

## ANÁLISIS DE LOS CRITERIOS PARA PROTEGER LA VIDA ACUÁTICA: EL RÍO SONORA DESPUÉS DEL DERRAME MINERO DE 2014

### ANALYSIS OF CRITERIA TO PROTECT AQUATIC LIFE: THE SONORA RIVER AFTER THE 2014 MINING SPILL

Díaz Caravantes, Rolando E.<sup>1</sup>; Duarte Tagles, Héctor<sup>2</sup>; Pallanez Murrieta, Maribel<sup>2</sup>; Moreno Vázquez, José Luis<sup>1</sup>; Mejía Santellanes, Javier Alberto<sup>1</sup>; Durazo Gálvez, Francisco<sup>2</sup>

#### Resumen

Cuando los sistemas de agua se contaminan, la seguridad hídrica se ve seriamente amenazada. Un caso reciente es el derrame de 40,000 metros cúbicos de lixiviado ácido vertidos al río Sonora, México, el 6 de agosto del 2014. Lamentablemente, los estudios acerca de los ecosistemas acuáticos después de este evento son numéricamente limitados.

De esta insuficiencia de investigaciones se desprende el objetivo de analizar los casos de muestreos de calidad de agua superficial que cumplan o estén fuera de los criterios de protección a la vida acuática de acuerdo con los registros de la base de datos del monitoreo del Fideicomiso Río Sonora.

Para lograr esto, se realizó una revisión de la literatura sobre la calidad del agua en el río Sonora. Aunque desde el 2012 existe una norma mexicana para el caudal ecológico, ésta es de carácter voluntario y además no presenta una guía detallada respecto de la calidad de agua necesaria para la protección a la vida acuática. Puesto que en la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales* sí se especifican estos valores, acudimos a ésta para comparar los registros de los muestreos de agua superficial para los 38 sitios observados durante el período agosto 2014-septiembre 2015. Con dicha información se constituyó una base de datos de la cual se obtuvieron frecuencias por mes y por sitio para cada uno de los parámetros de estudio. Finalmente se mapearon los sitios de muestreo con la frecuencia obtenida durante el período estudiado.

Entre los resultados, en primer lugar señalamos que en la base de datos se encontró una nomenclatura: NE (análisis no efectuado), cuyo significado e implicaciones no se especifican en la página del Fideicomiso. En el trabajo también se indica que en dicha ley existen dos conjuntos de criterios de calidad de agua: los lineamientos para determinar a qué usuario se puede exceptuar del pago de derechos de agua nacionales, y los límites máximos permisibles, que señalan los valores para exceptuar la obligación del pago de derecho de las descargas de aguas residuales. Los umbrales de los lineamientos son más rigurosos que los límites máximos y por esta razón existe un número considerablemente mayor de casos que exceden el criterio de éstos, en comparación con los límites máximos permisibles. Aun con la relevancia que puedan tener estos hallazgos para el diseño de una adecuada protección a la vida acuática, este ejercicio académico tiene sus límites, ya que los criterios de calidad del agua de la citada ley tienen un objetivo eminentemente recaudador.

**Palabras clave:** calidad del agua, protección de la vida acuática, río Sonora.

#### Abstract

When water systems become contaminated, water safety is seriously threatened. A recent case is the spill of 40,000 cubic meters of acid leachate discharged into the Sonora River, Mexico, on August 6, 2014. Unfortunately, studies about aquatic ecosystems after this event are scarce.

This lack of research reveals the importance of analyzing cases of surface water quality samples that comply or not with the criteria for aquatic life protection according to the records of the monitoring database of the *Fideicomiso Río Sonora*.

To achieve this goal, we conducted a review of the literature on water quality in the Sonora River. The 2012 Mexican standard for ecological flows is not mandatory and it does not either provide a detailed guidance on the quality of water suitable for the protection of aquatic life. Since this guidance is included in the federal law: *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*, we use it to compare the data of surface water samples for the 38 sites observed during the period from August 2014 through September 2015. We created a database from information about monthly frequencies per sites for each of the study parameters. Finally, the sampling sites were mapped using the frequency obtained during the period under study.

As an underlying result, we found a two-letter symbol in the database without a specified meaning or implications of this category on the webpage of the *Fideicomiso Río Sonora*: NE (analysis not performed). In this work, we also remark that this federal law provides two sets of criteria: the guidelines, which are set to determine who can be exempted from payment of national water rights, and the maximum permissible limits, which indicate the values under which anyone would be exempted of paying fees and rights for wastewater discharges. The thresholds of the guidelines are more rigorous than the maximum permissible limits and, for this reason, there is a greater number of cases that exceed this former criteria as compare to the maximum permissible limits. In spite of the relevance that these findings may have for the protection of aquatic life, this academic exercise has its limitations, since the water quality criteria of this law is for tax collection purposes.

**Key words:** water quality, water protection of aquatic life, Sonora River

<sup>1</sup> El Colegio de Sonora. México. rdiaz@colson.edu.mx;

<sup>2</sup> Universidad Estatal de Sonora. México. hector.duarte@unison.mx;

## 1. INTRODUCCIÓN

El 6 de agosto de 2014, la mina Buenavista del Cobre derramó alrededor de 40,000 metros cúbicos de lixiviado ácido a uno de los arroyos que alimenta al río Bacanuchi, afluente a su vez del río Sonora. Reportes de dependencias federales indican que el derrame fue causado por la falla de un amarre en un tubo de polietileno en una de las piletas de lixiviados, así como por la falta de una válvula en la piletta de demasías (SEMARNAT, 2014).

A raíz de este evento, el 15 de septiembre de 2014 se conformó el Fideicomiso Río Sonora, cuya finalidad es atender las consecuencias del derrame. Este fideicomiso creó un portal electrónico accesible a través de internet, en el que se presenta la información oficial sobre las acciones que se han implementado para atender el problema de la contaminación del río Sonora derivado del derrame, entre éstas el monitoreo de calidad del agua (SEMARNAT, 2015). De la base de datos de monitoreo de agua subterránea se han desprendido algunos análisis que comparan los valores de la calidad del agua con la normatividad oficial mexicana, respecto al agua potable, NOM 127-SSA1-1994 (DOF, 2000) y las guías sugeridas por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011).

El impacto de la calidad del agua en la salud humana es de suma importancia. Sin embargo, el estudio de la protección a la vida acuática es también fundamental ya que, como algunos estudiosos de la relación entre el agua y los ecosistemas afirman, la visión conceptual dominante en la sociedad moderna considera a los ecosistemas de agua dulce como recursos que deben ser explotados para el crecimiento económico, y no reconoce ni especifica las necesidades de agua por parte de la naturaleza (Postel & Richter, 2003); razón por la cual, estos autores reclaman un cambio hacia una nueva mentalidad, que haga de la preservación de la salud del ecosistema un objetivo explícito del desarrollo y la gestión del agua.

El objetivo de investigación del presente trabajo se centró en analizar si la calidad del agua superficial del río Sonora, después del derrame, cumple con los criterios para la protección de la vida acuática establecidos por la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Para este fin, se confrontaron los valores reportados por el Fideicomiso Río Sonora (período agosto 2014- septiembre 2015) con los criterios de calidad del agua disponibles en dicha ley.

El artículo presenta, en la sección de antecedentes, una revisión de los estudios documentados acerca de los impactos de la actividad minera sobre la calidad del agua en la cuenca del río Sonora. Posteriormente se describen los materiales y métodos utilizados para este estudio: 38 sitios de muestreo de agua

superficial de 19 parámetros reportados durante el período de Agosto de 2014 a Septiembre de 2015, y la mencionada ley con sus criterios de calidad del agua: “Lineamientos de Calidad del Agua” (LCA) y “Límites Máximos Permisibles” (LMP) (SEMARNAT, 2016). A continuación, se presentan los resultados de la comparación de los valores de calidad del agua y los criterios de esta ley, primero contrastado con los LCA, seguido de la comparación con los LMP. Finalmente se discuten los hallazgos y se examinan los alcances y limitaciones que tiene el actual marco legal mexicano, con el fin de asegurar la calidad del agua necesaria para proteger la vida acuática, y buscando que éste se convierta en una herramienta más integral y no sólo con fines recaudatorios.

