0.01 mg/L (uso agrícola) y 0,02 mg/L (uso pecuario). Por su parte, la NOM-001-SEMARNAT-1996 indica un valor de 0.4 ppm, para uso agrícola (Tabla 5). Los valores determinados son ligeramente mayores a lo reportado por Villalba y Gómez (2011). A su vez, en el suelo los valores de las muestras 1, 2 y 3 mostraron valores de 9,9, 3,9 y 1,9 ppm, respectivamente (Tabla 6).

El cadmio es un elemento no esencial altamente tóxico el cual se acumula en los riñones de los mamíferos y puede causar disfunción de dichos órganos. En humanos, se ha diagnosticado daño a los riñones por la presencia de proteínas microglobulinas, que es el principal efecto tóxico resultado de la ingestión o exposición crónica a este metal (Alloway y Ayres, 1993).

Cianuro

El registro de cianuro en las muestras estudiadas es muy bajo. El valor en todos los puntos contemplados, tanto en agua como en suelo, fue menor a 0,002 mg/L. Cabe mencionar que la NOM-001-SEMARNAT-1996, contempla para el agua un valor máximo permisible de 3,0 mg/L, para este parámetro (Tablas 1 y 2).

El cianuro es un compuesto químico altamente tóxico que en valores peligrosos afecta severamente a los organismos menores y mayores que dependen del medio acuático. En la condición de cianuro de hidrógeno líquido o gaseoso y asimismo en forma de sales alcalinas de cianuro, puede ingresar al cuerpo por inhalación, ingestión o absorción a través de los ojos y la piel. La exposición a niveles altos de cianuro durante un período breve causa daño al cerebro y al corazón y puede producir coma y la muerte. Las personas que han respirado niveles bajos de cianuro durante varios años pueden tener dificultad para respirar, dolores del pecho, vómitos, alteraciones en la sangre, dolores de cabeza y dilatación de la glándula tiroides (WHO, 1984).

Tabla 5. Valores de metales (mg/L) analizados en aguas residuales de Ejido Agua Prieta, Sonora**Table 5.** Metal values (mg/L) analyzed in wastewater Ejido Agua Prieta, Sonora

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
4A	0,08	N.D.	N.D.	0,08	0,40	N.D.	1,0	N.D.	0,08
4B	0,09	N.D.	N.D.	0,08	0,40	N.D.	1,16	N.D.	0,08
5	0,02	N.D.	N.D.	N.D.	0,22	N.D.	0,20	N.D.	N.D.
6	0,03	0,02	N.D.	0,02	0,10	N.D.	0,32	N.D.	0,02
7	0,18	0,08	N.D.	0,06	6,2	N.D.	0,74	0,1898	0,82
8	0,04	0,02	N.D.	0,02	0,62	N.D.	0,40	N.D.	0,06
BV	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
BC	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
CE (agrícola)	0,1	0,01	1,0	0,2	5,0	N.C.	0,2	5,0	2,0
CE (pecuario)	0,2	0,02	1,0	0,5	N.C.	N.C.	1,0	0,1	50
NOM (agrícola)	0,4	0,4	1,0	6,0	N.C.	N.C.	4,0	1,0	20

N.D. = No Disponible; N.C. = No Contemplado

CE-CCA-001/89 (agrícola)

CE-CCA-001/89 (Pecuario)

NOM-001-SEMARNAT-1996 (agrícola)

BV: Blanco de viaje

BC: Blanco de campo

Cobre (Cu)

En el agua el contenido de Cu fue prácticamente despreciable, con valores de 0,02 a 0,08 mg/L; al respecto, la norma CE-CCA-001/89 contempla un valor máximo permisible de 0,2 mg/L para riego agrícola y 0,5 para uso pecuario. A su vez, la NOM-001-SEMARNAT-1996 establece un valor de 6,0 mg/L, para uso agrícola. El dato de 0,08 mg/L fue ligeramente mayor a lo reportado por Villalba y Gómez (2011), para este elemento.

En suelo los valores oscilaron de 27,9 a 203 mg/L, cuyo máximo corresponde a la muestra 1, que se trata del suelo de referencia o suelo 'blanco' (no afectado por métodos de producción) (Tabla 6).

La ingestión de dosis excesivamente altas en el hombre puede conducir a irritación y afectación severa, daño hepático y renal, e irritación del sistema nervioso central seguido por depresión (WHO, 1984).

Cromo (Cr)

Este elemento químico no se encontró disponible (ND) en el total de las muestras de agua estudiadas. No así para el suelo, donde se encontraron valores de 9,9 15,9 y 13,9 para las muestras 1, 2 y 3, respectivamente. Actualmente no existe contaminación acumulada, al compararse los datos determinados con los valores reportados por Villalba y Gómez (2011), para este elemento.

