

Remoción de metales pesados (Cr⁺⁶, Ni, Zn) de lixiviados del Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz, México con barreras reactivas permeables de arena sílica

(Removal of Heavy Metals (Cr⁺⁶, Ni, Zn) from Leachates of the Sanitary Landfill of the City of Veracruz, Mexico with Reactive Permeable Silica Sand Barriers)

Manuel Alberto Susunaga Miranda¹, Bertha María Estévez Garrido², Benigno Ortiz Muñiz³, Rodrigo Manuel Susunaga Estévez⁴

Resumen

El uso de las Barreras reactivas permeables como material para la remoción de metales pesados de los lixiviados de los rellenos sanitarios ha sido comprobado para diversos materiales, la Arena sílica procedente de las costas del municipio de Alvarado Veracruz en México tienen las características de tamaño y composición requeridas para ser utilizadas para este fin, se colectaron muestras de Lixiviado procedente del Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz y se determinaron las concentraciones de Ni, Cr⁺⁶ y Zn fueron respectivamente 0.0818, 0.186 y 0.224 mg/l, se construyeron tres columnas de acrílico y se rellenas con 20, 30 y 40 cm de Arena sílica lavada y seca, se hizo pasar lixiviado tratado y estabilizado por el medio poroso a una a un flujo de 1.7 ml/s, tomando muestras a los 40,75, 115, 165 y 235 segundos para cada columna y se midió la eficacia para la remoción estos metales pesados y se encontró una reducción significativa de estos contaminantes que va desde el de 76 a 93 % para el Níquel, de 44 al 81 % en el caso del Cromo hexavalente y desde 65 hasta el 92 % para el Zinc para un tiempo máximo de 235 segundos, lo que indica que este material puede ser utilizado en la remediación de lixiviados.

Palabras clave

Lixiviados; contaminantes; metales pesados; Barreras Reactivas Permeables; remediación; medio poroso.

Abstract

The use of Permeable Reactive Barriers as a material for the removal of heavy metals from the leachates of the Sanitary Landfills has been verified for various materials, the Silica Sand from the coasts of the municipality of Alvarado Veracruz in Mexico have the characteristics of size and composition Required to be used for this purpose, samples of leachate were collected from the Sanitary Landfill of the City of Veracruz and the concentrations of Ni, Cr⁺⁶ and Zn were determined were respectively 0.0818, 0.186 and 0.224 mg/l, three columns were built of acrylic and were filled with 20, 30 and 40 cm of washed and dried Silica Sand, treated and stabilized leachate was passed through the porous medium at a flow of 1.7 ml/s, taking samples at 40.75, 115, 165 and 235 seconds for each column and the efficiency for the removal of these heavy metals was measured and a significant reduction of these pollutants was found, ranging from 76 to 93%. for Nickel, from 44 to 81 % in the case of hexavalent Chromium and from 65 to 92% for Zinc for a maximum time of 235 seconds, which indicates that this material can be used in the remediation of leachate.

Keywords

Leachates; contaminants; heavy metals; Permeable Reactive Barriers; remediation; porous médium.

- 1 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [manuel.sm@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0002-5595-0914]
- 2 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [bertha.eg@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0002-8543-3520]
- 3 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [benigno.om@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0001-5211-9175]
- 4 Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México. [L19020931@veracruz.tecnm.mx, https://orcid.org/0000-0002-6570-9307]

1. Introducción

Los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) conocidos como basura o desechos se generan en los hogares como resultado de las actividades domésticas, comerciales y de servicios públicos y están compuestos por productos de consumo, así como sus envases, empaques o embalajes entre los que se encuentran componentes orgánicos como el papel, el cartón, la madera, restos alimenticios e inorgánicos como el vidrio, el plástico y los metales (SEMARNAT, 2017). Cuando los R.S.U son dispuestos de manera inadecuada contaminan el aire, el agua y el suelo, ya que debido a que su descomposición se generan gases como el dióxido y el monóxido de carbono, el metano y el ácido sulfhídrico que en conjunto son denominados biogases; compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos aromáticos policíclicos, dioxinas, furanos y un líquido altamente tóxico denominado lixiviado (Kaza et al., 2018; Vian Perez et al., 2019), estos componentes impactan a la salud humana y representan un problema ambiental a nivel mundial (Iqbal et al., 2020),

Los lixiviados de los sitios de disposición final de los R.S.U se generan como consecuencia de la percolación del agua de lluvia a través de los residuos (Kankanige et al., 2019) y consisten en una serie de contaminantes cuya composición varía mucho dependiendo de las características específicas del lugar, de la etapa de degradación, la variación climática, del tipo de desechos y las instalaciones para la disposición (Macaulay et al., 2018) entre estos los más peligrosos son los metales pesados que se acumulan en el suelo y en el agua subterránea (Raisi et al., 2014).

