

**Aplicación de ciencias ómicas en biorremediación de cuerpos de agua dulce: presa  
“La Zacatecana”.**

**Application of omic sciences in bioremediation of freshwater bodies: dam "La  
Zacatecana"**

**Natalia Frías Reid<sup>1</sup>, Daniel Gonzales Gutierrez<sup>1</sup>, Brenda Gracia Nava<sup>1</sup>, Orlando  
Aguilar Rodarte<sup>1</sup>, Christian Molina-Aguilar<sup>1,2\*</sup> y Bárbara Moguel<sup>1,2\*</sup>**

<sup>1</sup> Escuela de ingeniería y ciencias. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de  
Monterrey. Campus Querétaro. Epigmenio González 500 Fracc. San Pablo 76130  
Querétaro, Qro.

<sup>2</sup> Laboratorio Internacional de Investigación sobre el Genoma Humano, Universidad  
Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Blvd Juriquilla 3001, Santiago de  
Querétaro 76230, México. \*Autores para correspondencia: Christian Molina-Aguilar:  
[christian\\_molina@tec.mx](mailto:christian_molina@tec.mx), 4423336504 y Bárbara Moguel: [bbmoguel@tec.mx](mailto:bbmoguel@tec.mx),  
5512232882.

**RESUMEN.** Los metales pesados son constituyentes naturales del medio ambiente, sin embargo, su uso indiscriminado ha alterado los ciclos geoquímicos y el balance bioquímico, liberando en exceso metales pesados (mercurio, níquel, cobre, plomo, etc.) al suelo, sedimentos y ambientes acuáticos, causando en el ser humano y en la biota acuática bioacumulación en tejidos suaves por exposición prolongada, generando posibles efectos deletéreos. La biorremediación mediada por microorganismos es una tecnología prometedora, segura y efectiva. Sin embargo, su capacidad metabólica y cinética aún se encuentra en desarrollo, así como su respuesta a factores bióticos y abióticos, impidiendo a la fecha el diseño de métodos biorremediativos sensibles y su ejecución a gran escala. Para abordar la faltante información, la implementación de enfoques ómicos, como la metagenómica, transcriptómica, entre otras, brindan una visión global de las comunidades de los organismos y sus interacciones dentro de un ecosistema, permitiendo comprender sus mecanismos celulares. En este artículo se discute el caso de la presa “La Zacatecana”, donde se propone el abordaje de un enfoque ómico el cual permitiría ampliar la imagen global del proceso de la biorremediación de metales pesados en esta presa y exponer el potencial de la aplicación de ciencias ómicas en la biorremediación como método de análisis en el momento de la restauración del balance ecológico, sirviendo como propuesta para la bioremediación de otros cuerpos de agua tanto en nuestro país como en otras regiones del planeta.

**ABSTRACT.** Heavy metals are natural components of the environment, but their indiscriminate use has altered geochemical cycles and the biochemical balance, releasing heavy metals (mercury, nickel, copper, lead, etc.) into the soil, sediments and aquatic environments, causing bioaccumulation in soft tissues by prolonged exposure with possible deleterious effects in humans and aquatic biota. Bioremediation mediated by microorganisms is a promising, safe and effective technology. However, their metabolic and kinetic capacity are still in development, as well as their response to biotic and abiotic factors, preventing the design and implementation of sensitive bioremedial methods on large scale to date. The application of omics approaches, such as metagenomics, transcriptomics, amongst other, provides a global view of the organism's communities and their interactions within an ecosystem to address the lack of information, allowing them to understand their cellular mechanisms. In this article we discussed the case of the dam "La Zacatecana", proposing an omic approach; allowing to broaden the global image of the heavy metal bioremediation process in this dam and expose the potential of the application of omic sciences in bioremediation as a method of analysis to restoring the ecological balance. This could serve as a proposal for the bioremediation of other bodies of water both in our country and in other regions of the planet.

**Palabras clave:** Biorremediación, Ciencias ómicas, Cuerpo de Agua, Metagenómica, Metales pesados.

**Key words:** Bioremediation, Freshwater bodies, Heavy metals, Metagenomics, Omics science.

## **INTRODUCCIÓN**

Con el crecimiento industrial se ha evidenciado el aumento de los desechos de residuos industriales al medio ambiente provocando una acumulación de metales pesados, especialmente en áreas urbanas (Dixit et al., 2015). Esta indiscriminada acumulación de metales pesados en el suelo y el agua tiene un alto impacto en los ecosistemas, ya que éstos no se pueden descomponer en sus formas no tóxicas. Provocando daño a los ecosistemas y por ende generando un efecto tóxico para el ser humano.

Los metales pesados relacionados a los desechos industriales son clasificados como tóxicos, incluso en bajas concentraciones, por ejemplo arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb), mercurio (Hg), entre otros (Covarrubias & Cabriales, 2017; Dixit et al., 2015; Mancilla-Villa et al., 2012). Estos metales se han propuesto no sólo como citotóxicos sino también como carcinogénicos y mutagénicos en la naturaleza, debido a esto los acuíferos contaminados necesitan ser analizados y se deben buscar estrategias que ayuden a disminuir las concentraciones de metales pesados, elementos traza y contaminantes, para promover ambientes saludables para los seres vivos (Dixit et al., 2015). Por ejemplo, en el área de Taejon en Corea (Kim et al., 1998), en la zona de Gebze en Turquía (Yaylali-Abanuz, 2011) o en el sur de Taiwán (Lin et al., 2013), existe un gran número de industrias que producen desechos tóxicos y se presentan altos índices de contaminación por metales pesados, los cuales pueden estar provocando efectos dañinos en la salud del ser humano.

Tanto a nivel nacional como en otros países existen lineamientos que deben atenderse, ya que permiten ciertos niveles de metales en el agua potable, la cual es usada en el día a día de las personas. Presentamos una comparativa de lo permisiva que puede llegar a ser la reglamentación en México respecto a la cantidad de estos metales en el agua potable comparándolos con la reglamentación aplicada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos (Tabla 1). Cabe resaltar que existen casos en los cuales México ha establecido límites más estrictos que la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, como por ejemplo, plomo y cadmio (Tabla 1).

