

CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA ZEOLITA NATURAL DE OCUVIRI (PERÚ) PARA LA REMOCIÓN DE Pb (II) EN SOLUCIÓN A NIVEL LABORATORIO

CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF A NATURAL ZEOLITE OF OCUVIRI (PERU) FOR THE REMOVAL OF Pb (II) IN SOLUTION AT THE LABORATORY LEVEL

**Paul K. Huanca¹, Betty Paredes^{*2}, Marcelo Rodríguez¹, Derlis P. Gonzales¹,
Teresa R. Tejada³, Jesús E. Chávez⁴**

Universidad Nacional de San Agustín, (1) Departamento de Ingeniería de Materiales, (2) Departamento de Química, (3) Departamento de Ingeniería Alimentaria, (4) Departamento de Ingeniería Química, Av. Venezuela s/n, Arequipa - Perú

*autor de contacto (e-mail: paredes.betty@gmail.com)

Recibido: 28/11/2017 - Evaluado: 15/01/2018 - Aceptado: 22/02/2018

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló una metodología en la cual el material zeolítico procedente de la zona de Ocuvi-Lampa (localizada a pocos kilómetros de la ciudad de Puno), fue sometido a caracterización física, química, mineralógica y morfológica. Determinando la granulometría, densidad aparente, densidad real, porosidad, especies mineralógicas, composición química y microscopía del material. Posteriormente se utilizó la zeolita como material adsorbente en soluciones preparadas en laboratorio las cuales fueron evaluadas en función del tiempo y a diferentes concentraciones de plomo como material contaminante. Finalmente, las concentraciones iniciales y finales de plomo fueron cuantificadas por espectroscopía de absorción atómica para determinar el porcentaje de remoción de plomo. Se concluye que la zeolita natural estudiada tiene la capacidad de remediar aguas impactadas con plomo a nivel de laboratorio removiendo dicho contaminante mediante adsorción e intercambio iónico.

ABSTRACT

In this work a methodology was made in which the zeolitic material came from the area of Ocuvi-Lampa (a few kilometers from the city of Puno), which was subjected to physical, chemical, mineralogical and morphological characterization. Determining the granulometry, bulk density, real density, porosity, mineralogical species, chemical composition and microscopy of the material. Subsequently, zeolite was used as adsorbent material in solutions prepared in the laboratory, which were evaluated as a function of time and at different concentrations of lead as a contaminating material. Finally, the initial and final concentrations of lead were quantified by atomic absorption spectroscopy to determine the percentage of lead removal. In conclusion, the natural zeolite studied remediated lead from polluted solutions. It is concluded that the natural zeolite studied has the capacity to remedy the impacted waters with the laboratory level by removing said contaminant by adsorption and ion exchange.

Palabras clave: zeolita, adsorbente, plomo, remoción

Keywords: zeolite, adsorbent, lead, removal

INTRODUCCIÓN

Desde su descubrimiento por el mineralogista sueco Cronsted en 1756, las zeolitas naturales han sido estudiadas por diferentes científicos como Damour, Eichhorne, Weigel, Steinhof, Samashima, McBain, Barrer, Breck, Milton, Coombs, Ames, Millon, Flanigen entre otros; los cuales han evidenciado numerosas características y propiedades de este mineral, dentro de las más resaltantes tenemos su capacidad de hidratación e intercambio catiónico, adsorción y síntesis. El término "zeolita" fue utilizado inicialmente para designar a una familia de minerales naturales que presentaban como propiedades particulares el intercambio de iones y la desorción reversible del agua. Hoy en día, el término zeolita engloba a un gran número de minerales naturales y sintéticos que presentan características comunes. Las definiciones más recientes reflejan las evidencias experimentales de las estructuras cristalinas formadas por tetraedros donde no solo aparecen átomos de Si y Al, sino también átomos de B, Be, Co, Ga, Fe, P y Zn. Las aplicaciones industriales de las zeolitas son muy variadas, dentro de ellas tenemos la eliminación de compuestos orgánicos de residuales industriales y aguas superficiales mediante adsorción; el ablandamiento de aguas domésticas (remoción de Ca^{+2} y Mg^{+2}), la eliminación de iones NH_4^+ de aguas servidas y la eliminación de metales pesados por intercambio iónico (Giannetto *et al.*, 2000).

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos con poros, canales y/o cavidades de tamaño bien definidos, son bien conocidas por sus propiedades de selectividad, de forma, como por sus propiedades catalíticas y elevada resistencia a la desactivación. Las zeolitas han sido y siguen siendo utilizadas en numerosos procesos tecnológicos como catalizadores o soportes de catalizadores. Debido a la forma y tamaño de sus poros, canales, cavidades y nidos en la superficie externa de los cristales, es posible llevar a cabo numerosas reacciones catalizadas por funciones ácidas o redox (Saux *et al.*, 2012).