## 2. ANTECEDENTES

En el 2012 se emitió la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 “Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas” (DOF, 2012). De acuerdo con esta norma, el caudal ecológico: “[e]s la calidad, cantidad y régimen del flujo o variación de los niveles de agua requeridos para mantener los componentes, funciones y procesos de los ecosistemas acuáticos epicontinentales” (DOF, 2012).

El hecho de que se incluya la calidad del agua dentro de la definición de caudal ecológico es de suma importancia, porque los servicios ambientales hidrológicos que suministran las cuencas sostienen beneficios relacionados con la provisión del agua, la regulación de los flujos pluviales, la purificación del agua, la regulación de la erosión, etcétera. Beneficios que sólo pueden proveerse bajo condiciones de un buen funcionamiento ecosistémico de la cuenca, lo que incluye la interacción adecuada de los procesos naturales y sociales implicados en la misma (Madrid, 2011, p. 53).

No obstante esta relevancia, las metodologías enfocadas al estudio de los caudales ecológicos indicadas en la norma NMX-AA-159-SCFI-2012: hidrológicas, de simulación de hábitat y holísticas, están enfocadas principalmente en determinar la cantidad de agua necesaria para mantener los ecosistemas, mientras el tema de la calidad del agua es escasamente abordado: solamente en una de las seis metodologías, la holística, es considerada la calidad del agua, y esto sin llegar a un nivel de detalle que sirva como guía práctica (DOF, 2012)<sup>3</sup>.

La ley que sí permite cierto nivel de especificidad sobre el tema, aunque no con el fin de determinar el caudal ecológico, sino para la recaudación fiscal, es la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales*. Es esta ley la que utilizaremos para nuestro ejercicio académico, como se verá más adelante.

3 Además, el cumplimiento de dicha norma mexicana es de ámbito primordialmente voluntario. Esto se manifiesta en su nomenclatura NMX, pues las normas oficiales mexicanas llevan la nomenclatura NOM, y son de carácter obligatorio.

Los impactos generados por la actividad minera en los ambientes dulceacuícolas ilustran la importancia de vigilar no solo la cantidad, sino también la calidad del agua necesarios para la salud de los ecosistemas. Estos impactos en la cuenca del río Sonora han sido estudiados por Gómez y colaboradores (1990, 1993), quienes determinaron la concentración de metales pesados en el agua y en los sedimentos, relacionada con los vertimientos e infiltraciones de desechos ácidos provenientes de la entonces denominada Compañía Minera de Cananea S.A. Los contaminantes, incluidos metales, con los niveles más altos, detectados en el agua de los ríos Sonora y Bacanuchi fueron cobre, plomo, zinc, hierro, manganeso y sulfatos, cuyas concentraciones excedieron los valores máximos permisibles. En la presa Abelardo L. Rodríguez, las concentraciones de metales fueron inferiores a estos valores. En cuanto a los sedimentos, en las estaciones de muestreo más cercanas a los repesos de desechos ácidos de la empresa minera, se encontraron concentraciones altas de cobre, hierro y manganeso.

Posteriormente, un estudio del Instituto Tecnológico de Sonora (2008) determinó una concentración elevada, y por encima de la norma, de hierro y manganeso en el agua superficial y subterránea de la cuenca alta y media, sobre todo al finalizar el periodo de lluvias. Además, se analizaron siete metales pesados en flora, fauna y sedimentos en cinco sitios seleccionados en el cauce del río Sonora. Respecto a flora y fauna acuática, el fierro presentó la concentración más alta en el puente La Junta, y en cuanto a sedimentos, el mismo metal en el Rancho Ojo de Agua (cerca de la presa de Jales de Buenavista del Cobre) y en la presa El Molinito (cerca de la ciudad de Hermosillo), es decir, en la parte alta y baja de la cuenca, respectivamente.

Sobre la calidad del agua y la distribución de metales pesados en la presa Abelardo L. Rodríguez y su relación con la influencia de la zona urbana e industrial de la ciudad de Hermosillo, Gómez y colaboradores (1997) concluyeron que los contenidos de hierro, níquel y manganeso excedieron los límites permitidos, por lo que el agua de la presa no era adecuada para el abastecimiento de agua potable. En cuanto a los sedimentos, Villalba y colaboradores (1997) observaron que el contenido de los nueve metales analizados fue comparable con lo reportado en otros ríos que han sido considerados como contaminados. Asimismo, Gómez y colaboradores (1997) encontraron metales pesados en la población de tilapia en la citada presa. Por último, Gómez y colaboradores (2011), reportaron altos niveles de metales pesados en los sedimentos de la presa, contaminados por cadmio, cobre y plomo, y severamente contaminados por fierro.

Por otra parte, se han realizado otros estudios para identificar la influencia de la actividad minera y las descargas de aguas negras de la ciudad de Cananea sobre la calidad del agua superficial en la cuenca

del río San Pedro, que se comparte con Estados Unidos. Gómez y colaboradores (2004) observaron valores elevados de algunos metales pesados (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn), conductividad eléctrica y sulfatos, así como valores bajos de potencial de hidrógeno (pH) en las estaciones de muestreo más cercanas a la explotación minera (depósito de la concentradora vieja). Dichos valores fueron superiores a los máximos permitidos establecidos en los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua de 1989 (DOF, 1989). Esta contaminación ha ocasionado problemas a nivel internacional, con el vecino estado de Arizona, ya que los desechos ácidos llegaron al río Gila provocando una gran mortandad de peces. Recientemente, Gómez y colaboradores (2014) concluyeron que los valores anteriores también exceden los máximos permitidos en los Criterios de Calidad del Agua de la EPA de 1986. Estos resultados son importantes porque el río San Pedro representa la fuente principal de agua para las ciudades situadas a lo largo de su cauce, incluyendo el agua que es usada para la agricultura y la ganadería en la frontera México-Estados Unidos. Recomendaron al gobierno federal y estatal promover la construcción de una planta tratadora de aguas residuales en Cananea.

Después del derrame de agosto de 2014, tres trabajos han analizado la calidad del agua y otros componentes ambientales en el río Sonora. Gutiérrez y Romero (2015) concluyeron que: a) el agua superficial afectada con el derrame ácido ya se había neutralizado ocho días después del accidente y a los tres meses las concentraciones de metales totales —con excepción del Al, Fe y Mn que están formando coloides en suspensión—, eran menores a los límites señalados en la NOM-127 para agua potable (DOF, 2000); b) las concentraciones de Al, Fe y Mn fueron similares a las reportadas para los cuerpos de agua de la región antes del accidente; y c) se ha informado la presencia de Fe, As, Mn, Pb y V en sedimentos, relacionada con anomalías naturales y, posiblemente, con la minería histórica, cuya influencia debe ser tomada en cuenta. Las fuertes precipitaciones ocurridas en la zona fueron un factor que favoreció la difusión y dilución de los contaminantes, mientras la construcción de una barrera y la adición de cal a los cuerpos afectados —actividades realizadas por la compañía minera—, contribuyeron a la contención del agua acidificada, al aumento rápido del pH y a la precipitación de los metales solubles.

Por su parte, el Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad del Instituto de Ecología de la UNAM (2016), concluyó que las evidencias concretas de daño al ambiente dentro de la fase crónica exacerbada son: a) alteración adversa del estado base de los ecosistemas, que se manifiesta en las concentraciones de metales pesados mayores a los valores de fondo en suelo y sedimento en el río Bacanuchi, a seis meses y un año después del derrame, y el patrón de concentraciones máximas de



metales pesados que se trasladan de norte a sur a lo largo del cauce del río Bacanuchi y del río Sonora, durante un período de 70 días posteriores al derrame; b) afectación adversa al hábitat acuático, que se manifiesta en el cambio de la estructura poblacional de especies de peces endémicas y amenazadas; el cambio en la estructura poblacional se observa con la ausencia de estadios juveniles un año después del derrame; y c) deterioro de los ecosistemas ribereños, que se manifiesta en la alta mortalidad de árboles ribereños sobre el arroyo Tinaja 1, a 13 km al sur del represo Tinajas, un año después del derrame.