**Tabla 1.** Lista de metales pesados y sus límites máximos permisibles en agua potable por la SEMARNAT (ppm), límite reglamentario de Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) (ppm) (Mancilla-Villa et al., 2012), y los efectos tóxicos que cada metal ocasiona (Covarrubias & Cabriaes, 2017) en la salud del ser humano (Dixit et al., 2015).

Metal pesado	Límite Reglamentario SEMARNAT (ppm)	Límite Reglamentario EPA (ppm)	Efectos tóxicos
As	0.1	0.01	Alteraciones de procesos celulares como la síntesis de ATP y fosforilación oxidativa.
Ni	2	0.2	Erupciones cutáneas, cáncer de pulmón, nariz e infecciones de garganta, neurotóxicos, genotóxicos, afecta la fertilidad.
Hg	0.005	2.0	Temblores, fatiga, estallidos de temperamento, depresión, inquietud, pérdida de cabello, alteración de la visión, daño cerebral, insuficiencia renal y pulmonar.
Cd	0.1	5.0	Mutagénico, carcinogénico, influencia en la regulación de calcio.
Cr	0.5	0.1	Causa pérdida de cabello.
Pb	0.2	15	Riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares, pérdida de memoria de corto plazo, dificultades en la coordinación

			y habilidades de aprendizaje.
Se	-	50	Afecta las funciones endocrinas, hepatotoxicidad, desórdenes gastrointestinales y deteriora la actividad de células NK.
Zn	10	0.5	Fatiga y mareos.
Ba	-	2.0	Presión arterial alta, arritmia cardiaca, espasmos musculares, disfunción gastrointestinal.
Ag	-	0.10	Dolor estomacal, pigmentación de la piel y tejidos en tonos de azul a gris, irritación de pulmones y garganta, problemas para respirar.

La actividad humana ha impactado la composición química de los cuerpos de agua durante el paso del tiempo, afectando a la salud pública y a la economía de las poblaciones humanas (Barba, 2002), además, hay un impacto negativo en los ecosistemas, lo cual impide el consumo del vital líquido (Gómez & Flores-Díaz, 2013). En México, una gran cantidad de cuerpos de agua, por ejemplo, el Lago de Xochimilco (Moreno-Bonett et al., 2012) y el Lago de Chapala (González et al., 2018), se encuentran contaminados con metales pesados que sobrepasan sus valores de referencia propuestos por la SEMARNAT (Brito et al., 2015), comprometiendo la calidad de los cuerpos de agua de México y así la salud de las poblaciones aledañas.

Un cuerpo de agua se considera cualquier extensión de agua sobre la superficie terrestre (ríos, lagos, mares) o por debajo de la superficie (acuíferos y ríos subterráneos) (Langbein & Iseri, 1995). Estos cuerpos son considerados fuentes de transformación de materiales biológicos y químicos, ya que pueden filtrar y absorber ciertos contaminantes naturales dentro de los ciclos químicos e hidrológicos (Sánchez, 2007), dando lugar a una significativa diversidad de microorganismos, los cuales permiten mantener balanceadas las concentraciones de dichos compuestos y microbiota por diferentes procesos naturales (Gómez & Flores-Díaz, 2013).

Existen diversos métodos para remover los metales pesados del agua, incluyendo, la precipitación química, oxidación/reducción, filtración, cambio de iones, osmosis reversa, tecnología de membrana, evaporación y tratamiento electroquímico. Sin embargo, muchos no son efectivos cuando las concentraciones de metales pesados son menores a 100 mg/L, debido a que las sales de metales pesados son solubles en agua y son disueltos

en aguas residuales, por lo que no pueden ser separados por métodos de separación física (Dixit et al., 2015).

Por su parte, los métodos remediativos biológicos como la bioabsorción, y/o la bioacumulación, resultan ser una buena opción, ya que remueven metales y son una alternativa a los métodos de separación física teniendo un enfoque amigable con el ambiente, al remediar por medio de microorganismos (Dixit et al., 2015). Estos métodos están basados en las interacciones de los microorganismos, los compuestos contaminantes y las condiciones del medio (Pandey et al., 2019). Los microorganismos son capaces de tomar metales pesados de forma activa (bioacumulación) y/o de forma pasiva (bioabsorción), siendo la bioabsorción la más factible para la aplicación a gran escala (Dixit et al., 2015), ya que la pared celular de estos microorganismos, que consiste principalmente de polisacaridos, lipidos y proteínas, ofrece varios grupos funcionales que pueden unirse a iones de metales pesados, los cuales incluyen carboxilo, hidroxilo, amino y grupo fosfato.

Diferentes especies de bacterias, hongos, levaduras y algas han desarrollado mecanismos de resistencia a los metales pesados bajo concentraciones menores a las mínimas inhibitorias y gracias a las propiedades intrínsecas de su pared celular o la presencia de polímeros extracelulares (Diels et al., 2010) remueven los compuestos metálicos a través de sus mecanismos biológicos. Gracias a esta capacidad de remoción de metales, se convierten en una herramienta elegante y con bajo impacto en procesos de biorremediación y tratamiento de cuerpos de agua contaminados (Tabla 2) (Gallert & Winter, 2005).

Los mecanismos empleados por los microorganismos pueden ser A) La bioprecipitación, la cual ocurre al oxidar compuestos orgánicos o hidrógeno molecular y reducir sulfato en sulfuro simultáneamente (Diels et al., 2010); B) La bioacumulación, proceso metabólico activo, dependiente de la energía de la célula que transporta metales pesados por medio de complejos de importación y rutas de translocación, acumulándolo en el espacio intracelular (Diep et al., 2018); C). La bioadsorción, es un proceso pasivo en que los metales son incorporados a la superficie de compuestos biológicos (Limcharoensuk et al., 2015); D). La biolixiviación, que consiste en solubilizar compuestos metálicos como óxidos metálicos y sulfuros de las matrices sólidas (Fonti et al., 2016; L. Kumar & Bharadvaja, 2020) por medio de microorganismos acidófilos o metabolismos oxidativos de hierro/azufre bajo condiciones aerobias (Fonti et al., 2016); y E) Los biofilmes, que son estructuras de células microbianas y sustancias poliméricas extracelulares que se comportan como mecanismos de resistencia ante las condiciones de estrés generadas por metales pesados, permitiendo a los microorganismos asociados sobrevivir y persistir (R. Singh et al., 2006; Teitzel & Parsek, 2003) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Bacterias con potencial biorremediativo. Clasificación por especie o cepa identificada, tinción de gram, metal pesado y mecanismo celular cuya remediación se ha asociado.

