

OBTENCIÓN DE ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DEL PLOMO (II) DEL EFLUENTE MINERO RÍO ANTICONA – CERRO DE PASCO UTILIZANDO EL CARBÓN ACTIVADO DE CÁSCARA DE NARANJA

OBTAINING ISOTHERMAS OF ADSORPTION OF THE LEAD (II) OF THE MINING EFFLUENT RIVER ANTICONA - CERRO DE PASCO USING THE CHARCOAL ACTIVATED OF ORANGE HUSK

¹Humberto Dax Bonilla Mancilla, ²Candelaria Tejada Tovar, ³Jenny Del Pino Moreyra

RESUMEN

El estudio emplea el carbón activado de cáscara de naranja para la adsorción de Pb (II), presente en el efluente minero río Anticona de Cerro de Pasco. El experimento se llevó a cabo a pH de 3 y 5, por un tiempo de contacto de 120 minutos. El objetivo fue determinar la acción del carbón activado para la adsorción de iones de plomo (II) del efluente minero río Anticona. Las propiedades fisicoquímicas se estudiaron mediante evaluaciones de adsorción de nitrógeno BET, microscopia electrónica de barrido SEM y espectroscopia FTIR, el proceso de adsorción fue analizada mediante espectroscopia de absorción atómica, con una capacidad de adsorción de 478,5mg Pb (II)/L, que representa el 95,70 % de remoción de Pb (II). Asimismo, se determinó la cinética de adsorción el cual se ajustó al modelo pseudo-segundo orden, y la isoterma que representó mejor a los datos experimentales fue de Freundlich, contextualizando al proceso de adsorción como quimisorción.

Palabras clave: Carbón activado, cáscara de naranja, Freundlich, plomo.

ABSTRACT

The study uses the activated charcoal of orange peel for the adsorption of Pb (II), present in the Anticona River mine effluent of Cerro de Pasco. The experiment was carried out at pH 3 and 5, for a contact time of 120 minutes. The objective was to determine the action of activated charcoal for the adsorption of lead (II) ions from the Anticona River mine effluent. The physicochemical properties were studied through BET nitrogen adsorption evaluations, SEM scanning electron microscopy and FTIR spectroscopy, the adsorption process was analyzed by atomic absorption spectroscopy, with an adsorption capacity of 478,5mg Pb (II) / L, which represents 95,70% removal of Pb (II). Likewise, the kinetics of adsorption was determined, which was adjusted to the pseudo-second order model, and the isotherm that best represented the experimental data was Freundlich, contextualizing the adsorption process as chemisorption.

Keywords: Activated carbon, orange peel, Freundlich, lead.

INTRODUCCIÓN

La descarga de efluentes industriales y de las aguas residuales a las corrientes de agua y suelo se han convertido en grave problema ambiental, producto de la rápida urbanización e industrialización, especialmente en los países en vía de desarrollo, donde no se toma en cuenta las implicancias ambientales, conduciendo a la contaminación del medio ambiente con metales pesados, siendo estos no biodegradables, tóxicos y carcinogénicos (Abdelhafez y Li, 2016).

Entre los metales pesados con mayor toxicidad e incidencia, se encuentran el plomo, cadmio y cromo, cuyos límites máximos permisibles (LMP), según la legislación peruana son: 0,05 mg/L para plomo y cromo y 0,003 mg/L para cadmio.

El proyecto El Mantaro revive (2007) menciona que el río Anticona, efluente de las actividades mineras ubicada en la región de Cerro de Pasco-Perú, principal fuente del río Mantaro, recorre la ciudad metalúrgica de la Oroya considerada como una de las cinco

¹ Facultad de Ciencias Forestales y el Ambiente. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo-Perú. E-mail: daxbeto@hotmail.com

² Programa de Ingeniería Química. Universidad de Cartagena. Cartagena-Colombia. E-mail: ctejadat@unicartagena.edu.co

³ Facultad de Enfermería. Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo-Perú. E-mail: Jenny_dpm@hotmail.com

ciudades más contaminadas del mundo, en su trayecto transporta una concentración de Pb (II) de 0,630 mg/L superando en 30 veces los límites máximos permitidos por la legislación peruana, y en su recorrido por la provincia de Jauja-Junín traslada 11,833 T/año de plomo, contaminando las actividades agrícolas y ganaderas de la región central el país.

En consecuencia, este metal tóxico debe ser removido de las corrientes de agua y proteger la salud pública garantizando el uso seguro. Hoy en día, se conocen diferentes métodos para el tratamiento o remediación de las aguas residuales; entre ellos, se encuentran: precipitación, ósmosis inversa, reacciones de oxidación avanzada, intercambio iónico, adsorción, entre otros, siendo el proceso de adsorción el más recomendado por su versatilidad y bajo costo (Sun-Kuo *et al.*, 2016).

Frente a esta situación, nace la bioadsorción como el proceso respetuoso del medio ambiente para la separación de los iones de plomo (II), proceso adecuado por su versatilidad y bajo costo, asimismo, la bioadsorción se considera como un método eficaz para bajar rápidamente la concentración de contaminantes, tales como compuestos orgánicos, iones metálicos y colorantes disueltos (Hashemian *et al.*, 2013).

Las características químicas y morfológicas de los materiales absorbentes como el área superficial, la estructura porosa y grupos funcionales, son de mucha importancia para evaluar su idoneidad para la eliminación de los contaminantes del agua (Adbelhafeza y Lia, 2016).