Los metales pesados generan una gran cantidad de problemas ambientales y su presencia aún en nivel de trazas representan serios problemas para la salud y el entorno, ya que al entrar al suelo reducen su fertilidad y humedad y de manera genérica en el agua produce cambios patológicos en los órganos internos del cuerpo humano (Youcal, 2018) el Cr^{+6} es altamente tóxico, soluble y altamente móvil en corrientes hídricas (Dognani et al., 2019), cuando se oxida a Cr^{+3} en los organismos ocasiona mutaciones genéticas (Peralta Videa et al., 2009); el Níquel produce modificaciones en los genes y alteraciones en el metabolismo celular, así como daño en el ADN (Denkhaus y Salnikow, 2002), el Zinc produce clorosis y crecimiento reducido en las plantas ya que actúa inhibiendo la fijación de CO_2 (Haslett et al., 2001).

Una técnica *in situ* que se ha utilizado para el tratamiento de las aguas subterráneas contaminadas y que consiste en interceptar una corriente de agua a fin de reducir o transformar los contaminantes presentes entre los que se encuentran los metales pesados (Maitra, 2019) son las Barreras reactivas permeables (Striegel et al., 2001), cuya principal ventaja sobre otros métodos de remediación es principalmente que su funcionamiento depende de solo la barrera, que es una instalación que no requiere de energía y de muy poca mano de obra, ya que es el mismo flujo del agua quien hace que se pongan en contacto los contaminantes con los medios reactivos (Liu et al., 2011). En las barreras reactivas permeables los mecanismos de eliminación de los contaminantes son por inmovilización de especies químicas o mediante transformaciones a productos menos nocivos (Scherer et al., 2000), en una serie de procesos fisicoquímicos y biológicos, entre los primeros se encuentran la adsorción sin alterar el estado químico, oxidoreducción y precipitación química y por medio de procesos biológicos donde se biodegradan componentes orgánicos (Kankanige et al., 2019).

Los principales materiales que se han probado como barreras reactivas permeables han sido las Zeolitas, tanto de forma natural o modificada con hierro, la apatita, el caolín y bentonita (Vukojević et al., 2017), las cenizas de carbón, caolinita, cáscara de coco (Asokbunyarat et al.,

2017), Pirita, Hierro Granular (Maitra, 2019), las arcillas (Segura et al., 2015), cuyas características como material de relleno permitan una adecuada capacidad de adsorción, selectividad en la remoción, la naturaleza de la degradación entre otros factores (Takur et al. 2020). Para la remediación de metales pesados los materiales que se han probado como relleno para Barreras reactivas permeables son las arcillas y las zeolitas que tienen una alta capacidad para el intercambio de cationes (Segura, 2015, Vukojević et al., 2017), ya que tienen una alta capacidad de intercambio de cationes dado un catión de mayor valencia (Si^{4+}) dentro de la estructura mineral (Asokbunyarat et al., 2017).

La arena sílica está formada por un átomo de Silicio y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula de SiO_2 , la cual se recolecta directamente de bancos de préstamo y mediante la trituración, molienda y cribado obteniendo tamaño de grano requerido, este componente se ha utilizado como medio filtrante en el tratamiento de agua residual y en la potabilización del agua, se produce en mallas 10, 20 y 30 en la escala de Tyler (Susunaga-Miranda et al., 2020). En México la producción nacional de Sílice para 2015 fue de 1.7 millones de toneladas, principalmente en los estados de Veracruz (62%), Coahuila (29%), y Nuevo León (7%) (Dirección general de Desarrollo Minero, 2017).

Se ha utilizado la arena sílica como material experimental para barreras reactivas permeables a escala laboratorio para la remoción de Cadmio y Sulfuros mediante la técnica de Hierro de Valencia Cero a fin de oxidar estas especies químicas a productos inertes o menos contaminantes (Takur et al., 2020), para metales pesados solo se ha estudiado este componente mezclado con otras especies químicas (Mohan y Gandhimathi, 2009). En México, se ha comprobado que arcillas modificadas o activadas las cuales han presentado eficiencias en la remoción de Cr^{+6} hasta del 95.37 % en el control de lixiviados de tiraderos a cielo abierto (Segura et al., 2015).

La arena sílica proveniente de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México como material para Barreras reactivas permeables se ha determinado que cuenta con una alta estabilidad química por su contenido de Fe_2O_3 , posee diámetros homogéneos que permiten una mayor permeabilidad sin una degradación del material (Susunaga-Miranda et al., 2020), además de que el silicio cuenta con una estructura donde los contaminantes pasan por el medio poroso y son permeados con el agua donde los cationes intercambiables son adsorbidos y atrapados en este sistema de retención (Mohan y Gandhimathi, 2009).

Este documento tiene por objetivo probar la capacidad de la arena sílica proveniente de las Costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México para la remediación de metales pesados (Cr^{+6} , Ni y Zn) de los lixiviados provenientes del Basurero No Controlado de la Ciudad de Veracruz, en medio controlado utilizando columnas empacadas verticales como material para una Barrera Reactiva Permeable.

2. Metodología

a) El relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, Veracruz, México

El relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, fue una obra de infraestructura para la disposición de Residuos Sólidos Urbano, clausurado desde diciembre de 2019 por las autoridades ambientales del Gobierno del Estado de Veracruz y que se localiza al norte del municipio de Veracruz en

terrenos de la Administración Portuaria Integral (Susunaga y Estévez, 2018) en las coordenadas 19°13'56.98"N y 96°13'22.11"O.

El sitio de recolección de muestras de lixiviado se estableció dentro del polígono del relleno sanitario clausurado de la ciudad de Veracruz en un canal por el cual los lixiviados escurren hacia una pequeña presa de captación cuyo cauce conduce al río Grande.