En 1858, Eichhorne fue el primero que evidenció la capacidad de las zeolitas de intercambiar sus constituyentes catiónicos. Así mismo, una de las principales conclusiones alcanzadas en la V Conferencia Internacional sobre Zeolitas Naturales en 1997, fue que las zeolitas naturales se reafirman entre los mejores materiales para ser elegidos en procesos tecnológicos de eliminación de contaminantes (Rodríguez & Rodríguez, 2000). Desde entonces y hasta la actualidad en la XVIII Conferencia Internacional sobre Zeolitas realizada en Rio de Janeiro en junio del 2016, este material se ha consolidado como un efectivo y versátil descontaminante. En la XIX Conferencia Internacional sobre Zeolitas a realizarse en Australia en julio del 2019 se esperan numerosas contribuciones en cuanto a las bondades de este mineral.

Se han estudiado las propiedades físicas, mecánicas y químicas de zeolitas naturales procedentes de diferentes lugares, presentando el comportamiento físico, mecánico y químico de algunas variedades muestreadas en diferentes afloramientos del mundo y la incidencia de este comportamiento en ciertas aplicaciones eminentemente prácticas. Los resultados indican que cada variedad de zeolita natural aporta respuestas diferentes frente a los ensayos, posiblemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química (Costafreda *et al.*, 2011). Así también, se ha investigado la aplicación de zeolitas naturales y artificiales para diferentes fines siendo el comportamiento de ambos materiales prácticamente similar (Alonso *et al.*, 2013).

Las diferentes vías usadas para la preparación, síntesis, caracterización y aplicaciones catalíticas de tamices moleculares que combinan micro y meso porosidad, describen brevemente algunos estudios de actividad catalítica realizados con el fin de evaluar el potencial catalítico de estos nuevos sólidos (López *et al.*, 2009). La adición de zeolita natural a suelos agrícolas contaminados con fertilizantes crea una malla molecular capaz de retener iones, haciendo que el sistema suelo-planta sea más eficiente en términos de mayor producción por unidad de área y de menor contaminación del recurso hídrico de los acuíferos (Chica *et al.*, 2006).

Las zeolitas sintéticas obtenidas a partir de diferentes precursores como la ceniza de carbón han demostrado capacidad de remoción para los iones de Cd, Zn y el azul de metileno en soluciones acuosas. La selectividad a los iones metálicos de este producto en cuanto a su eficiencia de remoción se determinó como: $\text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$. Las

capacidades máximas de adsorción encontradas fueron 36,1 mg g⁻¹ para el Zn²⁺, 76,3 mg g⁻¹ para el Cd²⁺ y 3,93 mg g⁻¹ para el colorante (Fungaro *et al.*, 2005).

Existe gran interés en la aplicación de zeolitas naturales, así como también la obtención de zeolitas sintéticas a partir de diferentes precursores en aplicaciones de remediación ambiental (Rodríguez, 2016). Existen básicamente dos formas de cambiar las propiedades fisicoquímicas de una zeolita: (i) a través de modificaciones después de la síntesis de procesos como: el intercambio de iones, el tratamiento con vapor de ácido o agua y deposición de vapor; (ii) la otra forma sería a través de cambios en la síntesis (Barbosa *et al.*, 2011). En este estudio se evaluó la capacidad de una zeolita natural para remover Pb⁺² en un medio acuoso en condiciones de laboratorio.

En cuanto a la adsorción de plomo se han estudiado los parámetros que afectan el proceso como son: concentración inicial de plomo, tiempo de contacto, razón masa de zeolita - volumen de la solución, temperatura y pH e incluso la composición de la zeolita natural. Estudios demuestran la utilidad de las zeolitas naturales en la remediación de aguas impactadas con plomo, en los cuales se logró remover hasta el 90% del metal tóxico por mecanismos de adsorción e intercambio iónico (Alvarado *et al.*, 2013). Otros estudios con zeolitas naturales en soluciones impactadas con varios metales pesados reportan un porcentaje de remoción de plomo de hasta 72,45% (Leyva *et al.*, 2001).

En este trabajo se reporta la caracterización y aplicación directa de una zeolita natural como material descontaminante para remoción de Pb⁺² en solución. Los objetivos son caracterizar el material zeolítico en sus aspectos físico, químico, mineralógico y morfológico para posteriormente determinar la capacidad de remoción de plomo mediante adsorción e intercambio iónico en el material zeolítico en soluciones con respecto al tiempo y a diferentes concentraciones.