A su vez, mediante el análisis de la base de datos del monitoreo del agua subterránea reportados por el Fideicomiso Río Sonora en su página de internet, Díaz Carvantes y colaboradores (2016) detectaron la falta de consistencia en la captura de datos del monitoreo implementado desde que ocurrió el derrame. En la base de datos, durante seis meses, de enero a junio de 2015, no hay registros de muestreo alguno; además, por un período de tres meses, de julio a septiembre de 2015, no se observan valores numéricos para la mayoría de los metales estudiados, sino solamente la abreviatura "NE", cuyo significado no se especifica en la página de internet; asimismo, la frecuencia de captura varía para ciertos parámetros en días, semanas y hasta meses, como es el caso de sulfatos, turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica, pH y temperatura. No obstante la falta de consistencia de esta base de datos, los autores

destacan que utilizando la guía de la Organización Mundial de la Salud para el caso del arsénico (0.01 mg/L) en lugar de la norma mexicana NOM 127-SSA1-1994 (0.025 mg/L), este elemento rebasó el límite de la guía en 120 ocasiones, principalmente en la parte baja de la cuenca del río Sonora.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Sonora se localiza en el noreste-centro de Sonora, México, con un área total de 30,913 kilómetros cuadrados, cerca del 15% del área estatal. El gradiente altitudinal de la cuenca va desde 2,620 msnm en las partes altas hasta 0 msnm en la costa (CONAGUA, 2013). La precipitación media anual de la cuenca es de 376 mm (Romo et al., 2014). El río Sonora fluye hacia el suroeste, primero hacia la presa Rodolfo Félix Valdéz (El Molinito), con una capacidad de almacenamiento de 150 hm<sup>3</sup>, y 23 km después, hacia la presa Abelardo L. Rodríguez, adyacente a la ciudad de Hermosillo con una capacidad de almacenamiento de 219.5 hm<sup>3</sup> (Romo et al., 2014). De acuerdo a información hidrométrica de la estación El Orégano, el río Sonora ha pasado de un flujo perenne, en 1960-1995, a un régimen efímero, de 1995 a 2015 (CONAGUA, 2013). En esos dos períodos, el escurrimiento anual disminuyó de un promedio de 134 hm<sup>3</sup> del período 1960-1995 a 34 hm<sup>3</sup> en el posterior.

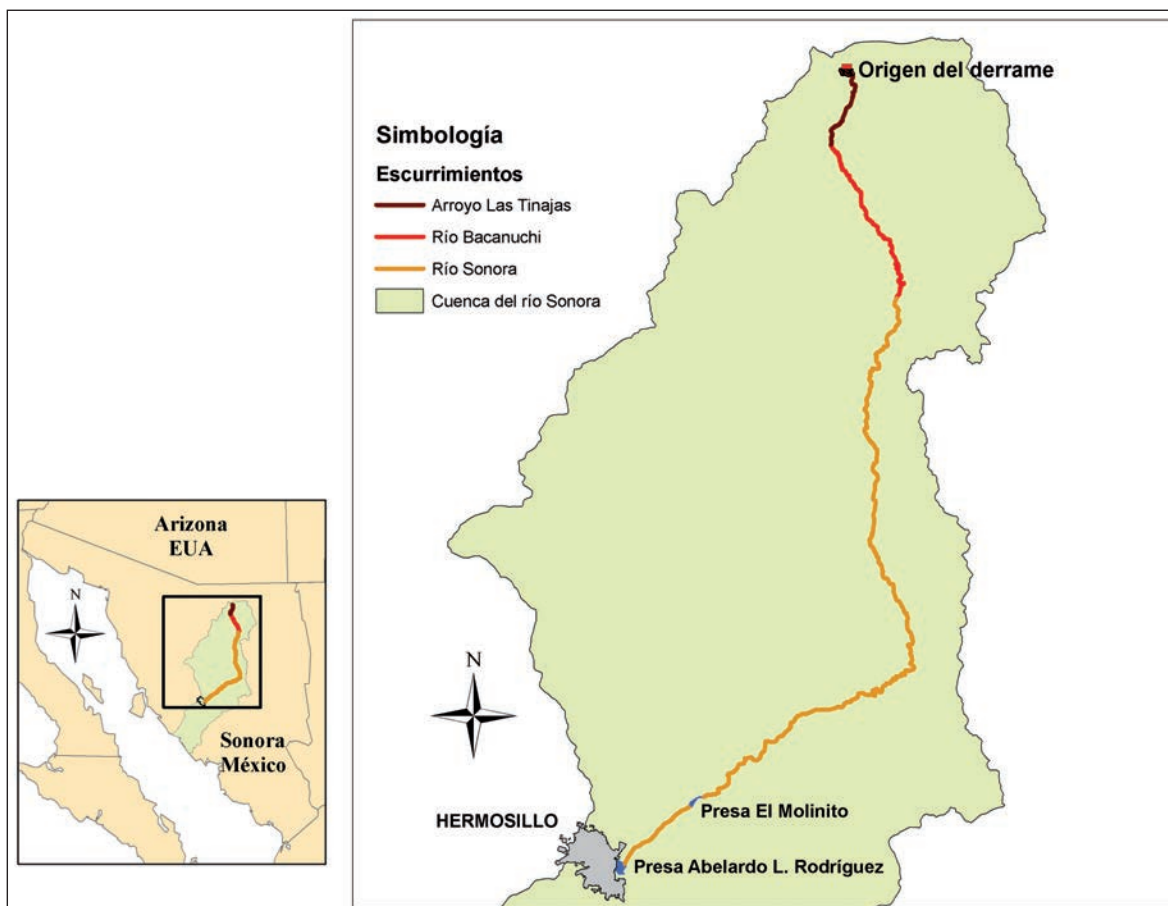


Figura 1. Recorrido del derrame en el río Sonora

La Figura 1 ilustra la ruta del derrame de la mina Buenavista del Cobre el 6 de agosto del 2014. Este empezó en el represo mostrado como 'Origen del derrame' desde donde se trasladó cerca de 22 kilómetros por el arroyo Las Tinajas, fluyendo cerca de 58 kilómetros dentro del río Bacanuchi hasta encontrarse con el río Sonora, dentro del cual recorrió 206 kilómetros hasta llegar a la presa El Molinito.

La fragilidad ecológica del río Sonora tiene implicaciones mayúsculas, ya que se sitúa en una región semiárida y suele ser la única fuente de agua superficial para los organismos acuáticos y terrestres, además de ser la fuente primaria para las actividades productivas (Bogan et al., 2014, p. 2705). A pesar de que el río Sonora se encuentra en los límites de distribución de especies boreales y neotropicales que sugieren una alta biodiversidad, la abundancia y riqueza de sus especies ha sido poco estudiada. Uno de los trabajos pioneros en la zona determinó la existencia de al menos ocho órdenes, 34 familias y 30 géneros de insectos acuáticos; además de una ictiofauna mayormente representada por las especies *Agosia chrysogaster*, *Catostomus wigginsi* y *Poeciliopsis occidentalis* (Chávez et al., 1989, p. 21), especies endémicas que actualmente se encuentran listadas como amenazadas y bajo régimen de protección según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (DOF, 2010). En 2013 se presentaron los resultados de una investigación de la ictiofauna en el río Sonora, cuyos hallazgos mostraron que las especies arriba mencionadas como sujetas a protección especial, presentan una alta tolerancia a los factores ambientales de sequía y lluvia, siendo incluso más abundantes durante el período de estiaje (Chávez et al., 2013, p. 258).

#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se analizó la base de datos del monitoreo de la calidad del agua que aparece en el portal electrónico del Fideicomiso Río Sonora (SEMARNAT, 2015), con el fin de examinar los resultados de los 38 sitios de muestreo superficial de cada uno de los 19 parámetros reportados durante el período de Agosto de 2014 a Septiembre de 2015 (aproximadamente un año después del derrame). Los parámetros reportados durante ese período son: aluminio, antimonio, arsénico, bario, cadmio, cobre, cromo, fierro, manganeso, mercurio, níquel, plomo, zinc, sulfatos, turbiedad, sólidos disueltos totales, conductividad electrolítica, pH y temperatura.