Figura 1. Localización del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz, México



Fuente: Google Earth, Modificado por Estévez-Garrido.

b) Colecta, preservación y caracterización de los lixiviados

Se recolectaron muestras de lixiviado del Basurero No Controlado de la ciudad de Veracruz y se preservaron de conformidad con la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980, (DOF, 1980) para el muestreo de aguas residuales. Las muestras fueron colectadas en envases de polietileno previamente lavados con HNO_3 al 10 % y con abundante agua desionizada y transportaron al laboratorio de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer) refrigerándose a una temperatura de $\pm 4^\circ\text{C}$ como medio de preservación (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018).

Las muestras de lixiviado se filtraron con carbón activado para eliminar la interferencia de colores, las lecturas de los metales Ni, Zn, Cr^{+6} se realizaron con un Fotómetro Hanna HI83300 el cual trabaja en cuatro longitudes de onda de la luz (420 nm, 525 nm, 575 nm y 610 nm) y que mide y traza su propia curva de concentración contra absorbancia y como reactivos estándares CAL Check para validar el rendimiento del sistema. Todas las muestras se leyeron por triplicado (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018).

Figura 2. Muestras de Lixiviado del Basurero No controlado de la ciudad de Veracruz



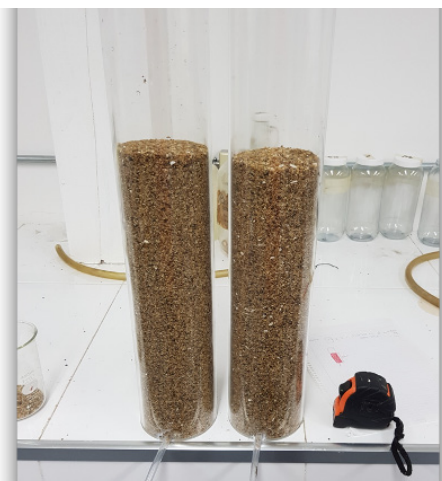
c) Colecta y tratamiento del material permeable

La arena sílica se colectó en el mes de julio de 2020 del banco costero propiedad de la empresa Sílices de México en el Km 55 + 500 Carretera Federal 180 Tramo Alvarado-Lerdo, en la congregación de Chocotán en el municipio de Alvarado, Veracruz, el cual fue secado con un horno rotatorio con quemador con atomizador para eliminar humedad (Susunaga Miranda et al., 2020), este material fue llevado al Laboratorio de Físico-Química del Instituto Tecnológico de Veracruz donde se tamizó hasta un tamaño de partículas de 0.707 mm por medio de una malla 25 en la Escala de Tyler.

d) Columnas horizontales de prueba

Se construyeron tres columnas de acrílico de 10 centímetros de diámetro y 50 centímetros de alto, con una salida para el material acuoso en el fondo de la columna para drenar los lixiviados, se rellenaron con 20, 30 y 40 centímetros de Arena sílica libre de humedad y con tamaño estándar de 0.707 mm (Figura 3).

Figura 3. Columnas empacadas con arena sílica



e) Ensayos para la remoción de metales pesados

Las tres muestras de lixiviados se mezclaron para tener una sola con características homogéneas, de esta mezcla se separaron 300 ml en tres vasos de precipitado de 100 ml y se agregaron uno a uno en cada columna con 20 cm de arena sílica, se tomó el tiempo que tardó en pasar por la columna el lixiviado en cada ocasión, para determinar la velocidad y el caudal de salida; al lixiviado recolectado después de pasar por la columna se le determinó el volumen y la concentración de Cr⁺⁶, Ni y Zn para calcular la saturación de líquido y la remoción del contaminante. Este procedimiento se repitió con 30 y 40 cm de relleno de arena sílica en las columnas.

f) Análisis de resultados

Para el análisis de los datos obtenidos se aplicaron pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB con el fin de encontrar el error estándar de la media tabular y las diferencias mínimas estadísticas de los datos obtenidos en los resultados del laboratorio.

Los resultados se graficaron y se realizó un análisis comparativo al 95 % de confianza con las variables de altura, eficiencia de remoción de contaminantes.

3. Resultados

Metales pesados en lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz

Los muestreos para los tres metales pesados se llevaron a cabo en diciembre de 2019 en el basurero no controlado de la ciudad de Veracruz en tres envases diferentes de un litro cada uno, se preservaron y se realizó un análisis de Cr⁺⁶, Ni y Zn en el Laboratorio de Físicoquímica del Instituto Tecnológico de Veracruz obteniéndose los siguientes resultados (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados obtenidos por cada muestra

Parámetro	Muestra 1 (mg/l)			Muestra 2 (mg/l)			Muestra 3 (mg/l)		
Ni	0.084	0.080	0.081	0.082	0.082	0.083	0.082	0.081	0.082
Zn	0.190	0.190	0.200	0.190	0.190	0.180	0.180	0.180	0.180
Cr ⁺⁶	0.230	0.230	0.220	0.230	0.230	0.240	0.210	0.210	0.220

La media de las concentraciones de Níquel, Zinc y Cromo hexavalente son respectivamente 0.0818, 0.186 y 0.224 mg/l, si bien estas concentraciones no rebasan los límites permisibles de conformidad con la NOM-001-SEMARNAT-1996, (2.0, 10.0 y 0.5 mg/l) para descargas en humedales naturales (DOF, 1997) como es el caso del relleno sanitario de la ciudad de Veracruz.