MATERIALES Y METODOS

La difracción de rayos X fue realizada en la Università Degli Studi di Cagliari-Sardegna, la fluorescencia de rayos X en la institución Progemisa en la ciudad de Cagliari; ambos en Italia. Los demás ensayos de caracterización se realizaron en los laboratorios de las facultades de Ingeniería de Procesos y Ciencias Naturales y Formales de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa-Perú.

Caracterización del material zeolítico

El material zeolítico fue caracterizado a través de diversas técnicas: Difracción de Rayos X (DRX) en un difractómetro de rayos X (XRD) marca Siemens D5000, completamente automatizado, radiación CuKα ($\lambda = 1,542 \text{ \AA}$) con un intervalo de barrido de 10° – 70° (2 θ); Fluorescencia de Rayos X (FRX) en un espectrómetro de fluorescencia de rayos (XRF) X S4 Explorer Bruker AXS y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en un microscopio Philips XL-20, equipado con microanalizador EDAX-DX4i (Detector de energía dispersiva de rayos x).

Para la granulometría, el material fue llevado a operación de conminución mediante un chancado primario y secundario con posterior zarandeo, utilizando una chancadora de quijadas, un molino automático, mallas ASTM para análisis granulométrico, balanza electrónica y un rotap.

Para la densidad aparente, densidad real y el porcentaje de porosidad se utilizó una balanza electrónica y una probeta graduada, un matraz de aforo, un vaso de precipitado y los modelos matemáticos presentados en las ecuaciones 1, 2 y 3; según la metodología propuesta en el Manual de laboratorio de concentración de minerales de la Pontificia Universidad Católica del Perú (Alfaro, 2016).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde:

m: Es la masa de la muestra.

V: Volumen resultante de la muestra después del desplazamiento de aire.

$$\rho_r = \left[\frac{W_3 - W_1}{(W_2 - W_1) - (W_4 - W_3)} \right] * \rho_{agua} \quad (2)$$

Donde:

Dr: Densidad real.

D agua: Densidad del agua.

Wx: Diferentes masas de acuerdo a la metodología (W₁, W₂, W₃ y W₄).

$$\%P = \left[1 - \left(\rho_{ap} / \rho_r \right) \right] * 100 \quad (3)$$

Donde:

P: Porosidad

Dap: Densidad aparente

Dr: Densidad real.

Metodología para la densidad aparente

Medir el volumen de la muestra, para esto se necesita un recipiente con volumen conocido, en este caso se utilizó una probeta graduada de 100 cc. Previamente se procedió a pesar la cantidad de muestra por cada tamaño de malla, el cual se trasladó a la probeta graduada.

Se utilizó el método de desplazamiento de aire, procedimiento que consiste en dar pequeños golpes hasta que la muestra quede lo suficientemente compactada. Finalmente, el volumen final es registrado para la determinación de la densidad aparente mediante la ecuación (1).

Metodología para la densidad real

- Pesar un matraz limpio y seco (W₁)
- Colocar la muestra de partículas dentro del matraz y pesar (W₃).
- Llenar el matraz cargado con partículas, con agua destilada hasta comenzar el nivel marcado en la graduación.
- Sacudir el matraz suavemente para eliminar las burbujas de aire y luego pesar (W₄).
- Vaciar el matraz, limpiar, lavar y secar exteriormente y volver a llenar con agua destilada hasta alcanzar el nivel marcado de la graduación, pesar (W₂).
- Calcular la densidad real de las partículas mediante la ecuación (2).

Metodología para el porcentaje de porosidad

Con los valores obtenidos de densidad aparente (Dap) y densidad real (Dr) se calcula el porcentaje de porosidad (%P) del material zeolítico, mediante la ecuación (3).

Remoción del catión Pb (II) en función del tiempo

Se realizaron pruebas en función al tiempo (4, 8, 16, 24, 48, 72 y 96 horas). A siete recipientes de plástico conteniendo 150 mL de solución de Pb (II) a una concentración de 1000 mg/L y un pH promedio de 5.12, se les colocaron 5 g de material zeolítico. Durante el proceso de remoción se agitaron los recipientes para facilitar el contacto entre la solución y el material zeolítico. Completado los tiempos de contacto establecidos, se filtró la solución y se midió 100 mL para el análisis de Pb (II) mediante absorción atómica. La cantidad de catión Pb (II)

removido por la zeolita natural se calculó considerando la diferencia existente entre la cantidad de catión en la solución inicial y final.