Los valores reportados se confrontaron con los criterios de calidad del agua disponibles en la *Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016* (la cual a partir de aquí sólo llamamos Ley Federal). En dicha ley se establecen dos conjuntos de indicadores de calidad del agua: "Lineamientos de Calidad del Agua" (LCA)

y "Límites Máximos Permisibles" (LMP) (SEMARNAT, 2016).

Los LCA, como se establece del artículo 222 al 224, indican el grado de calidad que deberá presentar el agua que sea vertida al destino inmediato posterior a su "explotación, uso o aprovechamiento", ya sea por una persona, física o moral, para poder exceptuarlo del pago de derechos de agua nacionales con las cuotas señaladas en el artículo 223-B (SEMARNAT, 2016, pp. 14–24). En la tabla de LCA se incluyen 30 parámetros inorgánicos, 80 orgánicos, 11 físicos y un parámetro microbiológico; además se especifican cuatro usos, uno de ellos es "Protección a la vida acuática: Agua dulce, incluye humedales" (SEMARNAT, 2016, pp. 20–24); el conjunto de parámetros para este uso será el examinado en este estudio. Algunos de estos parámetros son iguales a los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89 (DOF, 1989).

Los LMP, como se establece del artículo 276 al 282, señalan los valores para exceptuar la obligación del pago de derecho federal "por uso o aprovechamiento de bienes del dominio público de la Nación como cuerpos receptores de las descargas de aguas residuales..." (SEMARNAT, 2016, p. 50). En los límites se incluyen 12 parámetros inorgánicos y 5 físicos. Estos parámetros tienen como referencia la NOM-001-SEMARNAT-1996: "Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales" (SEMARNAT, 2003). En la tabla de LMP se especifican los criterios para "Protección de Vida Acuática" en "Ríos" (SEMARNAT, 2016, p. 81).

Para acceder a la base de datos del Fideicomiso Río Sonora es necesario ingresar a su página oficial [www.fideicomisoriosonora.gob.mx](http://www.fideicomisoriosonora.gob.mx) (SEMARNAT, 2015), después a la opción de "Monitoreo de agua" y posteriormente a "Gráficas calidad del agua". En la página se observan las gráficas del monitoreo con diversas opciones: tipo de muestreo, sitio de muestreo, elemento muestreado y período de muestreo.

En cuanto a las aguas superficiales, en el tipo de muestreo hay varias opciones: Superficial compuesta total, Superficial compuesta soluble, Superficial total, Superficial total soluble, Superficial medio total, Superficial media soluble, Superficial fondo total y Superficial fondo soluble. Puesto que los límites máximos de la Ley Federal son para muestras "medidas de manera total" y compuestas (promedio diario) (SEMARNAT, 2016, p. 81), se escogió el tipo Superficial compuesta total para este análisis.

Existen dos opciones para descargar la información del monitoreo: como un archivo de imagen de la gráfica y como base de datos numérica. Para este estudio escogimos esta última opción. Los archivos originales son del tipo *Comma-Separated Values* (CSV), los cuales fueron organizados en *Excel*® y

posteriormente convertidos al formato del programa SPSS® para la obtención de las frecuencias de los parámetros de estudio. Asimismo, algunos de los archivos de SPSS fueron convertidos en *shapefile* para mapear los casos según el sitio de muestreo utilizando el programa ArcMap®. La ubicación geográfica de los sitios de muestreos se obtuvo de la página del Fideicomiso Río Sonora (SEMARNAT, 2015).

## 5. RESULTADOS

### *Sobre los Lineamientos de Calidad del Agua*

Al contrastar los valores de los muestreos de agua superficial compuesta total de todos los sitios, para el período Agosto 2014-Septiembre 2015, con los parámetros de los LCA para la protección de la vida acuática, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Muestreos de agua superficial compuesta total contrastados con los LCA de la Ley Federal para la protección a la vida acuática

Parámetro medido	Lienamiento	Unidad	Total de Registros	Registros con valor numérico	Registros fuera del lineamiento	Registros dentro del lineamiento	Registros "ND"	Registros "NE"
Aluminio	0.05	mg/L	2438	2198	1925	273	5	235
Aluminio	0.09	mg/L	2436	1122	0	1122	1079	235
Arsénico	0.02	mg/L	2438	1312	30	1282	891	235
Bario	0.01	mg/L	2438	2197	2194	3	6	235
Cadmio	0.004	mg/L	2437	1124	221	903	1078	235
Cobre	0.05	mg/L	2437	1698	624	1074	504	235
Cromo	0.05	mg/L	2438	1349	156	1193	854	235
Hierro	1	mg/L	2438	2201	855	1346	1	236
Mercurio	0.0005	mg/L	2438	1554	277	1277	639	245
Níquel	0.06	mg/L	2404	1270	26	1244	899	235
Plomo	0.03	mg/L	2438	1251	401	850	952	235
Zinc	0.02	mg/L	2391	1976	1068	908	180	235
pH	6.5 - 8.5	UpH	874	639	70	569	0	235

### *Parámetro*

En la Tabla 1 se muestran los parámetros indicados como LCA en la Ley Federal en comparación con los registrados en el Fideicomiso: 13 de 19. Llama la atención el gran número de casos fuera del lineamiento en muchos de los parámetros: en bario y aluminio son casi el total de los casos; mientras que en zinc, fierro y cobre son entre la mitad y una cuarta parte de casos fuera del lineamiento, del total de registros.

Conviene aclarar que "ND" "significa que el resultado del análisis es un valor menor al expresado en la celda LDM [Límite de Detección del Método]"<sup>4</sup>. Asimismo, "NE" significa "Análisis no efectuado" (CONAGUA, 2016). Una vez aclarado lo anterior, en la Tabla 1 destaca que en todos los parámetros medidos existen entre 235 y 245 NE, que en la mayoría de éstos son alrededor del 10% del total de registros y en el caso del pH, representan cerca del 27%. Asumiendo que "ND" equivale a no detectable, de aquí en adelante, consideraremos que ND significa que está dentro del lineamiento o límite permisible.

Para analizar la tendencia mensual, en la Figura 2 se muestran los siete parámetros que tuvieron más casos fuera del lineamiento: aluminio (Al), bario (Ba), cobre (Cu), fierro (Fe), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn). Los valores son el resultado de la suma de todos los sitios de muestreo de todas las muestras realizadas por mes para estos siete parámetros. La barra "Dentro del lineamiento" es la suma de todos los valores que cayeron en este rango de los siete parámetros; de forma similar, los "NE" es la suma de los casos con análisis no efectuado en estos parámetros.

En la Figura 2 se observa que la mayor parte de los muestreos, 51% de los 17,018 del período examinado, se realizaron entre agosto y septiembre de 2014. Entre octubre de 2014 y mayo de 2015, el número de muestreos por mes disminuyó y no fue hasta el período junio-agosto de 2015 cuando aumentó la frecuencia de muestreos.

También resalta que en agosto y septiembre de 2014 fueron poco más de la mitad de casos fuera del LCA en estos siete parámetros. En enero de 2015 hicieron

<sup>4</sup> Esta información no aparece en la página de internet del Fideicomiso Río Sonora; por lo que ésta fue solicitada por los autores y recibida a través del sitio INFOMEX, dirigido por el Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales.

su aparición los “NE”. En el período de junio a agosto de 2015, si se suman los casos fuera del lineamiento y los “NE”, éstos reúnen poco más de la mitad del total de muestreos durante ese período.

La misma información de los registros durante el período de agosto de 2014 a septiembre de 2015, por sitio de muestreo, se mapeó en la Figura 3.

En la Figura 3 se observa también el gran número de casos que están fuera del lineamiento: más de una cuarta parte en todos los sitios y poco más de la mitad en algunos de ellos.