Los resultados de las pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB demostraron que no existen diferencias significativas entre los datos obtenidos para la concentración de Cr⁺⁶, Ni y Zn en los lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de la Ciudad de Veracruz, Veracruz, México.

Tiempo de residencia, caudal y tiempo de saturación hidráulica

Al añadir el lixiviado recolectado y estabilizado en las columnas de acrílico con arena sílica, se pudo observar que el tiempo que tardaba el líquido en fluir a través del medio variaba con el espesor del relleno, así se pudo calcular el caudal, también se pudo observar que en determinado momento se presentaba la saturación hidráulica, es decir, el punto en el cual el medio ya no impedía el paso libre de la muestra (ya no presentaba retención de lixiviado en su interior), los datos obtenidos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Caudal, velocidad y tiempo de saturación de lixiviado en la arena sílica

Espesor de la Columna	Caudal (ml/s)	Velocidad (m/s)	Tiempo de Saturación (s)
20 cm	1.7	0.563	245
30 cm	0.8	0.551	288
40 cm	0.4	0.539	360

Como se muestra en la tabla 2, el caudal que fluye a través de las columnas varía con el espesor, a mayor espesor, menor caudal y mayor tiempo de saturación.

Los resultados de las pruebas de análisis de medias de Tukey y Fisher con un nivel de confianza del 95 %, con el programa MINITAB demostraron que existen diferencias significativas entre los datos obtenidos para la velocidad, el caudal y el tiempo de saturación de los lixiviados procedentes del Relleno Sanitario de la Ciudad de Veracruz, Veracruz, México en las columnas de 20,30 y 40 cm de arena sílica, sin embargo la diferencia estadística más amplia se presenta entre la columna de 20 cm y la de 40 cm, lo que supondría que con esos resultados se podría proponer el ancho específico para su uso en barreras reactivas permeables.

Remoción de Cr^{+6} , Ni y Zn en columnas empacadas de arena sílica

Se tomaron muestras de lixiviado una vez que los contaminantes recorrieron el empaque de arena sílica en las columnas de 20, 30 y 40 cm a los 40, 75, 115,165 y 235 segundos de iniciar el ensayo experimental, se dividieron en tres y se determinó la concentración de Níquel, Zinc y Cromo hexavalente, este procedimiento se repitió nueve veces para cada columna y los resultados que arrojaron en porcentaje de remoción se tabularon y graficaron para obtener una tendencia lineal por contaminante en cada una de las columnas en los tiempos seleccionados.

a) Remoción de Níquel

El resultado de la eficiencia en la remoción de Níquel se obtuvo de promediar cada una de las tres muestras que se colectaron para un tiempo determinado (Tabla 3), el número total de ensayos que se realizaron para este metal pesado fueron de 15 para cada columna, con una concentración inicial de 0.0818 mg/l.

Tabla 3. Eficiencia de remoción de Níquel

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0041	0.0017	0.0012	95.0 %	97.8 %	98.5 %
75	0.0082	0.0041	0.0032	90.0 %	95.0 %	96.1 %
115	0.0164	0.0053	0.0036	80.0 %	93.5 %	95.6 %
165	0.0196	0.0098	0.0057	76.0 %	88.0 %	93.0 %
235	0.0286	0.0139	0.0082	65.0 %	83.0 %	90.0 %

Como se puede observar en la figura 4, a medida que se incrementa el ancho de la columna, el porcentaje de remoción se mantiene en niveles superiores al 90 %. De esta manera, se pueden graficar los valores para obtener las tendencias generales de remoción con el objetivo de poder proyectar estadísticamente el comportamiento de la remoción de Níquel si se cuenta con un mayor ancho de barrera.

b) Remoción de Cr^{+6}

Para el caso del Cromo también se realizaron el mismo número de ensayos iniciando con una concentración de 0.224 mg/l, obteniendo los promedios de la remoción los que se muestran en la tabla 4.

Figura 4. Eficiencia en la remoción de Níquel en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