Bacteria	Tinción	Metal	Mecanismo	Referencia
----------	---------	-------	-----------	------------

	Gram	remediado	celular	
<i>Bacillus sp.</i> PZ-1	+	Pb	Bioadsorción	(Ren et al., 2015)
<i>Geobacillus thermodenitrificans</i>	+	Fe, Cr, Co	Bioadsorción	(Chatterjee et al., 2010)
<i>Amycolatopsis sp.</i> ABO	+	Cu	Bioacumulación	(Albarracín et al., 2008)
<i>Anoxybacillus mongoliensis</i>	+	Ni, Co	Bioacumulación	(Akkoyun et al., 2020; Namsaraev et al., 2010)
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i> Dd8301	+	Fe, Zn	Bioprecipitación	(Diels et al., 2010; Stanley & Southam, 2018)
<i>Scytonema sp.</i> ING-1	-	Pb, Cd, Ni, Cu	Bioprecipitación	(Podda et al., 2000)
<i>Pseudomonas putida</i>	-	Cu, Zn	Biofilm	(Araújo & Oliveira, 2019; Dar et al., 2020; Smalla et al., 2006; Teitzel & Parsek, 2003; Toner et al., 2005)
		Hg	Volatilización	
<i>Cupriavidus metallidurans</i> CH34	-	Au	Biofilm	(Araújo & Oliveira, 2019)
		Hg	Volatilización (OGM)	(Rojas et al., 2011)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	-	Hg	Volatilización	(Teitzel & Parsek, 2003)
		La	Biofilm	

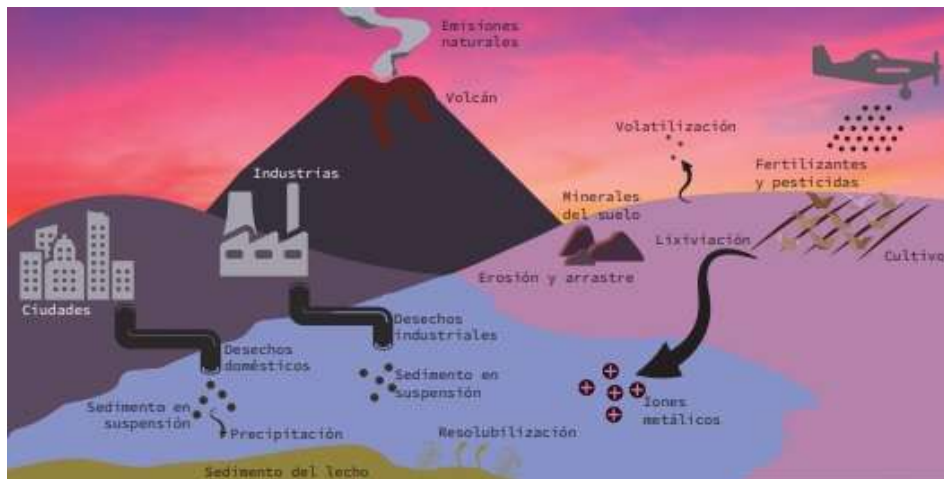
<i>Pseudomonas syringae</i>	-	Cu	Bioacumulación	(Teitzel & Parsek, 2003)
		La	Biofilm	
<i>Burkholderia cepacia</i>	-	Pb	Biofilm	(Teitzel & Parsek, 2003)

El uso de microorganismos como tratamiento para disminuir la concentración de metales pesados se propuso al observar, el crecimiento de aislados microbianos procedentes de ambientes contaminados, en presencia de estos metales (Mena Alberca & Rafael Campos, 2017). En el estudio se observa el laborioso proceso de la determinación de un microorganismo y su eficiencia en la biorremediación de metales pesados en cuerpos de agua dulce, demostrando la capacidad de sobrevivir en ambientes con elevadas concentraciones de metales y utilizarlos remediando el ambiente donde se encuentran (Mena Alberca & Rafael Campos, 2017).

No obstante esta solución se debe plantear a largo plazo con el compromiso de la industria, gobierno y el equipo científico para evitar descarga de residuos tóxicos en la zona a tratar, respetando el tiempo de duración que requiere la recuperación del sitio. De lo contrario, el aumento de las actividades industriales sin ninguna restricción y el daño continuo puede llevar a un daño sin retorno (Garzón et al., 2017).

Las ciencias ómicas han surgido como una serie de herramientas que permitirían la resolución de problemáticas complejas y multivariadas en diferentes índoles. Particularmente, hablando de la biorremediación buscan el estudio entre las interacciones de las moléculas y los sistemas biológicos, las principales son: A) La metagenómica, esta ómica estudia la información genética contenida en el ambiente de estudio permitiendo identificar el potencial y la taxonomía de las comunidades microbianas (Pérez-Llano et al., 2018). B) La transcriptómica, esta estudia la expresión de los genes utilizando análisis detallados de moléculas de RNA mensajero (mRNA) relacionando el genoma con el proteoma y el fenotipo celular expresado (O. V. Singh, 2006). C) La proteómica, la cual busca la relación del fenotipo expresado con las acciones de las proteínas, esta utiliza métodos de separación como espectrometría de masa (MS) o electroforesis de gel de poliacrilamida bidimensional (2-DE) (O. V. Singh & Nagaraj, 2006). y D) Metabólica, teniendo como objetivo generar el perfil de moléculas a partir de su metabolismo, la cual es un resultado de las reacciones de redes bioquímicas dentro de la célula (Liu & Locasale, 2017).

Los metales pueden disolverse tanto en iones o complejos metálicos, dejando rastros en los sedimentos o precipitados en suspensión (Figura 1), siendo sensibles a los cambios fisicoquímicos del medio (Nazeer et al., 2014; Saygı & Yiğit, 2012), por lo cual los sedimentos en el lecho y en suspensión son los indicadores más sensibles para determinar la contaminación por metales pesados a largo plazo y variación a corto plazo respectivamente (Nazeer et al., 2014).