Remoción del catión Pb (II) a diferentes concentraciones

A diez recipientes de plástico conteniendo 200 mL de solución Pb (II) con concentraciones aproximadas de 1600, 1400, 1100, 900, 700, 600, 300, 200, 100 y 50 mg/L se les colocaron 2 g de material zeolítico. Durante el proceso de remoción se agitaron los recipientes para facilitar el contacto entre la solución y el material zeolítico. El tiempo de contacto fue establecido en 24 horas de acuerdo al comportamiento mostrando en las pruebas en función del tiempo. Luego de transcurrido el tiempo de contacto se filtraron las soluciones para tomar 100 mL de solución y determinar la cantidad de Pb (II) mediante absorción atómica.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Granulometría

Los valores de la distribución granulométrica evidenciaron que las partículas más abundantes fueron las comprendidas entre las mallas de 5mm y 1.7mm. Los resultados (Tabla 1) muestran el análisis granulométrico del material zeolítico.

Tabla 1: Análisis granulométrico de la zeolita natural.

Tamiz ASTM	Abertura de Malla (mm)	Peso Parcial (g)	% Retenido	% Acumulado	% Pasante
6	5,000	288	29,569	29,569	70,431
10	1,700	224	22,998	52,567	47,433
16	1,000	147	15,092	67,659	32,341
25	0,700	43	4,415	72,074	27,926
<75	0,200	272	27,926	100,000	0,000
Total		974	100,000		

Para los procesos de remoción de plomo en función del tiempo y a diferentes concentraciones, se utilizó el material con tamaño de partícula más abundante; en este caso el material clasificado con granulometría de abertura entre las mallas de 5mm y 1.7mm que representan un 70.431% y un 47.433% de sus respectivas mallas, que fueron los más abundantes. Se sabe que cada variedad de zeolita natural aporta respuestas diferentes frente a los ensayos, posiblemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química (Costafreda *et al.*, 2011).

Densidad Aparente (Dap), Densidad Real (Dr) y Porosidad (%P)

Para determinar los valores de la densidad aparente, densidad real y porosidad se tomó como referencia la metodología y ecuaciones indicadas por Alfaro (2016).

Aplicando la ecuación 1 y ecuación 2 se puede observar en las Tablas 2 y 3 los valores de la densidad aparente y densidad real de la zeolita natural.

La densidad aparente de la zeolita natural tiene un valor de 0,760 g/cc y la densidad real es de 2,269 g/cc. El factor predominante que influye en la variación entre la densidad aparente y la densidad real es la porosidad de la muestra; ya que las zeolitas son formadas por canales y cavidades regulares y uniformes de dimensiones moleculares (3 a 13 nm) que son medidas similares a los diámetros de una gran cantidad de

moléculas (Curi *et al.*, 2006). Este tipo de estructura microporosa hace que las zeolitas presenten una superficie interna extremadamente grande en relación a su superficie externa.

Aplicando la ecuación 3 con los valores de la densidad aparente y densidad real se obtiene un valor para el porcentaje de porosidad de 66.527%.

Tabla 2: Densidad Aparente de la zeolita natural

Mallas ASTM	Masa (g)	Volumen (cc)	Densidad Aparente (g/cc)
Malla +6	50,040	68,000	0,736
Malla +10	50,010	64,500	0,775
Malla +16	50,000	65,000	0,769
Promedio			0,760

Tabla 3: Densidad Real de la zeolita natural

Recipiente	Matraz: W1 (g)	Muestra (g)	Matraz y Muestra: W3 (g)	Matraz, Muestra y Agua Enrasada: W4 (g)	Matraz y Agua Enrasada: W2 (g)	Densidad Real (g/cc)
Matraz de Aforo 1	46,910	20,000	66,910	157,960	146,670	2,296
Matraz de Aforo 2	65,140	20,000	85,140	175,950	164,870	2,242
Promedio						2,269

El valor del porcentaje de porosidad en las zeolitas naturales es alto (%P > 50) de acuerdo a la bibliografía revisada (Costafreda, 2014), en nuestro estudio, el valor del porcentaje de porosidad calculado a partir de los datos de la densidad real y la densidad aparente; es de 66,527%, el cual es elevado, coincidiendo con las referencias consultadas.

Difracción de Rayos X (DRX)

Mediante la DRX, se da la identificación y cuantificación del contenido de distintas fases cristalinas y amorfas en el material zeolítico. Este método se basa en una interacción entre los Rayos-X y la materia cristalina que produce la difracción. Las muestras previamente se trituran a granulometría finas y se acoplan sobre un soporte adecuado.

En la Figura 1 se puede observar el espectro difractométrico para la muestra de material zeolítico estudiado.