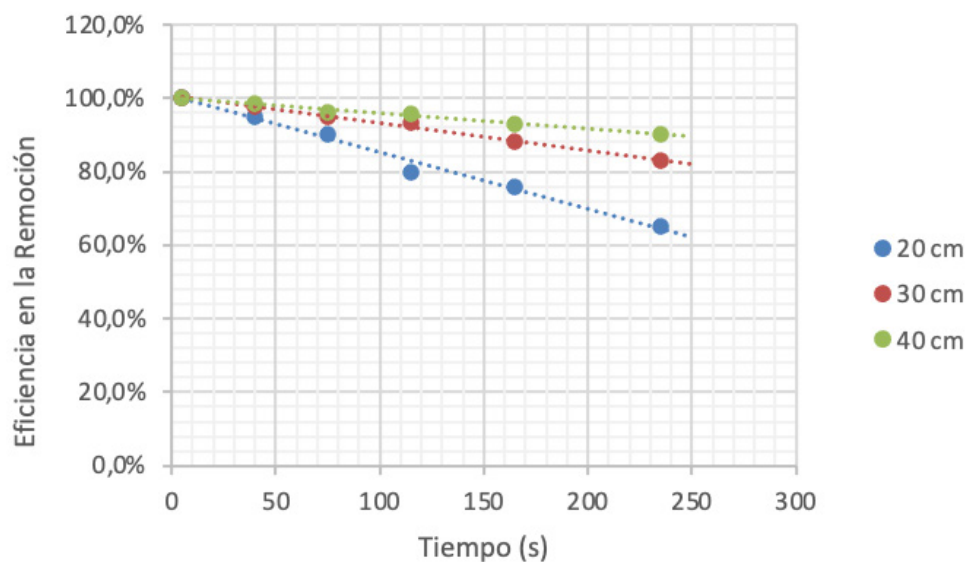
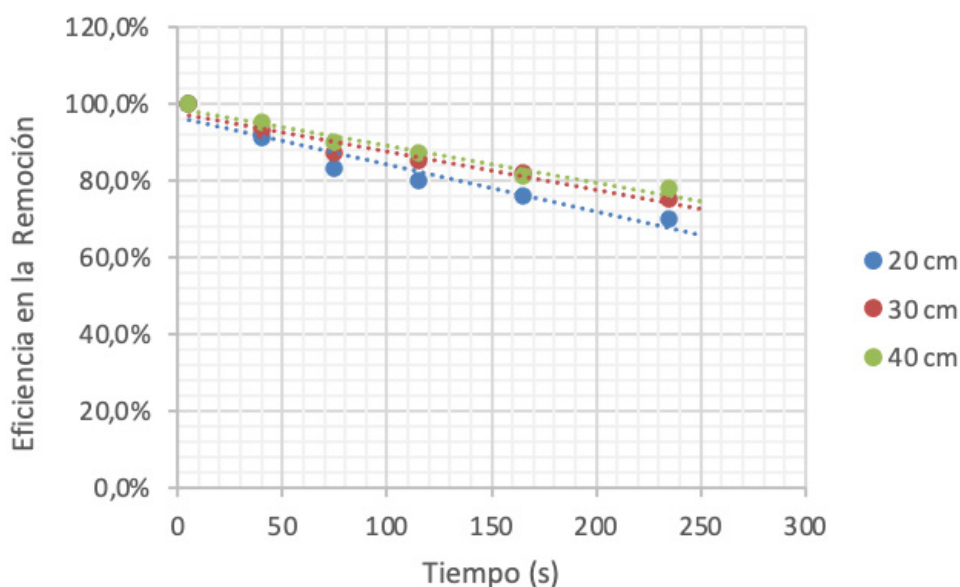


Tabla 4. Eficiencia de remoción de Cromo

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0241	0.0157	0.0112	91.0%	93.0 %	95.0 %
75	0.0380	0.0291	0.0224	83.0%	87.0 %	90.0 %
115	0.0448	0.0336	0.0291	80.0%	85.0 %	87.0 %
165	0.0537	0.0403	0.0425	76.0%	82.0 %	81.0 %
235	0.0672	0.0560	0.0493	70.0%	75.0 %	78.0 %

En la figura 5 podemos observar que el comportamiento de la remoción de Cr^{+6} es diferente a la del níquel, este comportamiento, aunque similar para las tres columnas presenta un decaimiento más abrupto.

Figura 5. Eficiencia en la remoción de Cr^{+6} en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

El comportamiento en la remoción de Cromo permite identificar que existe una diferencia fundamental entre los resultados obtenidos y los que se han reportado en la literatura.

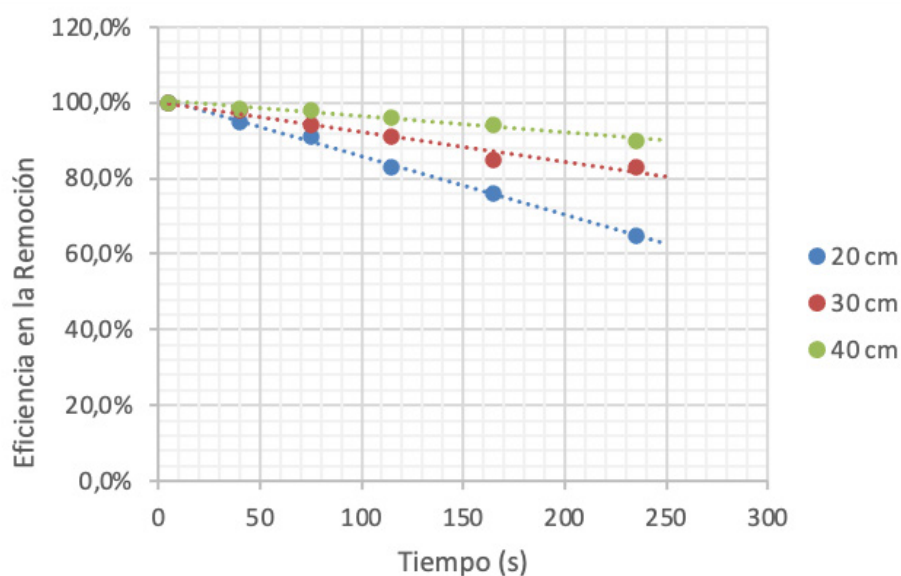
b) Remoción de Zn

Los resultados de la eficiencia de remoción de Zinc en las columnas de 20, 30 y 40 cm se presentan en la tabla 5 a partir de una concentración inicial de 0.186 mg/l.