### Sobre los Límites Máximos Permisibles

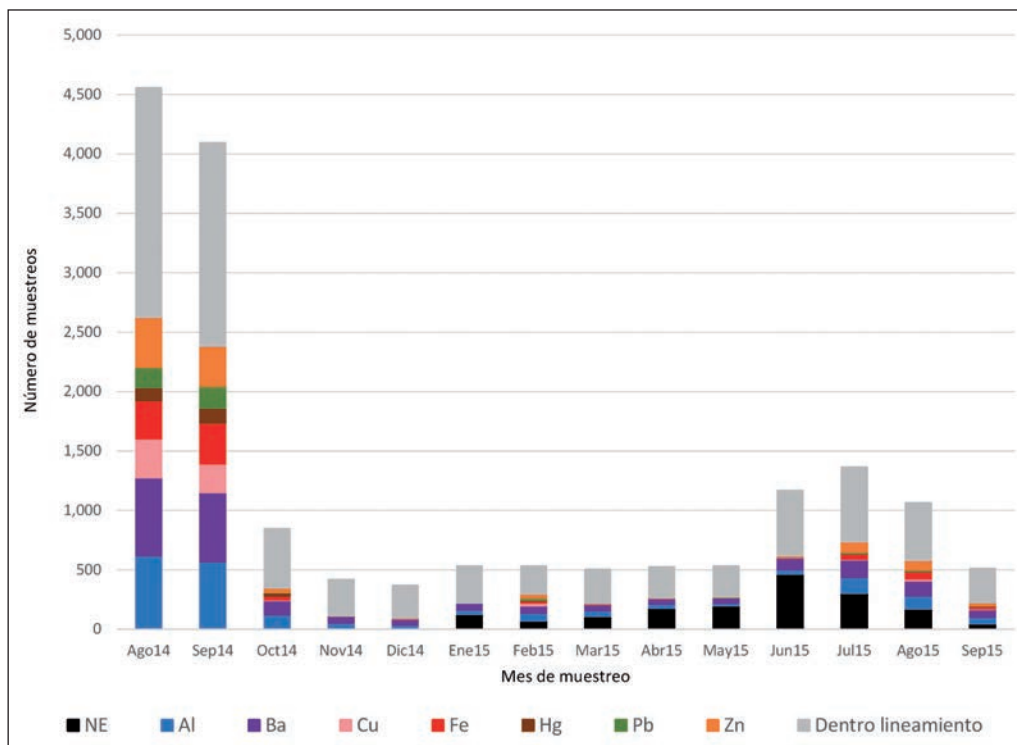
Los valores reportados fueron contrastados con los LMP para metales pesados y cianuros que cuentan con un criterio para el caso de protección a la vida acuática (SEMARNAT, 2016, p. 81), los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2. Es importante anotar que las mediciones que reporta el Fideicomiso son sobre la calidad del agua del río, no sobre la calidad de la descarga residual la cual, seguramente, tendría una concentración mucho mayor.

Lo primero que destaca en la Tabla 2 es que casi la mitad de los parámetros son los especificados como LMP en comparación con los registrados en el Fideicomiso: 9 de 19. De acuerdo al límite de estos parámetros, son un mínimo de casos los que exceden o están fuera del límite con respecto a los que están dentro del mismo, 4% o menos en todos los casos.

En búsqueda de un patrón temporal de estos registros, en la Figura 4 se muestran los resultados por parámetro según el mes de muestreo. Los parámetros que se muestran son aquellos que tuvieron uno o más casos fuera del límite: arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), mercurio (Hg), plomo (Pb) y zinc (Zn). Al igual que la Tabla 1, los valores son la suma de todos los sitios de muestreo de todas las muestras realizadas por mes; la barra “Dentro del límite” es la suma de todos los valores que se situaron en este rango de estos parámetros, y “NE” es la suma de los casos con análisis no efectuado en estos siete parámetros.

Como se observa en la Figura 4, la mayor parte de los casos fuera del LMP se presentaron en agosto de 2014: 148 sumando los siete parámetros. También en este mes se realizó un mayor número de muestras en los parámetros observados: 4551. En el período mostrado en la Figura 4 se realizaron alrededor de 17,000 muestreos para estos siete parámetros, de los cuales el 51% se concentró en agosto y septiembre de 2014. Entre octubre de 2014 y mayo de 2015, el número de muestreos por mes bajó drásticamente a aproximadamente 500 en un período. Fue en enero de 2015 cuando aparecieron los “NE”, que alcanzaron una tercera parte entre abril y julio de 2015; en agosto continuaron, hasta prácticamente desaparecer en septiembre de 2015.

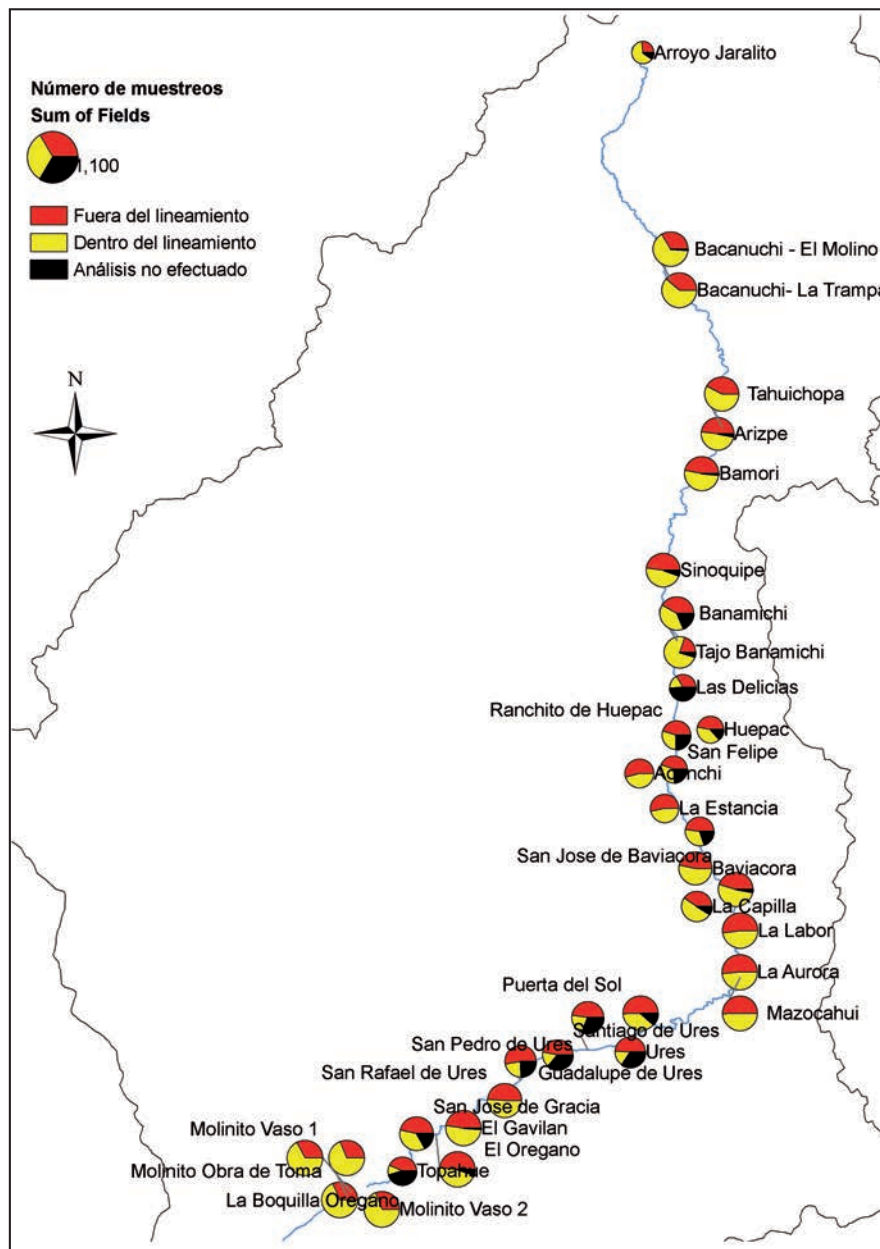
Estos mismos muestreos para los siete parámetros de agosto de 2014 a septiembre de 2015 se graficaron por sitios en la Figura 5.