**Figura 1.** Fuentes de contaminación y distribución de metales pesados en cuerpos de aguas superficiales. Los metales pesados se encuentran en solución (iones metálicos), suspensión (sedimento suspendido) y precipitados (sedimento del lecho). Los flujos de entrada naturales y antropogénicos son significativos y persisten en el medio. Los flujos de salida por fenómenos de volatilización son reducidos (Elaboración propia).

Aunque en los últimos años los estudios ómicos se han empleado en diferentes áreas para crear un diseño experimental, en cada caso particular, es importante ya que se deben considerar el tamaño y tipo de las muestras, así como su control de calidad, costo/tiempo y el equipo disponible para realizar las pruebas (Bedia, 2018). De igual manera las ciencias ómicas han contribuido en la recopilación de información biológica sobre las comunidades microbianas y sus mecanismos celulares involucrados en diversos procesos biológicos y sus interacciones (Desai & Ardekani, 2020), permitiendo generar una visión global de las moléculas que conforman a una célula, tejido, órgano y organismo, así como la detección universal de genes, mRNA, proteínas y metabolitos (P. Kumar et al., 2019).

## ESTUDIO DE CASO

Para abordar un ejemplo de la aplicación de las ciencias ómicas en un ambiente acuático se eligió la presa La Zacatecana, ya que existe una trayectoria en estudios relacionados a su contaminación por metales pesados, realizados por el equipo liderado por Rubén Octavio Méndez Márquez en 2017 y en 2018 por Huerta y colaboradores. La presa La Zacatecana, también es conocida como la presa de El Pedernalillo, siendo un buen ejemplo de contaminación por metales pesados. Este lago artificial se encuentra ubicado en el estado de Zacatecas, México y acumula agua de lluvia que desemboca en varios ríos, trayendo consigo metales pesados (Medina et al., 2007), los cuales son depositados en esos cauces desde la época colonial derivado de la amalgamación, técnica minera para extracción de plata y oro, que aún se realiza. El vertido de desechos provenientes de empresas metalúrgicas, agrícolas y mineras, han provocado el incremento de los niveles de Mercurio (Hg) y Plomo (Pb), entre otros metales pesados (Rodríguez, 2017).



La toxicidad aguda por mercurio es rara, y las exposiciones breves y esporádicas a las concentraciones ambientales (tal es el caso en actividades recreativas) no suelen ser factores de riesgo considerables. Sin embargo, la bioacumulación de mercurio en el cuerpo de agua proveniente de fuentes naturales (erosión, incendios) y antropogénicas (minería, pesticidas, pinturas, combustión de combustible, fertilizantes) (De et al., 2014) han provocado el aumento de la exposición al mismo, tanto de la flora y fauna, como de la población humana (Huerta García et al., 2018).

### *Biorremediación de Hg en cuerpos de agua*

Desde 2015, un grupo de científicos de la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas, han investigado las capacidades biorremediadoras de microorganismos para reducir la concentración de Hg en la Presa de la Zacatecana (El Pedernalillo), y han encontrado que algunas especies como las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* y los hongos *Candida albicans* y *Aspergillus niger*, tienen potencial como organismos biorremediadores para el mercurio (Rodríguez, 2017).

Por otro lado en el 2011, Rojas y colaboradores realizaron un estudio sobre los genes resistentes a Hg y su introducción al modelo en la bacteria *Cupriavidus metallidurans* CH34, la cual contiene material genético que proporciona resistencia a los compuestos de Hg gracias a sus plásmidos pMOL28 y pMOL30. Con estos resultados se determinó que la introducción del plásmido pTP6 (IncP-1 $\beta$ ), que solo posee genes de resistencia al Hg tales como *merA* o *merB*, a la cepa *Cupriavidus metallidurans*-MSR33 fue exitosa al identificar la presencia del gen *merB* por medio de PCR, posteriormente se realizó una prueba en un biorreactor utilizando este modelo como un biocatalizador para la remediación de soluciones líquidas contaminadas con Hg<sup>2+</sup> resultando en una eliminación del 80% al 100% de Hg en presencia de tioglicolato (Rojas et al., 2011).

Huerta y colaboradores (2018) realizaron una investigación sobre las concentraciones de Hg, Pb, entre otros metales pesados en el sedimento de la presa de La Zacatecana, además evaluaron los niveles de los metales encontrados dentro de los suelos agrícolas y los productos, obteniendo niveles promedio de 13.4 ppm de Hg (mg/Kg) en el 2018, de igual manera compararon los niveles con una investigación previa realizada en el 2009 en la cual obtuvieron un nivel promedio de 6.876 ppm de Hg (mg/Kg), observaron que los niveles de Hg se duplicaron en un lapso de 7 años. No obstante estas concentraciones se mantienen debajo de los límites permisibles de las Normas Mexicanas (NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004) estableciendo como límite 23 ppm de Hg (mg/Kg) (Huerta García et al., 2018).

En contraste, estos niveles sobrepasan las Normas Internacionales Canadienses, CEQG- (Canadian Environmental Quality Guidelines), la cual establece dos valores parámetro para el Hg; ISQG (Interim Sediment Quality Guideline), el nivel por el que debajo de este no ocurrirá algún efecto biológico adverso (0.17 ppm [mg/Kg]), y PEL (Probable Effect Level), el nivel en donde frecuentemente ocurren efectos biológicos adversos (0.486 ppm [mg/Kg]) (Gaudet et al., 1995). Esto muestra una diferencia muy grande entre las regulaciones mexicanas e internacionales pues es evidente que existen condiciones de contaminación comparablemente peligrosas pero que en México no se consideran así (Flores et al., 2018; Saygı & Yiğit, 2012).