Basándose en los picos de las intensidades registradas, se puede indicar que las especies mineralógicas mayoritarias presentes son las siguientes: esmectita (S), mordenita (M), heulandita (H), cristobalita (C), feldespato (F) y cuarzo (Q). La especie dominante en el material es la heulandita, identificando también a la mordenita y al cuarzo. Así también, el patrón de difracción es similar a estudios realizados por otros investigadores (Alvarado *et al.*, 2013; Quiroz *et al.*, 2014; Rodríguez, 2016).

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X (FRX), es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria

expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra. Tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) de muestras sólidas (filtros, metales, rocas, muestras en polvo, tejidos, etc.) y líquidas porque permite hacerlos sin preparación de la muestra.

En la Tabla 4 se observa la composición química y la pérdida por ignición (L.O.I.) de la zeolita natural analizada.

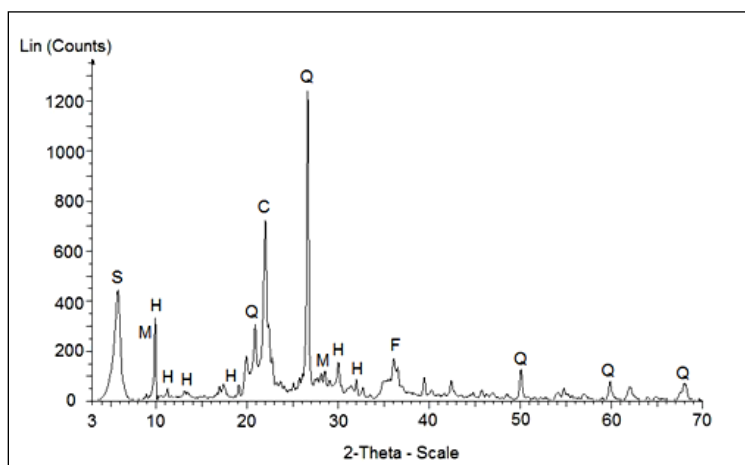


Fig. 1: Análisis Difractométrico del Material Zeolítico

Tabla 4: Composición del Material Zeolítico obtenida por XRF.

L.O.I.	Na ₂	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
11,91	<0,10	0,25	11,75	72,37	<0,10	0,56	1,95	<0,10	<0,10	0,83
XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF	XRF

Se puede observar (Tabla 4) los resultados emitidos del análisis químico del contenido de elementos mayoritarios de la muestra, en la cual se aprecia claramente el alto contenido de Si y Al, característica inherente de las zeolitas naturales. Otro parámetro relevante es la relación Si/Al, que determina el número de cargas negativas del esqueleto de la zeolita y por lo tanto el número de cationes asociados. Por ello las zeolitas se han utilizado para incorporar moléculas neutras por adsorción, y cationes orgánicos e inorgánicos por intercambio iónico. En esta investigación el valor de la relación Si/Al del material analizado es igual a 6,16; valor muy próximo a los rangos reportados en la literatura consultada (Hernández & Aguilar, 2002; Jiménez, 2004).

Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

El estudio de la morfología del material zeolítico, se llevó a cabo en un microscopio SEM Philips XL-20, equipado con microanalizador EDAX-DX4i (Detector de energía dispersiva de rayos X). La obtención de imágenes fue posible utilizando el detector de electrones secundarios, y recubriendo la muestra con una capa de oro a fin de hacerla conductora.

Se puede observar en la Figura 2a y 2b las micrografías del material zeolítico estudiado obtenidas con detector SE a diferentes aumentos, la morfología corresponde a cristales romboidales aplanados que se asemejan a formas tabulares o laminares, típicas de heulandita y cristales laminares de mordenita fibrosa, la cual es muy similar a la literatura revisada (Rodas s.f.).

Remoción del catión Pb (II) en función del tiempo

La Tabla 5 y la Figura 3 muestran los resultados de la prueba en función del tiempo. En la Figura 3, se puede observar que después de 24 horas, para las condiciones de la prueba; el incremento de los cationes retenidos por el material zeolítico estudiado se hace prácticamente constante.