**Figura 2.** Distribución mensual de la suma de muestreos superficiales de siete parámetros (Al, Ba, Cu, Fe, Hg, Pb y Zn) fuera y dentro del lineamiento y NE

Fuente: Elaboración propia con base en página oficial del Fideicomiso Río Sonora





**Figura 3.** Muestreo de siete parámetros según los LCA (Al, Ba, Cu, Fe, Hg, Pb y Zn) por sitio de muestreo, entre agosto 2014 y septiembre 2015

Fuente: Elaboración propia con base en página oficial del Fideicomiso Río Sonora

**Tabla 2.** Muestréos de Superficial compuesta total contrastados con los LMP de la Ley Federal para la protección a la vida acuática

Parámetro medido	Lienamiento Máximo Permissible	Unidad	Total de Registros	Registros con valor numérico	Registros fuera del límite	Registros dentro del límite	Registros "ND"	Registros "NE"
Arsénico	0.2	mg/L	2438	1312	30	1282	891	235
Cadmio	0.2	mg/L	2437	1124	43	1081	1078	235
Cobre	6	mg/L	2437	1698	48	1650	504	235
Cobre	1	mg/L	2438	1349	1	1348	854	235
Mercurio	0.01	mg/L	2438	1554	2	1552	639	235
Níquel	4	mg/L	2404	1270	0	1270	899	235
Plomo	0.4	mg/L	2438	1251	29	1222	952	235
Zinc	20	mg/L	2391	1976	31	1945	180	235
Temperatura	40	°C	874	639	0	639	0	235



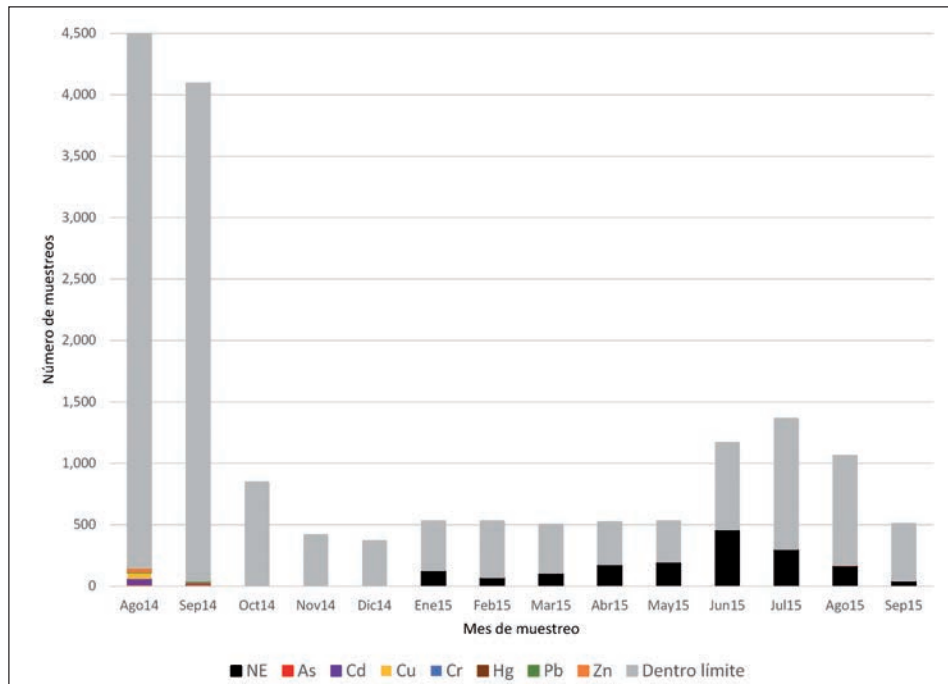


Figura 4. Distribución mensual de la suma de muestreos superficiales de siete parámetros (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn) fuera y dentro del límite y NE

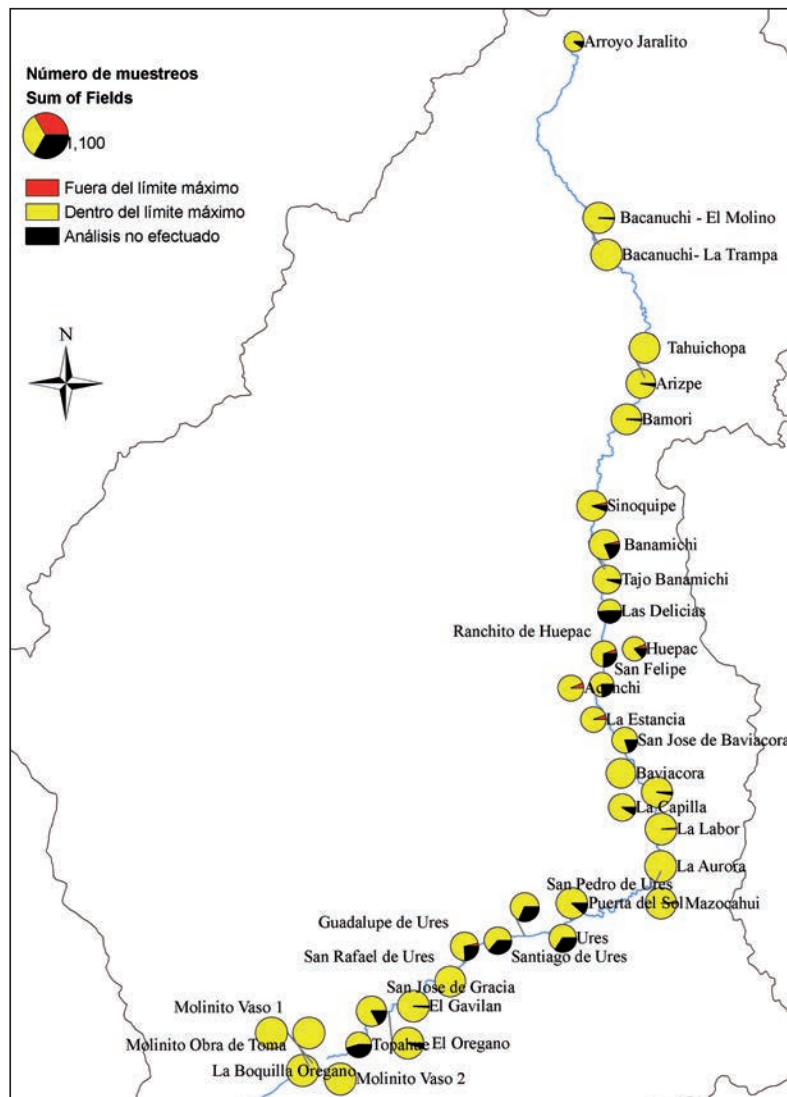


Figura 5. Muestreo de siete parámetros según el LMP (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn) por sitio de muestreo durante agosto 2014 y septiembre 2015

Como se observa en la Figura 5, el número de muestreos por sitio para estos siete parámetros está distribuido uniformemente (los tamaños de los círculos son similares), con un promedio de 448 muestreos por sitio. Un caso que destaca por tener un número de muestreos muy por debajo del promedio es el de Arroyo Jaralito (al norte de la cuenca), que solo tuvo 217 muestreos durante ese período para los 7 parámetros en cuestión.

Asimismo, se observan dos agrupaciones espaciales de los NE (análisis no efectuado): entre Sinoquipe y San José de Baviácora y entre Puerta del Sol y Guadalupe de Ures. Además San José de Gracia y Topahue contienen un buen número de NEs.

## 6. DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente, los LMP en una descarga de agua (“acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita”, Art. 277, fracción VII de la Ley Federal) se establecieron para efecto de tener parámetros que, en caso de ser excedidos, hagan exigible el pago de derechos a las personas físicas o morales responsables por el hecho. Una vez que una persona física o moral utiliza, explota o aprovecha aguas nacionales, está obligada al pago de derechos sobre agua (Art. 222, Ley Federal). Sin embargo, cuando la persona física o moral cumple con los LCA para el destino inmediato posterior de ésta en su descarga, puede estar exenta de pago (Art. 224, fracción V, Ley Federal). Para esto tendrá que cumplir con varios requisitos, entre los que destaca el contar con un certificado de calidad de agua el cual expedirá CONAGUA, observando lo establecido por el Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales.

Dicho lo anterior, es necesario señalar que estamos conscientes de que ambos conjuntos de parámetros, LCA y LMP, tienen un objetivo eminentemente recaudador, pero al observar información detallada sobre los límites de calidad del agua en la Ley Federal, decidimos emprender este ejercicio académico tomando como referencia dicho marco legal.