Con base en los estudios de Huerta y cols. 2018, la investigación liderada por Rubén Octavio Méndez Márquez (Universidad Autónoma de Zacatecas), el estudio de Rojas y cols. 2011 y el artículo de Singh y Nagaraj 2006, planteamos la reevaluación del caso de la presa “La Zacatecana” para el diseño de estrategias de biorremediación de Hg utilizando las ciencias ómicas como técnicas de estudios para observar el efecto de la introducción de los genes *mer*, la biorremediación a escala piloto y finalmente como técnicas de monitoreo de la biorremediación en esta presa.

La reducción del mercurio inorgánico  $Hg^{2+}$  o la desmetilación del mercurio orgánico  $MeHg^+$ / $Me_2Hg$ , en su forma más tóxica, a mercurio elemental,  $Hg^0$ , la forma menos nociva, permite su volatilización del sedimento (Wagner-Döbler, 2003). Por lo cual disminuir la biodisponibilidad del mercurio de los cuerpos de agua por volatilización impide su bioasimilación y le permite reintegrarse a la atmósfera y a su ciclo biogeoquímico, teniendo como posibilidad la recuperación con el uso de biorreactores (Barkay & Wagner- Döbler, 2005; Wallschläger et al., 2000).

Debe señalarse que las concentraciones de Pb en La Zacatecana están por debajo de los estándares nacionales e internacionales, no obstante se debe resaltar la necesidad de reducir sus descargas y establecer un monitoreo constante para mantener los niveles bajos. Se apela por una prueba piloto en biorreactor, seguido por una biorremediación *in situ*, la cual busca el uso de microorganismos para eliminar o absorber los contaminantes dentro del mismo sitio contaminado (Council et al., 1993); evitando ser invasivos con el ecosistema al identificar las comunidades microbianas de muestras del sedimento y agua, recopilando información biológica sobre los mecanismos celulares involucrados y confirmar su efecto con el monitoreo de la respuesta de las muestras ante la contaminación, mostrando su eficiencia en la biorremediación.

Por otra parte, Fonti y cols (2016) resaltan la importancia de la integración de las características geoquímicas del sedimento, la concentración de metales, la identificación de mecanismos y organismos potenciales; y la influencia de los factores bióticos y abióticos sobre ellos en el diseño de métodos biorremediativos. Por lo cual se sugeriría un análisis transcriptómico con una detección por PCR para identificar y amplificar el gen de resistencia a Hg que poseen los microorganismos nativos con potencial degradador, transformador o absorbente de los metales pesados (Zuñiga & Enrique, 2019).

#### *Enfoque ómico de la biorremediación de metales pesados.*

Cabe resaltar la importancia del enfoque ómico en el caso de la Zacatecana ya que la implementación de este tipo de tecnologías de alto rendimiento nos permiten completar la imagen de las comunidades microbianas que se encuentran en los cuerpos de agua, resaltando que cada cuerpo de agua o cada subcuenca, podría tener su propia estructura microbiana, sus maquinarias enzimáticas, genes, mecanismos celulares y redes metabólicas asociadas a una aplicación de biorremediación (Bhatt, 2019), permitiendo reconocer la población bacteriana y de otros organismos patógenos, como un factor ecológico importante para la vigilancia de sitios que se encuentran bajo estrés por contaminación. El monitoreo de los recambios de comunidades microbianas en respuesta a diversas concentraciones de contaminantes (Desai & Ardekani, 2020) y en diferentes épocas del año, permiten conocer mejor el proceso que el cuerpo de agua requiere para recuperarse.

En el año 2006, Singh y Nagaraj publicaron un artículo sobre las ventajas que proporcionan el uso de técnicas ómicas, ya que permite responder preguntas sobre los mecanismos moleculares involucrados en el control del proceso para la biorremediación. Del mismo modo, plantean que el uso de la transcriptómica mediante análisis de microarreglos de DNA complementario (cDNA) basado en PCR, el cual permite analizar el genoma completo de organismos sometidos en condiciones ambientales contaminadas, permitiendo evaluar la fisiología y los perfiles de la expresión de genes catabólicos del medio contaminado, ya que la microbiota tiende a adaptarse a los cambios del medio (O. V. Singh & Nagaraj, 2006).

Asimismo, explican que la expresión celular de las proteínas del organismo cambia con las condiciones ambientales provocando cambios fisiológicos por la exposición a factores externos, tal es el caso de la contaminación. En los estudios proteómicos las alteraciones de la composición o abundancia de las proteínas son consecuencias de la presencia de contaminantes específicos, por lo cual su uso dentro de la biorremediación como monitoreo de la regulación de los genes alterados es relevante (O. V. Singh & Nagaraj, 2006). De igual forma proporcionan una visión global sobre la composición proteica de los microorganismos utilizados en la biorremediación (Zhao & Poh, 2008). Por otra parte, el uso de la proteómica permite estudiar las vías metabólicas y energéticas de un organismo concediendo información del proteoma de las especies dominantes y del meta-proteoma de la comunidad microbiana encontrada en un medio contaminado (Chovanec et al., 2011).

Adicionalmente el uso de genómica funcional combinado con la proteómica permite observar las redes metabólicas y de regulación, mejorando las funciones de los genes. Por lo que en el caso de la biorremediación, tener información sobre las reacciones de los genes ante las respuestas celulares por estímulos ambientales y la inducción/expresión de las proteínas o enzimas regulatorias, provocados por la contaminación de metales, permiten comprender las condiciones de crecimiento de microorganismos con resistencia a la contaminación y mejorar el diseño de estrategias para la biorremediación (Zhao & Poh, 2008).

Otra ciencia ómica que puede contribuir a estos estudios es la interactómica, que en conjunto con la proteómica buscan generar redes de interacción de proteínas conteniendo información sobre la actividad, arreglo y destino final de estas. Dentro de la biorremediación, la interactómica se encarga de relacionar las alteraciones en la expresión de genes y sus proteínas inducidas por la presencia de metales pesados (O. V. Singh & Nagaraj, 2006). De igual manera el uso de proteo-metabolómica dentro de la biorremediación permitiría la creación de un sistema para el estudio de microorganismos específicos durante el proceso de biorremediación, proporcionando información acerca de los cambios de los organismos utilizados en la remediación (O. V. Singh, 2006). Por consiguiente, el uso simple de la metabolómica permite realizar una evaluación del proceso de biorremediación al utilizar análisis metabólicos y mejorar la eficiencia por medio de ingeniería metabólica (Villas-Bôas & Bruheim, 2007).