Moore y Ramamoorthy (1984); Ochoa et al. (2009), describieron que las principales emisiones de Cr hacia las

aguas superficiales provienen de los procesos de acabado de los metales. Por otra parte, Connell y Miller (1984), reportaron que las aguas de desechos municipales y domésticas contribuyen con cantidades significativas de cromo hacia el medio ambiente acuático.

La importancia del Cr radica en que es uno de los metales menos tóxicos, al respecto, los mamíferos lo toleran en concentraciones relativamente altas en sus cuerpos.

Hierro (Fe)

Los contenidos de Fe en el agua variaron de 0,1 a 6,2 mg/L, correspondiendo el valor mayor de 6,2 a la muestra 7, ubicada en la descarga de la Termoeléctrica, la cual supera la NOM-001-SEMARNAT-1996, para uso agrícola, misma que indica como referencia máxima permisible un valor de 5,0 mg/L. Según Villalba y Gómez (2011), el agua del Río Agua Prieta obtuvo en el momento de su estudio un valor máximo de 12,7 mg/L. En el suelo, el valor de este parámetro osciló de 5795 a 8896 mg/L.

La importancia del hierro radica en que es un elemento esencial en la nutrición humana. Sin embargo, la ingestión de hierro en grandes cantidades resulta en una condición denominada como hemacromatosis, donde los mecanismos normales de regulación no operan eficientemente y causa un daño a los tejidos debido a la acumulación de hierro (WHO, 1984).

Manganeso (Mn)

El Mn no se encontró disponible en la totalidad de las muestras de agua; no así en las muestras de suelo que registraron un contenido de 69,9 a 357,8 ppm. En relación al agua, en el estudio del año 2000 (Villalba y Gómez, 2011) se reportaron valores máximos de 0,56 mg/L para el río en estudio. El Mn se considera un elemento esencial para el hombre

Tabla 6. Valores de metales (ppm) determinados en suelos, Ejido Agua Prieta, Sonora**Table 6.** Values of metals (ppm) in soils, Ejido Agua Prieta, Sonora

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
1	15,05	9,99	9,99	203,96	5798,84	155,97	77,98	100,6	73,98
2A	15,57	3,99	15,99	27,99	8896,44	357,86	51,98	18,97	41,98
2B	15,25	3,99	15,99	27,98	8195,08	357,78	73,95	18,99	39,97
3	13,74	1,99	13,99	25,98	5795,36	69,94	43,96	18,98	23,98

2A, 2B: muestras duplicadas

y los animales. En concentraciones mayores de 0,15 mg/L, el Mn le imparte un sabor indeseable al agua y a las bebidas preparadas con la misma. La carencia de manganeso en el organismo puede generar lento crecimiento de uñas y cabellos, despigmentación del pelo, mala formación de huesos y puede disminuir la tolerancia a la glucosa o capacidad de eliminar excesos de azúcar en sangre (WHO, 1984).

Níquel (Ni)

Para este elemento se determinaron valores en agua desde 0,2 hasta 1,16 mg/L, este último en el punto de muestreo de la descarga de la empresa Alstyle; superando los valores máximos permisibles de la norma CE-CCA-001/89 para uso agrícola y pecuario (Tabla 5). Este elemento también supera el valor establecido en dicha norma para las aguas normales del Río Agua Prieta, en los puntos de descarga de las lagunas de oxidación, descarga de la Termoeléctrica y en las aguas de riego de las parcelas del Ejido Agua Prieta, en lo que se refiere para su uso en agricultura. El valor medido de 1,16 mg/L es muy superior al encontrado por Villalba y Gómez (2011). En el suelo, se determinaron valores desde 43,96 hasta 77,98 mg/L. No existe valor de referencia para este elemento en suelo en las normas consideradas. Moore y Ramamoorthy (1984) reportaron que la principal fuente de Ni que se descarga a cuerpos de agua proviene de emisiones antropogénicas, incluyendo las aguas residuales (aguas negras sin tratar), fertilizantes, etc. Lo anterior significa que las aguas residuales (domésticas e industriales) que provienen de la Ciudad de Agua Prieta y las industrias, que son descargadas sin tratar en el Río Agua Prieta, pueden ser una fuente potencial de Ni.