De los resultados, en principio destaca que los LCA contienen más parámetros que los LMP: los primeros son un total de 122, incluyendo los parámetros inorgánicos, orgánicos, físicos y microbiológicos; mientras que los segundos son un total de 17. Mientras en los LMP son 9 de los 19 parámetros incluidos en la base de datos del Fideicomiso, en los LCA son 13. Además, cabe cuestionarse por qué no se monitorearon, o por lo menos no aparecen en la base de datos del Fideicomiso, los más de 100 parámetros restantes de los LCA; es posible que esto obedezca a que el monitoreo haya sido diseñado para proteger la salud humana y no la vida acuática, lo cual le daría la razón a Postel y Richter (2003), cuando establecen que los ecosistemas no son una prioridad en nuestra visión moderna.

Específicamente en los LCA, a diferencia de los LMP, se incluyen aluminio, antimonio, bario, fierro y pH. Lo primero que llama la atención es que en los límites máximos de la Ley Federal no se incluye el pH, a pesar de que se basó en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que sí lo establece; esta omisión probablemente se deba a que este valor viene señalado en el texto de la norma (art. 4.1: “El rango permisible del potencial hidrógeno-sic- (pH) es de 5 a 10 unidades”) mas no en la tabla de valores (SEMARNAT, 2003). El caso de la exclusión del aluminio de los LMP también resulta inexplicable, ya que es identificado como un metal de alta toxicidad para los peces y que, dependiendo de las condiciones fisicoquímicas del agua, puede generar lesiones histopatológicas en las branquias de los peces que derivan en hiperplasia e hipertrofia (Domitrovic, 1997, p. 37). De igual forma, el bario es tóxico para las microalgas de agua dulce, que son alimento para los peces (Borgmann et al., 2005).

Como también se observa en los resultados, todos los parámetros, con excepción del arsénico, son mucho menos permisibles en los LCA que en los LMP (comparar Tabla 1 y 2). Esto hace que en los LCA haya un número mucho mayor de casos que en los LMP: de los aproximadamente 17,000 muestreos de los parámetros mostrados en las Figuras 2 y 4 respectivamente para el período 2014-2015, el 43% está fuera del LCA, mientras que tan sólo el 1% está fuera del LMP.

La Ley Federal no explica la razón de la discrepancia en el número de parámetros entre los LMP y los LCA, aunque se advierte que en general los valores son más altos para el caso de los primeros; es decir, se espera que las concentraciones de contaminantes en aguas residuales de descarga sean por naturaleza altas. Sin embargo, asegurar que una vez mezcladas con las aguas presentes en el cuerpo receptor, sus concentraciones bajarán a niveles compatibles con los lineamientos, es tan riesgoso como incierto. La combinación final dependerá de los volúmenes mezclados de agua, del flujo final, la velocidad de mezcla y de los componentes fisicoquímicos y microbiológicos contenidos en el agua del cuerpo receptor al momento de la descarga, ya que esto podría originar la formación de compuestos diferentes a los metales pesados originalmente drenados, implicando quizás mayor toxicidad. Por citar un ejemplo, si el cuerpo de agua receptor tiene un volumen relativamente bajo, no tendrá la capacidad suficiente para diluir las concentraciones de metales a niveles aceptables, como los establecidos por los lineamientos para proteger la vida acuática.

También sobresale de los resultados el gran número de ocasiones en que aparecen en la base de datos las nomenclaturas ND y NE. Como se señaló, ND puede ser asumido como no detectable, lo que para nuestro ejercicio se traduce en que se considera dentro del lineamiento o límite permisible. La nomenclatura que es más ambigua es la NE: “Análisis no efectuado”

(CONAGUA, 2016), la cual podría asumirse que se debe a lo efímero que actualmente es el río Sonora; sin embargo, como fue registrado por Díaz y colaboradores (2016), también la base de datos de agua subterránea presenta este problema, lo cual es inesperado en ese caso, ya que de los pozos se puede obtener agua prácticamente durante todo el año. Esta falta de consistencia es más extraña por el hecho de que los meses de julio, agosto y septiembre reflejan un buen número de NE, a pesar de ser el tiempo en que el escurrimiento comienza a fluir debido a las lluvias del Monzón Norteamericano. Además, el gran número de NE durante los meses de verano dificulta la comparación entre el 2014, cuando ocurrió el evento, con el 2015, un año después.

El caso estudiado en el río Sonora ejemplifica varios de los aspectos señalados por Gutiérrez y Emanuelli (2010) sobre las problemáticas en torno a la aplicación de las normas oficiales mexicanas y su ineficacia para supervisar los niveles de calidad del agua, así como por Ibarra y Moreno (2017), respecto a la ineficacia de los mecanismos existentes en la legislación mexicana para que la población afectada por el derrame de 2014 pueda acceder a la justicia ambiental.

El denominado por Aboites (2009) modelo mercantil-ambiental en el manejo del agua, instaurado desde mediados de la década de 1980 en México, y cuyo propósito era valorizar el agua y entregarla al mercado para hacer más eficiente su uso y forma de distribución, a través de instrumentos como la Ley Federal, no ha promovido el cuidado ambiental, ni el aumento de la inversión pública y privada en el sector.

Así pues, en el afán de mercantilizar la naturaleza, pareciera que un pago económico es suficiente para resarcir la falta de protección a la vida acuática. Si asumimos que los servicios ambientales hidrológicos que proveen los ríos sostienen beneficios que sólo pueden suministrarse bajo condiciones de buen funcionamiento ecosistémico, es decir, con la interacción adecuada de los procesos naturales y sociales (Madrid, 2011, p. 53), el principio de “el que contamina paga” es un esquema que permite evadir la responsabilidad social del cuidado y la conservación de los recursos naturales ante eventos antropogénicos. En el río Sonora, hasta este momento, la protección a la vida acuática es considerada una externalidad ambiental negativa en la que las autoridades no han reparado lo suficiente y que los investigadores no pueden medir con las metodologías enfocadas al estudio de los caudales ecológicos.

De esta manera, el mensaje que se emite a la sociedad, en torno al cuidado de nuestros recursos naturales y los beneficios que éstos nos prestan, es que la persona jurídicamente física o moral que pague económicamente la descarga

de agua de insuficiente calidad a los ecosistemas naturales podrá realizarlo dentro de la ley. Esto está evidenciado en el estudio de percepción de los habitantes del río Sonora afectados por el derrame, quienes centran las consecuencias del daño ambiental en la indemnización y apoyos económicos obtenidos por el mismo (Ortiz et al., 2016, p. 8) y no en las afectaciones al sistema hidrológico y su vida acuática.

## **7. CONCLUSIONES**

El contrastar la base de datos del monitoreo de calidad del agua realizado por el Fideicomiso Río Sonora con los LMP y los LCA establecidos en la Ley Federal, si bien es sólo un ejercicio académico, nos da pauta para evidenciar el estado de amenaza y vulnerabilidad en el que se encuentra la vida acuática en el río Sonora.

En los resultados se pueden observar algunos aspectos críticos, como la diferencia en número y permisibilidad de los lineamientos en comparación con los límites máximos permisibles. Esta diferencia en el número de parámetros es inexplicable, aún más por tratarse de parámetros fundamentales para la protección de la vida acuática. Acerca de la permisibilidad de los parámetros, en los resultados queda manifiesto que esto repercute en los casos que exceden el umbral aceptable: mientras del total de las muestras graficadas el 43% está fuera del LCA, únicamente el 1% está fuera del LMP. Las fallas en la consistencia de la base de datos, como quedó reflejado en el caso de los valores NE, es también un tema significativo.

Adicionalmente, remarcamos que el hecho de que ambos conjuntos de parámetros (LCA y LMP) aparezcan en la Ley Federal, con un objetivo eminentemente recaudador es, por lo menos, un indicio de que en México impera un paradigma mercantilista del agua. Este paradigma podrá abonar a tener finanzas más sanas en la recaudación fiscal mexicana; sin embargo, dado su laxo énfasis en la protección de los servicios ambientales, puede contribuir a la pérdida de éstos mediante el fomento de una cultura en la que se acepta, sin mayores repercusiones que las pecuniarias, el hecho de pagar por contaminar y no garantizar la supervivencia de la vida acuática y la no acumulación de los metales pesados en la biota del lugar.