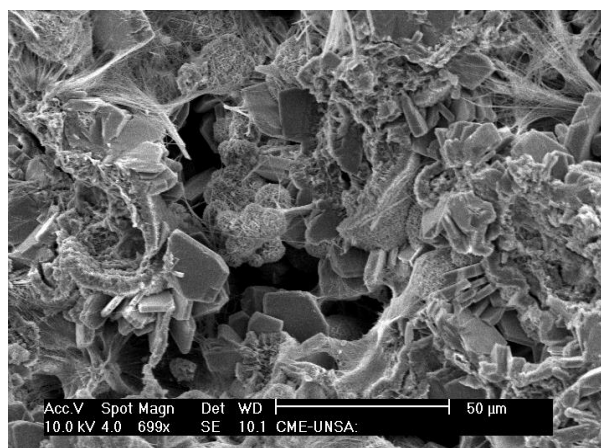


Fig. 2a: Heulandita (H) y Mordenita (M). Aumento 699X

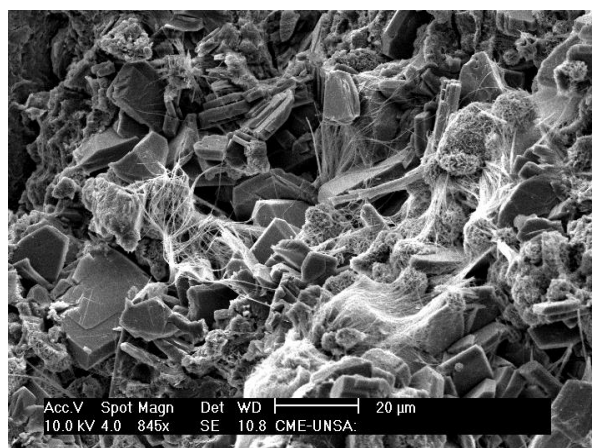


Fig. 2b: Heulandita (H) y Mordenita (M). Aumento 845X

Tabla 5: Remoción de Cationes Pb (II) en función del tiempo

Prueba	Tiempo (h)	Masa Zeolita (g)	Conc. Inicial Pb (II) (mg/L)	Conc. Final Pb (II) (mg/L)	Pb (II) Removido (mg)	Pb (II) (mg) Removido por g de Zeolita	% Pb (II) Removido
1	4	5,0	1029,6	711,2	83,3	16,7	53,9
2	8	5,0	1029,6	670,4	87,4	17,5	56,6
3	16	5,0	1029,6	550,0	99,4	19,9	64,4
4	24	5,0	1029,6	558,0	98,6	19,7	63,9
5	48	5,0	1029,6	576,6	96,8	19,4	62,7
6	72	5,0	1029,6	540,0	100,4	20,1	65,0
7	96	5,0	1029,6	522,8	102,2	20,4	66,1

Remoción del catión Pb (II) a diferentes concentraciones

La Tabla 6 y la Figura 4 muestran los resultados de la prueba a diferentes concentraciones. En función de los valores de remoción obtenidos para el catión Pb (II), se puede determinar que el material zeolítico objeto de este estudio tiene afinidad por este catión, ya que a diferentes concentraciones; la remoción va en aumento llegando a valores de hasta 94,66% de Pb removido, siendo estos valores similares a los estudios reportados por otros autores para zeolitas naturales (Leyva *et al.*, 2001; Alvarado *et al.*, 2013).

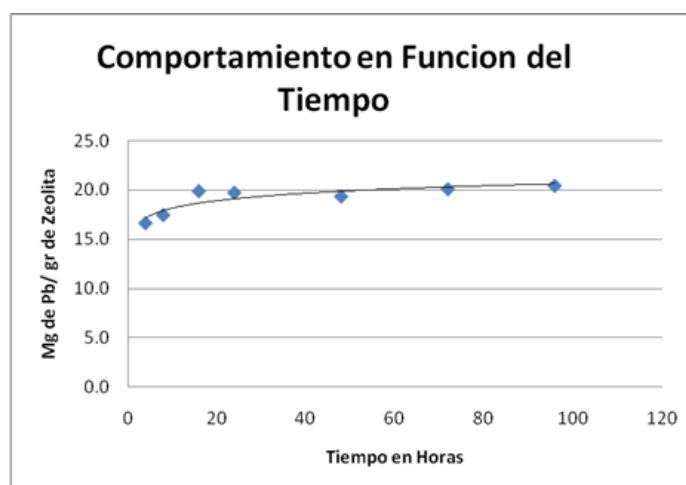


Fig. 3: Remoción de Cationes Pb (II) en función del tiempo

Tabla 6: Remoción de Cationes Pb (II) a diferentes concentraciones

Prueba	Tiempo de reacción (h)	Conc. Inicial Pb (II) (mg/L)	Pb (II) removido (mg)	Pb (II) removido por g zeolita (mg/g)	Pb (II) removido (%)
1	24	1677,60	50,64	25,32	15,09
2	24	1425,75	47,72	23,86	16,73
3	24	1197,63	47,67	23,84	19,90
4	24	958,51	42,25	21,13	22,04
5	24	718,94	42,65	21,32	29,66
6	24	599,07	39,59	19,80	33,05
7	24	359,51	34,30	17,15	47,71
8	24	239,65	29,73	14,86	62,03
9	24	119,95	19,61	9,80	81,74
10	24	59,97	11,35	5,68	94,66

Según Del Campo (2004), las zeolitas naturales poseen una estructura cristalina eléctricamente cargada que puede ser utilizada para retener cationes y aniones en las aguas servidas y Costafreda *et al.* (2011), menciona que estudiando zeolitas naturales procedentes de diferentes partes del mundo, cada variedad de zeolita natural aporta respuestas diferentes frente a los ensayos, posiblemente influenciado por la sutil variabilidad de su composición química. En esta investigación la zeolita natural estudiada, demostró tener la capacidad de remover el catión Pb (II) mediante adsorción e intercambio iónico en soluciones impactadas con este metal pesado a nivel laboratorio en las condiciones estudiadas.