Tabla 5. Eficiencia de remoción de Zinc

tiempo (s)	Concentración (mg/l)			Eficiencia		
	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm	Columna de 20 cm	Columna de 30 cm	Columna de 40 cm
40	0.0093	0.0041	0.0028	95.0 %	97.8 %	98.5 %
75	0.0167	0.0111	0.0037	91.0 %	94.0 %	98.0 %
115	0.0316	0.0167	0.0074	83.0 %	91.0 %	96.0 %
165	0.0446	0.0279	0.0111	76.0 %	85.0 %	94.0 %
235	0.0595	0.0316	0.0186	68.0 %	83.0 %	90.0 %

En cuanto a la remoción de Zinc que se determinó en el ensayo, se puede apreciar (Figura 6) que la disminución en la concentración de este contaminante es relativamente constante y en valores más altos que los que se obtuvieron con el Cromo hexavalente y el Níquel.

Figura 6. Eficiencia en la remoción de Zinc en Barreras de arena sílica de 20, 30 y 40 cm a flujo constante

4. Discusión

Los resultados obtenidos de la concentración de Níquel, Cromo hexavalente y Zinc en la corriente de lixiviados que emana del Relleno Sanitario clausurado de la Ciudad de Veracruz, si bien no sobrepasan los niveles máximos establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (DOF, 1997), representan una disminución de aproximadamente de 1.44 y 2.6 % para el Níquel y Cromo hexavalente respectivamente y un incremento del 1.6 % para el Zinc con respecto al año 2018 que reportaron 0.083, 0.186 y 0.23 mg/l (Susunaga Miranda y Estévez Garrido, 2018), lo que significa que estos contaminantes continúan estando presentes en el canal de lixiviados el cual descarga al río Grande y desemboca en el Golfo de México representando aún un foco importante de

aporte de metales pesados al Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano lo que representa un importante impacto ambiental (Botello et al., 2005).

Pruebas realizadas en columnas para reducir la concentración de Níquel en ensayos experimentales utilizando 50 cm de columna durante tiempos de residencia cercana a 2500 segundo utilizando lapilli de piedras volcánicas de 2 a 62 mm presentó una eficiencia del 98 %, disminuyendo hasta 63 % en 100 h (Madaffari et al., 2017), por lo que se esperaría de acuerdo con la tendencia presentada en la gráfica 1 que al aumentar el espesor de la barrera, la eficiencia en la remoción se incrementa y que esta se mantenga por mayor tiempo, ya que el proceso de adsorción que es el que sucede con el níquel por lo general por atracción electrostática de los metales por el relleno (Kumar et al., 2020).

Comparando los resultados relativos a la remoción de Cromo hexavalente en la Arena sílica con mezclas de Arena/Zeolitas son prácticamente similares, ya que en este caso la reducción del contaminante se ha presentado desde el 84 % al 89.7 % en condiciones controladas y con reactivos estandarizados (Maamoun et al., 2020) se puede establecer este material es ligeramente más eficaz en el tratamiento de este metal pesado.

La tendencia en la remoción de Zinc en el ensayo experimental en columnas de 30 y 40 cm es muy similar a las reportadas en barreras con relleno de hierro que fue de entre 96 y 99 % (Takur et al., 2020), estos valores se aproximan a los presentados con material reactivo en partículas de 2 a 3 mm (Pérez, 2014).

El componente fundamental de la Arena sílica es el Silicio, el cual tiene una estructura que permite que los cationes intercambiables sean absorbidos y que los metales sean atrapados vía intercambio iónico lo que permite que este sistema los retenga (Mohan y Gandhimathi, 2009)

Los principales factores para que un material sea utilizado como Barrera Reactiva Permeable es que debe ser compatible con el medio ambiente del subsuelo, es decir, no debe provocar reacciones adversas o causar algunas especies químicas que generen más contaminantes (Maitra, 2019; Mital et al., 2020), además de tener una alta disponibilidad para realizar trabajos de remediación de acuíferos al atenuar los metales pesados en condiciones de control y así evitar que los lixiviados de los rellenos sanitarios migren (Cordeiro y Viera, 2020), lo cual puede aportar la arena de sílice tanto de la cuenca baja del río Papaloapan (Díaz et al., 2018) como de las costas del municipio de Alvarado Veracruz, México (Susunaga Miranda et al., 2020).

5. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados de la concentración de metales presentes en los lixiviados y su comparación con estudios realizados anteriormente podemos concluir que el Relleno Sanitario de la ciudad de Veracruz, se encuentra en una fase de envejecimiento, ya que la emisión de contaminantes se encuentra en pleno proceso de disminución, sin embargo, aún se deben de realizar obras para impedir que los componentes tóxicos migren hacia las aguas del Golfo de México.