Es necesario avanzar hacia cambios paradigmáticos que contemplen el cambio en la representación del entorno natural y la creación de metodologías más sustentadas e inscritas como normas oficiales mexicanas de observancia obligatoria, a fin de contar con mecanismos específicos que permitan visualizar las implicaciones ambientales reales de las prácticas políticas y económicas en las que involucramos a nuestros ecosistemas.



## 8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado para la realización de este estudio por el Instituto

Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI) CRN3056, que a su vez es apoyado por la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (*Grant* GEO-1128040). También agradecemos la colaboración de *Lloyd's Register Foundation*, una fundación de caridad que ayuda a proteger la vida y la propiedad mediante el apoyo a la educación relacionada con la ingeniería, la participación pública y la aplicación de la investigación.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboites, L. 2009. *La decadencia del agua de la nación*. El Colegio de México.

Bogan, M. T., Noriega-Felix, N., Vidal-Aguilar, S. L., Findley, L. T., Lytle, D. A., Gutiérrez-Ruacho, O. G., ... Varela-Romero, A. 2014. Biogeography and conservation of aquatic fauna in spring-fed tropical canyons of the southern Sonoran Desert, Mexico. *Biodiversity and Conservation*, 23(11): 2705–2748.

Borgmann, U., Couillard, Y., Doyle, P., & Dixon, G. 2005. Toxicity of sixty-three metals and metalloids to *Hyalella Azteca* at two levels of water hardness. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24(3): 641–652.

Chávez Toledo, C., Macías, A., Gutiérrez, Ó. G., Mercado, M. G., Bustamente, A. K., & Duarte, H. 2013. Análisis estacional de factores ambientales y su influencia sobre la ictiofauna del río Bacanuchi. *Contaminación Y Ambiente*, (29): 258.

Chávez Toledo, C., Rodríguez, J. C., & Rojero Díaz, Elvira. 1989. Resultados preliminares del Estudio de Macroinvertebrados Acuáticos y Peces del Río Sonora y su afluente el Río Bacanuchi. *Vinculación*, 1(14): 21–28.

CONAGUA. 2013. Programa Detallado de Acciones de Gestión Integral para la Restauración Ecológica del Río Sonora. Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA. 2016. MEMORANDO No. 800.7.00.00.01.-319. Comisión Nacional del Agua.

Díaz Caravantes, R. E., Duarte Tagles, H., & Durazo Gálvez, F. M. 2016. Amenazas para la salud en el Río Sonora: análisis exploratorio de la calidad del agua reportada en la base de datos oficial de México. *Revista Salud UIS*, 48(1), 91–96.

DOF. 1989. Acuerdo por el que se establecen los Criterios Ecológicos de Calidad del Aguas CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la federación. Recuperado de [www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4837548&fecha=13/12/1989)

DOF. 2000. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para

uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de La Federación*.

DOF. 2010. NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Diario Oficial de la federación.

DOF. 2012. NMX-AA-159-SCFI-2012. “Que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.” Diario Oficial de la federación. Recuperado de <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166834/NMX-AA-159-SCFI-2012.pdf>

Domitrovic, H. A. 1997. El empleo de peces autóctonos para la realización de ensayos de toxicidad: evaluación de la especie *Aequidens portalegrensis* (Hensel, 1870). *Ictiología*, 5(1–2): 37–42.

Gómez Álvarez, A., Grijalva, J. M., & Aguirre, J. C. 1997. Estudio de la calidad físico-química del agua de la presa Abelardo L. Rodríguez, Sonora. *Boletín Del Departamento de Geología*, 14(1): 47–62.

Gómez Álvarez, A., Meza, D., Valenzuela, J., Villalba, A., & Ramírez, J. 2014. Behavior of Metals Under Different Seasonal Conditions: Effects on the Quality of a Mexico-USA Border River. *Water Air Soil Pollut*, 225, p. 2138.

Gómez Álvarez, A., Valenzuela, J., Villalba, A., Meza, D., Almendariz, F., Whitaker, T., ... Ochoa, L. 2011. Distribution of heavy metals and their chemical speciation in sediments from the Abelardo L. Rodríguez Dam, Sonora, México. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 23(4): 201–212.

Gómez Álvarez, A., Villalba, A., Acosta, G., Castañeda, M., & Kamp, D. 2004. Metales pesados en el agua superficial del río San Pedro durante los años 1997 y 1999. *Internacional de Contaminación Ambiental*, 20(1): 1–8.

Gómez Álvarez, A., Villalba Atondo, A., Grijalva Chon, J. M., & Yepiz Velazquez, L. M. 1994. Diagnóstico y evaluación de los parámetros físico-químicos en agua y sedimento, así como la determinación de metales pesados en la población de tilapia (*Oreochromis sp*) en la presa Abelardo L. Rodríguez. CICTUS, Universidad de Sonora.

Gómez Álvarez, A., Yocupicio, M. T., & Ortega, P. 1990. Niveles y distribución de metales pesados en el río Sonora y su afluente el río Bacanuchi, Sonora, México, 1(2): 10–20.

Gómez Álvarez, A., Yocupicio, M. T., & Ortega, P. 1993. Concentraciones de Cu, Fe, Mn, Pb y Zn en los sedimentos del río Sonora y de su afluente



- el río Bacanuchi, Sonora, México. *Boletín Del Departamento de Geología*, 10(1): 49–62.
- Gutiérrez, M., & Romero, F. 2015. Valoración del daño ambiental en la Cuenca del Río Sonora, asociado al derrame del 06 de agosto de 2014 de Buena Vista del Cobre. In *Memorias de la XXXI Convención Internacional de Minería* (pp. 604–616). Acapulco, Guerrero, México: AIMMGM.
- Gutiérrez, R., & Emanuelli, M. S. 2010. Régimen jurídico del agua continental en México: un análisis crítico. In B. Jimenez, M. L. Torregrosa, & L. Aboites (Eds.), *El Agua en México. Cauces y Encauces* (647–679). Academia Mexicana de Ciencias.
- Ibarra, F., & Moreno Vázquez, J. L. 2017. La justicia ambiental en el río Sonora. *Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 10(9), En prensa.
- Instituto Tecnológico de Sonora. 2008. *Informe Final para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Sonora, del proyecto de investigación: Monitoreo de la calidad del agua subterránea en la cuenca alta y media del río Sonora* (No. CEA-ED-PR-EST-08-013). Hermosillo, Sonora: Instituto Tecnológico de Sonora.
- Madrid Ramírez, L. 2011. Los pagos por servicios ambientales hidrológicos: Más allá de la conservación pasiva de los Bosques. *Investigación Ambiental Ciencia Y Política Pública*, 3(2): 52–58.
- Ortiz Valdez, A., Tapia Fonllem, C., & Rascón Arriaga, F. 2016. *Percepción acerca de la contaminación del Río Sonora, en habitante de los pueblos cercanos*. Presented at the Primer congreso nacional de educación ambiental para la sustentabilidad, Chiapas, México.
- Postel, S., & Richter, B. 2003. *Rivers for life: managing water for people and nature*. Washington, D.C: Island Press.
- Romo León, J. R., Castellanos Villegas, A., & Méndez Estrella, R. 2014. *Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía - Consejo de Cuenca Alto Noroeste* (Reporte Técnico). México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- SEMARNAT. 2003. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2014. Derrame de sulfato de cobre en el Río Bacanuchi (afluente del Río Sonora). Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. 2015. Fideicomiso Río Sonora. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de [www.fideicomisoriosonora.gob.mx/](http://www.fideicomisoriosonora.gob.mx/)
- SEMARNAT. 2016. Ley Federal de Derechos. Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- UNAM. 2016. *Evidencias de las afectaciones a la integridad funcional de los ecosistemas del Río Bacanuchi y el Río Sonora por el derrame de la mina Buena Vista del Cobre: avances del diagnóstico ambiental*. Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, Instituto de Ecología, UNAM.
- Villalba Atondo, A., Gómez Álvarez, A., & Gallegos, G. 1997. Distribución de metales pesados en el sedimento de la presa Abelardo L. Rodríguez, Hermosillo, Sonora, México. *Boletín Del Departamento de Geología*, 14(1), 1–12.
- WHO. 2011. *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed.). Switzerland: World Health Organisation.