CONCLUSIONES

La caracterización del material determinó la granulometría, densidad real, densidad aparente, porosidad, composición química, presencia de especies minerales y morfología del material confirmando que se trata de una zeolita natural del tipo Heulandita, misma que resultó ser un efectivo material descontaminante.

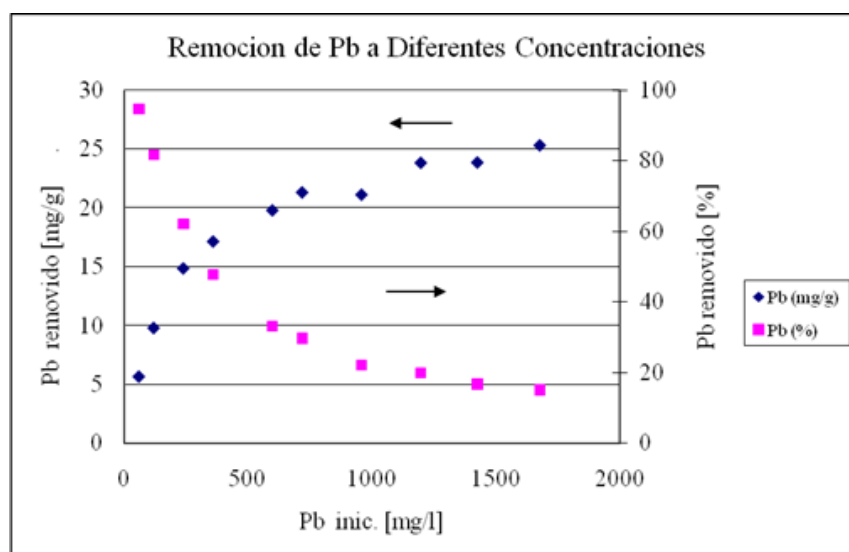


Fig. 4: Remoción de Cationes Pb (II) a diferentes concentraciones

Los valores de la densidad real (2,269 g/cc), la densidad aparente (0,760 g/cc) y su posterior aplicación en el cálculo de la porosidad dieron como resultado un alto valor (% P = 66,527%), que es inherente a las zeolitas naturales (% P > 50%).

En la caracterización mineralógica las especies encontradas fueron: esmectita, mordenita, heulandita, cristobalita, feldespato, y cuarzo; siendo las más abundantes la heulandita (H) y la mordenita (M) lo cual se corroboró con las micrografías obtenidas en la caracterización morfológica realizada con el microscopio electrónico de barrido.

La caracterización química reveló un alto contenido de Si y Al, con la cual se calculó la relación Si/Al = 6,16, valor muy similar a rangos encontrados en la bibliografía revisada ($2,9 \leq \text{Si/Al} \leq 5,25$).

Las pruebas de adsorción en función del tiempo y a diferentes concentraciones demostraron que el material zeolítico tiene afinidad por el catión Pb (II), ya que el proceso de remoción en las pruebas en función del tiempo muestran un significativo porcentaje de remoción (53,9%) a las 4 horas de tiempo de contacto y a las 24 horas de tiempo de contacto se hace constante con valores de 63,9% de plomo removido, llegando a remover hasta el 94,66% en 24 horas para soluciones a diferentes concentraciones.

Se concluye que la zeolita natural empleada para esta investigación tiene la capacidad de remediar aguas impactadas con plomo a nivel de laboratorio en las condiciones estudiadas, removiendo dicho contaminante mediante adsorción e intercambio iónico, lo que demuestra que podría ser una alternativa viable y de gran importancia para la región en procesos de mitigación comparada con otros materiales usados en la actualidad como el carbón activado y las zeolitas sintéticas.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Geoingeniería y Tecnologías Medioambientales, Università Degli Studi di Cagliari-Sardegna en Italia y a la institución PROGEMISA de la ciudad de Cagliari en Italia en la persona del Dr. Marcelo Rodríguez Valdivia. Al Departamento de Ciencias Farmacéuticas, MCPHS University, Boston, MA, United States en la persona del investigador Alejandro N. Rondón-Ortiz, PhD (c).