El uso de las Barreras reactivas permeables ha evolucionado en los últimos años, su uso para el tratamiento de lixiviados mediante la adsorción de los contaminantes o la conversión en especies químicas menos tóxicas se basan en el paso de una corriente líquida en el seno de un empaque o relleno de materiales de alta permeabilidad que permite que los contaminantes sean retenidos o se convierten en productos químicos con menos toxicidad o con alta biodegradabilidad, esta técnica ofrece una serie de ventajas que permiten su uso, entre ellas se encuen-

tra el hecho de que no necesitan energía para su operación y que los materiales reactivos por su abundancia, su costo y su reducido impacto ambiental.

El comportamiento en la remoción de metales pesados por las Barreras reactivas permeables de arena sílica procedente de las costas del municipio de Alvarado, Veracruz, México, es muy diferente para cada uno de los contaminantes estudiados, ya que, si bien la reducción más alta se presenta en las columnas de 40 cm, el valor en la disminución de la concentración cambia, el Níquel y el Zinc presentan tendencias similares pero el Cromo difiere de los dos anteriores, tomando esto como criterio de selección de la arena sílica.

Es probable que la baja remoción de Cromo se deba a que las muestras se lavaron previamente y se eliminó la presencia de Hierro y es precisamente este componente con el que interactúa para su descomposición a Cr^{+3} ya que se tiene una menor concentración de este elemento en la arena sílica estudiada.

Un factor muy importante para que se dé una remoción adecuada de metales pesados en las Barreras reactivas permeables es el tiempo de residencia, es decir, el tiempo que permanecen las especies químicas presentes en los lixiviados en contacto con el material de relleno, ya que de esta depende la cinética de la eliminación por parte del medio reactivo, y con los resultados obtenidos nos permiten proyectar la saturación hidráulica de la arena sílica que es en ese momento que se alcanza una remoción estandarizada y a partir de la cual comienza el decaimiento en la eficiencia final.

Con los resultados obtenidos se puede demostrar que la arena sílica es una alternativa que se puede utilizar como Barrera Reactiva Permeable, ya que posee características de porosidad, permeabilidad, tamaño y estructura química que le permiten remover contaminantes como los metales pesados presentes en los lixiviados del relleno sanitario de la Ciudad de Veracruz, México, ya que esta no interactúa con otros componentes y es un material de fácil recolección, el cual es utilizado para varios fines industriales y proviene principalmente de las costas del Municipio de Alvarado, lugar donde se concentra una buena parte de las empresas que proveen este material a la zona central de México.

Como recomendación podemos proponer que se deben de realizar ensayos para determinar parámetros como conductividad hidráulica y permeabilidad de la arena sílica para perfeccionar el conocimiento de este material para su uso como barrera reactiva permeable para la remoción de metales pesados de los lixiviados de los rellenos sanitarios.

Referencias

- Asokbunyarat, V., Lens, P., y Annachhatre A. (2017). Chapter 3 Permeable Reactive Barriers for Heavy Metal Removal. *Sustainable Heavy Metal Remediation*, Environmental Chemistry for a Sustainable World 8, Rene, E.R., Sahinkaya, E., Lewis, A., Lens, P. (Eds.). Volume 1: Principles and Processes: 65-100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58622-9_3
- Botello, A., Rendón von Osten, J., Gol-Boucht, G., y Agraz Hernández, C. (2005). *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias*. 2da edición.
- Cordeiro Andrade, D., y Vieira dos Santos, E. (2020). Combination of electrokinetic remediation with permeable reactive barriers to remove organic compounds from soils, *Current Opinion in Electrochemistry*, 22: 136-144. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.06.002>
- Denkhaus, E., y Salnikow, K. (2002). Nickel essentiality, toxicity, and carcinogenicity. *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 42(1): 35-56. [https://doi.org/10.1016/S1040-8428\(01\)00214-1](https://doi.org/10.1016/S1040-8428(01)00214-1)