## CONCLUSIONES

El aumento de la contaminación es un problema persistente que deteriora la vida de los seres vivos, por lo cual la implementación de propuestas que utilizan microorganismos nativos a los sitios contaminados, los cuales se han adaptado para resistir las concentraciones extremas de metales pesados, pueden ser consideradas como la herramienta en excelencia para reducir la concentración de contaminación; ya sea metales pesados, hidrocarburos, entre otros. Por lo cual el interés de las ciencias ómicas para obtener información detallada sobre la genómica, metabolómica o proteómica del medio de los microorganismos nos permite desarrollar vías adecuadas para afrontar la biorremediación de los sitios contaminados, ya que predice las respuestas de los cambios de las concentraciones de los metales pesados y de los estímulos del medio durante el proceso de biorremediación. Además el avance de la tecnología ha permitido la combinación de las diferentes ramas de las ciencias ómicas, permitiendo explorar las variaciones de las estructuras y funciones de los microorganismos causados por los contaminantes, por lo cual es posible evaluar la eficiencia del proceso de remediación del ecosistema. En esta propuesta nos enfocamos en el uso de microorganismos, ya que uno de sus papeles principales es la regulación y balance de los ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas en donde se encuentran. Dentro de sus funciones están las de absorber, separar o eliminar los contaminantes naturales, es decir, al emplear microorganismos con una capacidad innata remediadora y a su vez incrementarla, se podrá considerar como un método amigable con el mismo ambiente. En este artículo abordamos el enfoque de la biorremediación en un lugar específico, la presa La Zacatecana, ya que existe información previa sobre análisis de la concentración de los metales pesados encontrados en el sedimento y de los posibles microorganismos con potencial biorremediador para las concentraciones de Hg que se presentan en la presa. Para abordar este tipo de problemas complejos, es necesario el establecimiento de estudios transdisciplinarios y multi-enfoques. El uso de las ciencias ómicas permitiría obtener información sobre los cambios que presenta el medio acuático, los microorganismos remediadores y los microorganismos nativos del medio, incluyendo las reacciones ante las variaciones de concentraciones del Hg en los procesos metabólicos. Por otra parte este estudio pretende resaltar la importancia que diversos sectores como, gobierno, instituciones involucradas y laboratorios públicos y privados emprendan acciones concretas para lograr un mejor ambiente, proponiendo regulaciones más estrictas que obliguen a evaluar el grado de contaminación y el riesgo que corren los cuerpos de agua, asimismo detener el vertido o la exposición de los contaminantes al medio, ya que de lo contrario se da lugar al desarrollo de problemas socioeconómicos, de salud y disminución de la biodiversidad en nuestro país.

## BIBLIOGRAFÍA

Akkoyun, M. B., Ozdemir, S., Kilinc, E., Birhanli, E., Aygün, A., & Sen, F. (2020). Resistance, removal, and bioaccumulation of Ni (II) and Co (II) and their impacts on antioxidant enzymes of *Anoxybacillus mongoliensis*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 235, 108790. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108790>

- Albarracín, V. H., Winik, B., Kothe, E., Amoroso, M. J., & Abate, C. M. (2008). Copper bioaccumulation by the actinobacterium *Amycolatopsis* sp. AB0. *Journal of Basic Microbiology*, 48(5), 323–330. <https://doi.org/10.1002/jobm.200700360>
- Araújo, L. C. A. de, & Oliveira, M. B. M. de. (2019). Effect of Heavy Metals on the Biofilm Formed by Microorganisms From Impacted Aquatic Environments. *Bacterial Biofilms*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89545>
- Barba, L.E. (2002). Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle, Cali.
- Barkay, T., & Wagner- Döbler, I. (2005). Microbial Transformations of Mercury: Potentials, Challenges, and Achievements in Controlling Mercury Toxicity in the Environment. En *Advances in Applied Microbiology* (Vol. 57, pp. 1–52). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2164\(05\)57001-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2164(05)57001-1)
- Bedia, C. (2018). Chapter Two—Experimental Approaches in Omic Sciences. En J. Jaumot, C. Bedia, & R. Tauler (Eds.), *Comprehensive Analytical Chemistry* (Vol. 82, pp. 13–36). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2018.07.002>
- Bhatt, P. (2019). *Smart Bioremediation Technologies: Microbial Enzymes*. Academic Press.
- Brito, E. M. S., De la Cruz Barrón, M., Caretta, C. A., Goñi-Urriza, M., Andrade, L. H., Cuevas-Rodríguez, G., Malm, O., Torres, J. P. M., Simon, M., & Guyoneaud, R. (2015). Impact of hydrocarbons, PCBs and heavy metals on bacterial communities in Lerma River, Salamanca, Mexico: Investigation of hydrocarbon degradation potential. *Science of The Total Environment*, 521–522, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.098>
- Chatterjee, S. K., Bhattacharjee, I., & Chandra, G. (2010). Biosorption of heavy metals from industrial waste water by *Geobacillus thermodenitrificans*. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.136>
- Chovanec, P., Basu, P., & Stolz, J. F. (2011). Application of Proteomics in Bioremediation. *Microbial Metal and Metalloid Metabolism*, 247–259. <https://doi.org/10.1128/9781555817190.ch13>
- Council et al. (1993). *In Situ Bioremediation: When Does it Work?* National Academies Press.
- Covarrubias, S. A., & Cabriales, J. J. P. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(0), 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Dar, S. A., Lone, F. A., Dar, S. A., Bhat, R. A., Bashir, I., Mir, S. A., & Dar, Z. A. (2020). Biofilm: An Innovative Modern Technology for Aquatic Pollution Remediation. En R. A. Bhat, K. R. Hakeem, & M. A. Dervash (Eds.), *Bioremediation and*

*Biotechnology, Vol 2: Degradation of Pesticides and Heavy Metals* (pp. 207–219). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-40333-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40333-1_12)

De, J., Dash, H. R., & Das, S. (2014). 6—Mercury Pollution and Bioremediation—A Case Study on Biosorption by a Mercury-Resistant Marine Bacterium. En S. Das (Ed.), *Microbial Biodegradation and Bioremediation* (pp. 137–166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00006-6>