Plomo (Pb)

En todas las muestras de agua no se encontró Pb disponible, excepto en el punto 7 (descarga de la Termoeléctrica), donde se determinó un valor de 0,18 mg/L, sin que éste supere el valor permisible en las normas de referencia. Este valor es muy similar a lo encontrado por Villalba y Gómez (2011), en este mismo sistema de agua. En suelo, los valores medidos oscilaron de 18,9 a 100,6 ppm. La importancia del Pb en las aguas naturales consiste en que se trata de un elemento tóxico y no esencial para los seres vivos; sin embargo, se encuentra presente en todos los tejidos y órganos de los mamíferos (Vásquez-Botello y Páez-Osuna, 1986). Puede

ingresar a cuerpos de agua naturales por medio de descargas de desechos municipales e industriales (EPA, 1976). La intoxicación de plomo puede generar un estado de anorexia, con síntomas de dispepsia y estreñimiento. Otros síntomas que se pueden presentar incluyen diarrea, náuseas, vómitos, insomnio y debilidad. En las formas más severas se presenta encefalopatía aguda, coma y paro respiratorio (Albert, 1990).

Zinc (Zn)

Las muestras de agua reportan valores muy bajos de este parámetro con un intervalo desde no disponible (ND) en el punto 5 (agua antes de mezcla con descargas) hasta 0,08 en el punto 4 (descarga Alstyle), sin que se supere el valor máximo permisible según las normas consideradas. Estos resultados son similares a los reportados por Villalba y Gómez (2011). En suelo, los valores determinados variaron de 23,98 (muestra 3) a 73,98 ppm (muestra 1). La importancia del Zn radica en que es un elemento esencial para el hombre y para los animales, toda vez que es necesario para el funcionamiento de varios sistemas enzimáticos (WHO, 1984); además, el Zn se considera como un elemento no tóxico. Sin embargo, se ha reportado que entre los síntomas de toxicidad con Zn en humanos incluye el vómito, deshidratación, desbalance electrolítico, dolor abdominal, náusea, letargo, disnea y deficiencia en la coordinación muscular (Barceloux, 1999).

En relación a los metales, al integrar los resultados analíticos, puede concluirse que en el agua no existe contaminación con estos parámetros. En suelo llama la atención que la muestra 1 (muestra blanco), tomada en un punto de no irrigación agrícola, adquiere concentraciones mayores que las muestras 2 (parcela Magueshi) y 3 (parcela Salón Ejidal), lo cual puede deberse al tiempo (varias décadas) en que existió la actividad minera en Douglas, Arizona, con la presencia y efectos de las chimeneas instaladas en las infraestructuras de fundición. Lo anterior se asocia principalmente con los parámetros cadmio, cobre, níquel, plomo y zinc. Asimismo, al determinarse valores bajos de estos parámetros en los suelos irrigados con el agua del Río Agua Prieta, puede inferirse que en vez de acumularse los metales en dichos suelos, el agua lixivia los mismos transportándolos hacia capas más profundas del suelo o drenándolos de nueva cuenta a las aguas del Río.

CONCLUSIONES

Las aguas del Río Agua Prieta, provenientes de la ciudad, están contaminando el medio con sólidos disueltos totales (sales minerales) y ligeramente con Ni, que al alcanzar un valor de 0,2 mg/L, se encuentra en el límite máximo permisible considerado en la CE-CCA-001/89, para uso agrícola, por lo que se puede convertir en un problema ambiental en el corto plazo.

Las aguas de descarga de la empresa Alstyle están contaminando severamente las aguas del ecosistema con sólidos disueltos totales (sales) y con Ni, cuyo valor supera los valores máximos permisibles considerados en la CE-CCA-001/89, para uso agrícola y pecuario.

Las aguas de descarga de la Termoeléctrica están contaminando moderadamente el ecosistema con sólidos disueltos totales (sales). Así también con As, cuyo valor supera el límite máximo permisible para uso agrícola. Asimismo el Cd de esta descarga supera el valor para uso agrícola y pecuario y el Ni supera el valor máximo permisible para uso agrícola, al considerar la norma CE-CCA-001/89.

Las aguas de descarga de las lagunas de oxidación están medianamente contaminando las aguas del Río Agua Prieta con sólidos disueltos totales (sales) y también con Cd, que supera el valor para uso agrícola, aunque se encuentra dentro del límite máximo permisible para uso pecuario según la CE-CCA-001/89. Asimismo, el Ni supera el valor permisible de esta norma para uso agrícola.

Las aguas con que son irrigadas los suelos de uso agrícola del Ejido Agua Prieta se encuentran contaminadas en lo que se refiere a sólidos disueltos totales (sales) y también con Cd, que supera el valor para uso agrícola, aunque se encuentra abajo del límite máximo permisible para uso pecuario según la CE-CCA-001/89. El Ni también supera la referencia de esta norma en lo que se refiere a uso agrícola.