- Díaz, M., Campos, R., Zamora, S., y Salgado, R. (2018) Cuantificación experimental del contenido masivo de SiO₂ en depósitos eólicos de arena en una región de la cuenca del río Papaloapan, Veracruz, México. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 22(1). <https://bit.ly/3d4vnpp>
- Dirección General de Desarrollo Minero (2017). Perfil del mercado del Sílice, Secretaría de Economía, Gobierno de México. <https://bit.ly/3qjX6lf>
- DOF, 1980 Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 Aguas Residuales, Muestreo, Diario Oficial de la Federación 25 de marzo de 1980. México D.F.
- DOF, 1997 Norma Oficial Mexicana 001-SEMARNAT-1996 Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación 6 de enero de 1997. México D.F.
- Dognani, G., Hadi, P., Ma, H., Cabrera, F. C., Job, A. E., Agostini, D.L.S., y Hsiao, B. S. (2019). Effective chromium removal from water by polyaniline-coated electrospun adsorbent membrane. *Chem. Eng. J.*, 372: 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.154>
- Haslett, B., Reid, R., y Rengel, Z. (2001). Zinc mobility in wheat: Uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. *Annals of Botany - ANN BOT.*, 87: 379-386. <https://doi.org/10.1006/anbo.2000.1349>
- Iqbal, A., Liu, X., y Chen, G. H. (2020). Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sustainable management techniques. *Science of The Total Environment*, 138622. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138622>
- Kankanige, D., Dayanthi, W., Nagasinghe, I., Disanayaka, A., y Kawamoto, K. (2019). Low-Cost Permeable Reactive Barrier (PRB) System to treat the organic compounds and nutrients in the groundwater contaminated by the landfill-leachate. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 52: 15. <https://doi.org/10.4038/engineer.v52i2.7350>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada Tata, P., y VanWoerden, F., (2018). What a Waste 2.0. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Liu S., Li X., y Wang H. (2011). Hydraulics analysis for groundwater flow through permeable reactive barriers. *Environmental Modeling & Assessment*, 16(6): 591-598. <https://doi.org/10.1007/s10666-011-9268-0>
- Maamoun, I., Eljamal, O., Falyouna, O., Eljamal, R., y Sugihara, Y. (2020) Multi-objective optimization of permeable reactive barrier design for Cr(VI) removal from groundwater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 200 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110773>
- Macaulay, B., Aderibigbe, A., y Ogunwole, G. (2018). *Novel eco-friendly mitigation strategies for managing oil spills and municipal waste dump site leachates*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_110-1
- Madaffari, M., Bilardi, S., Calabrò, P., y Moraci N. (2017). Nickel removal by zero valent iron/lapillus mixtures in column systems. *Soils and Foundations*, 57(5): 745-759. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.08.006>
- Maitra, S. (2019). Permeable reactive barrier: a technology for groundwater remediation. A mini review. *Research Journal of Life* 5(1): 203 <http://doi.org/10.26479/2019.0501.21>
- Mittal, A., Singh, R., Chakma, S., Gaurav, G. (2020). Permeable reactive barrier technology for the remediation of groundwater contaminated with nitrate and phosphate resulted from pit-toilet leachate, *Journal of Water Process Engineering*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101471>
- Mohan, S., Gandhimathi, R. (2009). Removal of heavy metal ions from municipal solid waste leachate using coal fly ash as an adsorbent. *J Hazard Mater*, 169(1-3): 351-359 <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.104>
- Peralta Videa, J., Lopez, M., Narayan, M., Saupe, G., y Gardea Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *Int J Biochem Cell Biol.*, 41(8-9):1665-77, Aug-Sep. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.03.00>

- Pérez Espinosa, V. (2014). *Inmovilización de elementos potencialmente tóxicos en zonas mineras abandonadas mediante la construcción de tecnosoles y barreras reactivas permeables*. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ingeniería Química por la Universidad de Murcia, España.
- Raisi, S., Sulaiman, H., Suliman, F., y Abdalla, O. (2014). Assessment of Heavy Metals in Leachate of an Unlined Landfill in the Sultanate of Oman. *International Journal of Environmental Science and Development*, 5(1). <https://doi.org/10.7763/IJESD.2014.V5.451>
- Scherer, M., Richter, S., Valentine, R., Alvarez, P. (2000). Chemistry and microbiology of permeable reactive barriers for in situ groundwater clean up. *Crit Rev Microbiol.*, 26(4): 221-64. <https://doi.org/10.1080/10408410091154237>
- Segura, R., Martínez, G., Apolinar, J., y García, M., (2015) Remoción de Cr6+ de lixiviados de tiraderos de basura con arcillas modificadas o activadas. *CienciaUANL*, 18(75): 54-70.
- SEMARNAT (2017). Residuos sólidos urbanos y de manejo especial, acciones y programas. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://bit.ly/3xHkBNH>
- Susunaga Miranda M. A., y Estévez Garrido B. M (2018). Metales pesados en los lixiviados provenientes del basurero no controlado de la ciudad de Veracruz. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 5(6): 164-171.
- Susunaga Miranda, M. A., Estévez Garrido, B. M., y Susunaga Estévez, R. M. (2020). Characteristics of Silica Sand from Alvarado, Veracruz, Mexico as material for permeable reactive barriers for the remediation of aquifers contaminated with leachates from uncontrolled landfills. *Enfoque UTE*, 11(4): 87-100. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n4.674>
- Striegel, J., Sanders, D., y Veenstra, J. (2001). Treatment of contaminated groundwater using permeable reactive barriers. *Environmental Geosciences*, 8(4): 258-265. <https://doi.org/10.1046/j.1526-0984.2001.84004.x>
- Thakur, A., Vithanage, M., Das, B., y Kumar, M. (2020). A review on design, material selection, mechanism, and modelling of permeable reactive barrier for community-scale groundwater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100917>
- Vian Pérez, J., Velasco Pérez, A., y García Herrera, T. (2019). Residuos sólidos urbanos. Una problemática ambiental y oportunidad energética. *CIENCIA UANL*, 22(97). <https://bit.ly/2Uk7QdA>
- Vukojević, N., Daković, A., Ugrina, M., Trgo, M., Nuić, I., y Marković, M., (2017). Evaluation of low-cost sorbent as potential materials for In-Situ remediation of water contaminated with heavy metals. *Technologica Acta*, 10(2): 9-13. <https://bit.ly/3zYYhkS>
- Youcal, Z. (2018) Chapter 1. Leachate generation and characteristics. Zhao Youcal (Ed.), *Pollution control technology for leachate from municipal solid waste* (pp.1-30). Butterworth-Heinemann. <https://bit.ly/3zOBtnK>