Desai, N., & Ardekani, A. M. (2020). Biofilms at interfaces: Microbial distribution in floating films. *Soft Matter, 16*(7), 1731–1750. <https://doi.org/10.1039/c9sm02038a>

Diels, L., Geets, J., Dejonghe, W., Roy, S. V., Vanbroekhoven, K., Szewczyk, A., & Malina, G. (2010). Heavy Metal Immobilization In Groundwater By In Situ Bioprecipitation: Comments And Questions About Efficiency And Sustainability Of The Process. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy, 11*(1). <https://scholarworks.umass.edu/soilsproceedings/vol11/iss1/7>

Diep, P., Mahadevan, R., & Yakunin, A. F. (2018). Heavy Metal Removal by Bioaccumulation Using Genetically Engineered Microorganisms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 6*. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>

Dixit, R., Wasiullah, Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U. B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B. P., Rai, J. P., Sharma, P. K., Lade, H., & Paul, D. (2015). Bioremediation of Heavy Metals from Soil and Aquatic Environment: An Overview of Principles and Criteria of Fundamental Processes. *Sustainability, 7*(2), 2189–2212. <https://doi.org/10.3390/su7022189>

Flores, C. M., Del Angel, E., & Gómez, A. L. (2018). Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimento superficial de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México. *Tecnología y ciencias del agua, 09*(2), 39–57. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-02>

Fonti, V., Dell'Anno, A., & Beolchini, F. (2016). Does bioleaching represent a biotechnological strategy for remediation of contaminated sediments? *Science of The Total Environment, 563–564*, 302–319. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.094>

Gallert, C., & Winter, J. (2005). Bacterial Metabolism in Wastewater Treatment Systems. En *Environmental Biotechnology* (pp. 1–48). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/3527604286.ch1>

Garzón, J. M., Miranda, J. P. R., & Gómez, C. H. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud, 19*(2), 309–318. <https://doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Gaudet, C., Lingard, S., Cureton, P., Keenleyside, K., Smith, S., & Raju, G. (1995). Canadian Environmental Quality Guidelines for mercury. *Water, Air, and Soil Pollution, 80*(1), 1149–1159. <https://doi.org/10.1007/BF01189777>

Gómez, L., & Flores-Díaz, A. (2013). *Comportamiento de los sólidos en suspensión y*

*sedimentales en cuerpos de agua: Búsqueda de métodos aplicables al monitoreo comunitario.* <https://www.riob.org/IMG/pdf/MemoriasIIICongresoCuencas-2.pdf>

González, D., Álvarez Bernal, D., Mora, M., Buelna-Osben, H. R., Ruelas-Insunza, J. R., González, D., Álvarez Bernal, D., Mora, M., Buelna-Osben, H. R., & Ruelas-Insunza, J. R. (2018). Biomonitorio de metales pesados en plumas de aves acuáticas residentes del lago de chapala, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(2), 215–224. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.03>

Huerta García, J., Sustaita Gamboa, G. J., Romero Villegas, E. J., Ruíz García, C. S., Bluhm Gutiérrez, J., & Mandujano García, C. D. (2018). Análisis de mercurio y plomo en sedimento, suelo y cultivos (zea mays l., phaseolus vulgaris l. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 9(21), 1191–1204.

Kim, K.-W., Myung, J.-H., Ahn, J. S., & Chon, H.-T. (1998). Heavy metal contamination in dusts and stream sediments in the Taejon area, Korea. *Journal of Geochemical Exploration*, 64(1), 409–419. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(98\)00045-4](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(98)00045-4)

Kumar, L., & Bharadvaja, N. (2020). Microbial Remediation of Heavy Metals. En M. P. Shah (Ed.), *Microbial Bioremediation & Biodegradation* (pp. 49–72). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1812-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1812-6_2)

Kumar, P., Jyoti, B., Kumar, A., & Paliwal, A. (2019). Chapter 8—Biotechnological and microbial standpoint cahoot in bioremediation. En P. Bhatt (Ed.), *Smart Bioremediation Technologies* (pp. 137–158). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00008-1>

Langbein, W. B., & Iseri, K. (1995). *Science in Your Watershed—General Introduction and Hydrologic Definitions*. USGS science for a changing world. <https://water.usgs.gov/wsc/glossary.html#Stream>

Limcharoensuk, T., Sooksawat, N., Sumarnrote, A., Awutpet, T., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P., & Auesukaree, C. (2015). Bioaccumulation and biosorption of Cd<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> by bacteria isolated from a zinc mine in Thailand. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 322–330. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.08.013>

Lin, Y.-C., Chang-Chien, G.-P., Chiang, P.-C., Chen, W.-H., & Lin, Y.-C. (2013). Multivariate analysis of heavy metal contaminations in seawater and sediments from a heavily industrialized harbor in Southern Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1), 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.08.027>

Liu, X., & Locasale, J. W. (2017). Metabolomics: A Primer. *Trends in Biochemical Sciences*, 42(4), 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2017.01.004>

Mancilla-Villa, Ó. R., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., Uscanga-Mortera, E., & Ramos-Bello, R. (2012). Metales pesados totales y arsénico en el agua para riego de Puebla y Veracruz, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 28 (1) 39-48, 10.