Los suelos agrícolas se encuentran contaminados con sólidos disueltos totales (sales) limitando su uso en agricultura. Existe la presencia de metales por causas en general no imputables al uso del agua del Río Agua Prieta. Existe una tendencia a encontrarse metales con mayor concentración en suelo no agrícola que en suelo irrigado por el agua del Río Agua Prieta, lo cual es atribuible a la contaminación por varias décadas de la chimenea de fundición, que en su momento se localizaba en los procesos metalúrgicos del industrial minero localizado en Douglas, Arizona.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Asociación de Ejidatarios del Municipio de Agua Prieta, Sonora, el patrocinio para llevar a cabo la presente investigación. Así también su genuino interés por evaluar la condición ambiental en que se encuentran sus espacios de producción agropecuarias, contaminados por las actividades urbanas e industriales.

BIBLIOGRAFÍA

- ADEQ/WRRRC (Arizona Department of Environmental Quality/Arizona Water Resources Research Center), 1995. Manual de campo para el muestreo de la calidad del agua. Manual Bilingüe. Segunda Edición.
- Albert, A. L. 1990. Curso Básico de Toxicología Ambiental. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud. Editorial Limusa, S.A. de C.V. México, D. F.
- Alloway, B.J. y Ayres, D.C. 1993. Chemical Principles of Environmental Pollution. Blackie Academic & Professional. New York, USA.
- Aragonez-Sanz, N., Palacios-Diez, M., Abelló-Miguel, A., Gómez-Rodríguez, P., Martínez-Cortés, M., y Rodríguez-Bernabeu, M., 2001. Nivel de arsénico en abastecimientos de agua de consumo de origen subterránea en la comunidad de Madrid. *Revista Española de Salud Pública*. 5(005):421-432.
- Barceloux, D.G. 1999. Clinical toxicology. *Journal of Toxicology*, 37 (2): 173-194.
- Branco-Murgel, M.S. 1984. Limnología sanitaria. Estudio de la polución de aguas continentales. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C.
- CE-CCA-001, 1989. Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos de calidad del agua. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Gaceta Ecológica. Estados Unidos Mexicanos.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1993. Manual de Aseguramiento de Calidad. Subdirección General de Administración. Programa de Aseguramiento de la Calidad. México, D.F.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1995. Manual de Métodos de Análisis. Subdirección General Técnica. Subgerencia de Laboratorios y Monitoreo. México, D.F.
- Connell, W.D. y Miller, J.G. 1984. Chemistry and Ecotoxicology of Pollution. John Willey & Sons. New York, U.S.A.
- Elder, F.J. 1988. Metal biogeochemistry in surface-water systems. A review de principles and concepts. U. S. Geological Survey Circular 1013, U.S.A.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1976. Quality Criteria for Water. The United States Environmental Protection Agency, USA.
- Gómez A.A., Valenzuela G.J., Villalba A.A., Meza F.D., Al-mendáriz T.F., Whitaker B.T., Martínez M.F., Valenzuela C.M. y Ochoa V.L. 2011. Distribution of metals and their chemical speciation in sediments from the Abelardo L. Rodríguez Dam, Sonora, México. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 23(4):201-212.
- Lobban, S.Ch., Harrison, J.P. y Duncan, J. M. 1985. The Physiological Ecology of Seaweeds. Cambridge University Press, New York, U.S.A.
- Moore, W.S. y Ramamoorthy, S., 1984. Heavy Metals in Natural Waters. Applied monitoring and impact as-

- essment. Springer-Verlag, New York. USA.
- NOM-001-SEMARNAT, 1996. Norma Oficial Mexicana, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
- NOM-021-RECNAT, 2000. Norma Oficial Mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México, D.F.
- Ochoa V.L., Gómez A.A., Leticia G.R. y Villalba A.A. 2009. Distribution of heavy metals in surface sediments of the Bacochibampo Bay, Sonora, México: Chemical Speciation and Bioavailability 21(4):1-8.
- S.E.D.U.E. (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología), 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua CE- CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación del 2 de diciembre de 1989. Tomo CDXXX, No. 9. México, D.F.
- Solís G.G., Villalba A.A., Nubes O.G., del Castillo A.J. y Meraz A. A. 2010. Físico-química del agua superficial y sedimento en el Río Santa Cruz, Sonora, México. Biotecnia, XIII(1):3-9.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura), 1981. Documentos de base y datos en la escala práctica de salinidad. Tech. Pap. Mar. Sci., 37:144.
- Vásquez-Botello, A. y Páez-Osuna, F. 1986. El problema crucial: la contaminación. Serie Medio Ambiente en Coatzacoalcos. Centro de Ecodesarrollo. México, D. F.
- Villalba, A.A. y Gómez, A.A. 2011. Calidad del agua en la región Noreste del Estado de Sonora, México. Primera Edición. Editorial Académica Española. Madrid, España.
- WHO (World Health Organization), 1984. Guidelines for Drinking-Water Quality. Volume 2. World Health Organization, Belgium.