REFERENCIAS

1. Alfaro, E. (2016). *Manual de laboratorio: concentración de minerales*, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima: Fondo Editorial.
2. Alonso, A., Tejeda, E., Moreno, F., Rubio, M.C. & Medel, E. (2013). Estudio de laboratorio sobre utilización de zeolita natural versus zeolita sintética en la fabricación de mezclas semicalientes. *Materiales de Construcción*, 63 (310), 195–217.
3. Alvarado, J., Sotelo, M., Meza, D., Maubert, M., & Paz, F. (2013). Evaluación de la potencialidad de una chabasita natural Mexicana en la remoción de plomo en agua. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 29 (2), 201-210.
4. Barbosa, A., Barbosa, A., Santos, E., Leite, R. & Rodrigues, M. (2012). Obtención de la zeolita MCM-22 a través de la síntesis hidrotermal utilizando diferentes métodos. *Avances en Ciencias e Ingeniería: 3* (3), 59-67.
5. Chica, F. de J., Londoño, L.M. & Álvarez, M.I. (2006). La zeolita en la mitigación ambiental. *Revista Lasallista de Investigación*, 3 (1), 6. <http://www.redalyc.org/pdf/695/69530106.pdf>
6. Costafreda, J.L., Díaz, J.J. y Calvo, B. (2011). *Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España*. IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra-Geociencias. http://oa.upm.es/5730/1/Trabajo_ampliado1_Jorge_Costafreda_Congreso_Cuba_2011.pdf
7. Costafreda, J. L. (2014). *Tectosilicatos con características especiales: las zeolitas naturales*. 1ª ed. Madrid: fundación Gómez-Prado.
8. Curi, A., Granda, W., Hernani, M. & Sousa, W. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Información Tecnológica*, 17 (6), 111-118.
9. Del Campo, N. (2004). Identificación de zeolitas. Minera FORMAS. Recuperado, Octubre 11, 2017. Sitio web: <http://www.mineraformas.cl/Pdfs/010904%20Identificaci%C3%B3n%20de%20Zeolitas%20MF.pdf>
10. Fungaro, D.A., Izidoro, J.C. & Almeida, R.S. (2005). Remoção de compostos tóxicos de solução aquosa por adsorção com zeólita sintetizada a partir de cinzas de carvão. *Ecletica Química*, 30 (2), 31–35.
11. Giannetto, P., Montes, A. & Rodríguez, G. (2000). *Zeolitas, Características, Propiedades y Aplicaciones Industriales*. 2ª ed. Caracas: Innovación Tecnológica.
12. Hernández, H. & Aguilar, A. (2002). Calores Isostéricos de Adsorción de CO₂ en Zeolitas Naturales Mexicanas. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 46 (2), 109-114.
13. Jiménez, M. (2004). *Caracterización de minerales zeolíticos Mexicanos*. Tesis de pregrado, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, México. Recuperado, Enero 25, 2018. Sitio web: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/022/37022042.pdf
14. Leyva, R., Sanchez, M., Hernandez, M. & Guerrero, R. (2001). Remoción de metales pesados de solución acuosa por medio de clinoptilolitas naturales. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 17 (3), 129–136.
15. López, C.M., Sazo, V., Urbina, C. & García, M.G. (2009). Tamices moleculares que combinan micro y meso porosidad: una revisión. *Avances en Química*, 4 (3), 113–125.

16. Quiroz, H., Dussan, A., López, S., Calderón, J., Otárola, J. & Chica, R. (2014). Caracterización estructural de ceniza volcánica del nevado del Ruíz: Identificación fase zeolita. *Revista de Física.*, 48E, 7–9.
17. Rodas, M. (s.f.). *Tectosilicatos–Zeolitas*. Sitio Web: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15563/Tecto%206.pdf>
18. Rodríguez, G. & Rodríguez, I. (2000). *Eliminación de metales tóxicos mediante zeolitas naturales*. Bajado septiembre 16, 2013, de: <http://www.zeocat.es/docs/aguametalestoxicos.pdf>
19. Rodríguez, M. (2016). *Evaluación de la capacidad de adsorción de NH_4^+ y metales pesados Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} empleando zeolitas naturales y sintéticas*. Tesis Doctoral, Escuela de Postgrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú. Recuperado, Enero 22, 2018. Sitio web: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4515>
20. Saux, C., Renzini, M., Bercoff, P., Bertorello, H. & Pierella, L. (2012). Síntesis, caracterización y aplicaciones de zeolita CO-ZSM-5. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 3 (1), 21-31.