- Medina, M. H., Correa, J. A., & Barata, C. (2007). Micro-evolution due to pollution: Possible consequences for ecosystem responses to toxic stress. *Chemosphere*, 67(11), 2105–2114. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.12.024>
- Mena Alberca, M. P., & Rafael Campos, H. A. (2017). Biorremediación de Metales Pesados con Aislados Microbianos Procedentes de Pasivos Ambientales Mineros y Aguas del Rio Hualgayoc—Cajamarca. *Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo*. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/994>
- Moreno-Bonett, C., Zugazagoitia-Herranz, R., Sánchez-Martínez, C., Córdoba-Moreno, R., & Melo-Ruíz, V. (2012). Determinación de metales pesados en el agua de un canal de Xochimilco (México, D.F.) como proyecto de Servicio Social. *Educación química*, 23(3), 375–382.
- Namsaraev, Z. B., Babasanova, O. B., Dunaevsky, Y. E., Akimov, V. N., Barkhutova, D. D., Gorlenko, V. M., & Namsaraev, B. B. (2010). *Anoxybacillus mongoliensis* sp. Nov., a novel thermophilic proteinase producing bacterium isolated from alkaline hot spring, central Mongolia. *Mikrobiologiya*, 79(4), 516–523.
- Nazeer, S., Hashmi, M. Z., & Malik, R. N. (2014). Heavy metals distribution, risk assessment and water quality characterization by water quality index of the River Soan, Pakistan. *Ecological Indicators*, 43, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.010>
- Pandey, A., Tripathi, P. H., Tripathi, A. H., Pandey, S. C., & Gangola, S. (2019). Chapter 2—Omics technology to study bioremediation and respective enzymes. En P. Bhatt (Ed.), *Smart Bioremediation Technologies* (pp. 23–43). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818307-6.00002-0>
- Pérez-Llano, Y., Martínez-Ávila, L., & Batista-García, R. A. (2018). Omics Approaches: Impact on Bioremediation Techniques. En R. Prasad & E. Aranda (Eds.), *Approaches in Bioremediation: The New Era of Environmental Microbiology and Nanobiotechnology* (pp. 43–59). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-02369-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-02369-0_3)
- Podda, F., Zuddas, P., Minacci, A., Pepi, M., & Baldi, F. (2000). Heavy Metal Coprecipitation with Hydrozincite [Zn<sub>5</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>] from Mine Waters Caused by Photosynthetic Microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(11), 5092–5098. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.11.5092-5098.2000>
- Ren, G., Jin, Y., Zhang, C., Gu, H., & Qu, J. (2015). Characteristics of *Bacillus* sp. PZ-1 and its biosorption to Pb(II). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 117, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.03.033>
- Rodríguez, É. (2017, diciembre). *Microorganismos devoradores de tóxicos*. México Ciencia y Tecnología. <http://www.cienciamx.com/index.php/ciencia/ambiente/19136-microorganismos-devoradores-toxicos>
- Rojas, L. A., Yáñez, C., González, M., Lobos, S., Smalla, K., & Seeger, M. (2011).



Characterization of the Metabolically Modified Heavy Metal-Resistant *Cupriavidus metallidurans* Strain MSR33 Generated for Mercury Bioremediation. *PLoS ONE*, 6(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017555>

Sánchez, O. (2007). *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. Instituto Nacional de Ecología.

Saygı, Y., & Yiğit, S. A. (2012). Heavy metals in Yeniçağa Lake and its potential sources: Soil, water, sediment, and plankton. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(3), 1379–1389. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2048-0>

Singh, O. V. (2006). Proteomics and metabolomics: The molecular make-up of toxic aromatic pollutant bioremediation. *PROTEOMICS*, 6(20), 5481–5492. <https://doi.org/10.1002/pmic.200600200>

Singh, O. V., & Nagaraj, N. S. (2006). Transcriptomics, proteomics and interactomics: Unique approaches to track the insights of bioremediation. *Briefings in Functional Genomics*, 4(4), 355–362. <https://doi.org/10.1093/bfgp/eli006>

Singh, R., Paul, D., & Jain, R. K. (2006). Biofilms: Implications in bioremediation. *Trends in Microbiology*, 14(9), 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.07.001>

Smalla, K., Haines, A. S., Jones, K., Krögerrecklenfort, E., Heuer, H., Schloter, M., & Thomas, C. M. (2006). Increased Abundance of IncP-1 $\beta$  Plasmids and Mercury Resistance Genes in Mercury-Polluted River Sediments: First Discovery of IncP-1 $\beta$  Plasmids with a Complex mer Transposon as the Sole Accessory Element. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(11), 7253–7259. <https://doi.org/10.1128/AEM.00922-06>

Stanley, W., & Southam, G. (2018). The effect of gram-positive (*Desulfosporosinus orientis*) and gram-negative (*Desulfovibrio desulfuricans*) sulfate-reducing bacteria on iron sulfide mineral precipitation. *Canadian Journal of Microbiology*, 64(9), 629–637. <https://doi.org/10.1139/cjm-2017-0545>

Teitzel, G. M., & Parsek, M. R. (2003). Heavy metal resistance of biofilm and planktonic *Pseudomonas aeruginosa*. *Applied and Environmental Microbiology*, 69(4), 2313–2320. <https://doi.org/10.1128/aem.69.4.2313-2320.2003>

Toner, B., Manceau, A., Marcus, M. A., Millet, D. B., & Sposito, G. (2005). Zinc Sorption by a Bacterial Biofilm. *Environmental Science & Technology*, 39(21), 8288–8294. <https://doi.org/10.1021/es050528+>

Villas-Bôas, S. G., & Bruheim, P. (2007). The Potential of Metabolomics Tools in Bioremediation Studies. *OMICS: A Journal of Integrative Biology*, 11(3), 305–313. <https://doi.org/10.1089/omi.2007.0005>

Wagner-Döbler, I. (2003). Pilot plant for bioremediation of mercury-containing industrial wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-003-1322-7>

Wallschläger, D., Herbert Kock, H., Schroeder, W. H., Lindberg, S. E., Ebinghaus, R., & Wilken, R.-D. (2000). Mechanism and significance of mercury volatilization from contaminated floodplains of the German river Elbe. *Atmospheric Environment*, 34(22), 3745–3755. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00083-2)

Yaylali-Abanuz, G. (2011). Heavy metal contamination of surface soil around Gebze industrial area, Turkey. *Microchemical Journal*, 99(1), 82–92. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2011.04.004>

Zhao, B., & Poh, C. L. (2008). Insights into environmental bioremediation by microorganisms through functional genomics and proteomics. *PROTEOMICS*, 8(4), 874–881. <https://doi.org/10.1002/pmic.200701005>

Zuñiga, C., & Enrique, C. (2019). Optimizacion de la biorremediacion de cianuro a partir de un consorcio bacteriano nativo caracterizado molecularmente: Análisis genomicos y proteomicos. *Universidad Nacional de Tumbes*. <http://repositorio.untumbes.edu.pe/handle/UNITUMBES/409>