Bajo este contexto, la región Junín es el primer productor de naranja en el Perú, representando el 55,6 % de la producción nacional seguido por Lima con 29,5 % y San Martín con 11,4 %. Asimismo, el consumo de naranja en la provincia de Huancayo es 3' 572,3 toneladas por año (INEI, 2015).

Tejada y Villabona (2014) afirman que la bioadsorción es un proceso que permite la captación activa o pasiva de los iones metálicos, debido a la propiedad que diversas biomásas vivas o muertas poseen para enlazar y acumular este tipo de contaminantes por diferentes mecanismos.

Tejada *et al.* (2016) probaron el aprovechamiento de cáscara de la yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con plomo (II), obteniendo una capacidad de adsorción de plomo (II) remanente de 52,34 y 98,36 mg/g para las cáscaras de yuca y ñame respectivamente. Asimismo, establecen que el enlace se da principalmente por las fuerzas físicas, formándose solo una monocapa.

El estudio tuvo como objetivo determinar el efecto del pH y el tiempo de contacto en la adsorción de Pb (II)

del efluente minero río Anticona-Cerro de Pasco, utilizando como adsorbente la cáscara de naranja.

MATERIAL Y MÉTODOS

Preparación del carbón activado

Para la preparación del carbón activado, se siguió el procedimiento descrito por Tejada *et al.* (2014), los frutos de naranja utilizados fueron cosechados en la provincia de Satipo, departamento de Junín – Perú. El precursor (cáscara de naranja) fue obtenido con el mayor cuidado posible, para garantizar la eficiencia del proceso. A continuación, se lavó con abundante agua potable a 323,15 K, para eliminar las impurezas. Se cortaron en pedazos de aproximadamente de 5 a 7 mm, en seguida se realizó un segundo lavado con agua destilada a temperatura ambiente, para retirar los taninos, resinas y azúcares reductores; luego se secó aproximadamente por 8 h a 343,5 K. Para el proceso de impregnación, se puso en contacto 50 g de precursor con 250 mL de solución de H₃PO₄ (J.T. Baker 99,9 % pureza) al 85 % pureza, siendo la relación de 0,70 g H₃PO₄ g⁻¹ precursor. La mezcla se agitó homogéneamente a una temperatura de 50 °C por 3 horas y se secaron en una estufa a 70 °C durante 12 horas (Sun-Kuo *et al.*, 2016). La carbonización se realizó a una temperatura de 773,5 K en atmósfera inerte para eliminar las sustancias volátiles, controlando el flujo de gas, temperatura y la velocidad de calentamiento, utilizando como agente oxidante el vapor de agua.

Caracterización del carbón activado

La caracterización de la textura porosa de los carbones activados obtenidos se determina por adsorción física de N₂ a 77 K, en el rango de presiones relativas entre 0,05 a 1. El cálculo del volumen total de poros se realizó a partir de la cantidad de N₂ adsorbido a P/P₀; para calcular el volumen de microporos, se usó la ecuación de Dubinin-Raduskevich (D-R), y el volumen de mesoporos se determinó de la diferencia entre volumen total y el volumen de microporos. El diámetro de poro se calculó en función al volumen de gas absorbido entre el área superficial BET. La ecuación utilizada para calcular el área superficial específica es la propuesta por Brunauer-Emmett y Teller, (BET) y el instrumento usado para realizar el análisis fue un equipo Gemini VII modelo 23901. La superficie morfológica del adsorbente se determinó mediante el uso del microscopio electrónico de barrido (SEM) modelo EVO 10Z6. Para la espectroscopia FTIR, se usó el espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier Shimadzu FTIR-8700; equipo que identificó los grupos funcionales presentes en el adsorbente, en el rango de número de onda 400 - 4000 cm⁻¹. Los análisis fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP).

Preparación de soluciones

Para la preparación de las soluciones, se siguió el método descrito por Abdelhafa y Lia, (2016). Se preparó una solución de 1000 mg/L de nitrato de plomo [Pb(NO₃)₂] diluido en agua destilada. Para la construcción de las isothermas, se diluyeron adicionando agua destilada obteniendo las concentraciones estándar de 4, 8, 12, 16 y 20 mg/L, y para realizar el diseño factorial 2^k se trabajó con pH de 3 y 5; se ajustó con NaOH 0,1 M y HCl 0,1M, los reactivos químicos utilizados en la experimentación fueron de grado analítico proveniente del laboratorio de química de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Ensayos de adsorción por cargas

Los ensayos de adsorción de Pb (II) se llevaron a cabo en el interior de matraces de 250 ml, que contenían 20 mg de adsorbente y 100 ml de solución sintética a una temperatura de 18 a 22°C, y 120 rpm durante 2 horas, a un pH 5, el cual fue controlado con NaOH 0,1M. Al final del tiempo de agitación, el sobrenadante se separó del adsorbente mediante centrifugación a 500 rpm durante 10 minutos, luego se analizaron las muestras haciendo uso del espectroscopio de adsorción atómica (Ning-chuan y Xue-yi, 2012) (Ning-chuan et al., 2010). La cantidad de biosorción (q) se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$q_e \text{ (mg / g)} = \frac{V(C_o - C_f)}{M} \quad (1)$$

La eficiencia de biosorción, A% del ion metálico se calculó a partir de:

$$A = \frac{C_o - C_e}{C_o} \times 100 \quad (2)$$

Donde, q_e es la capacidad de adsorción en equilibrio (mg/g); C_o y C_e son las concentraciones iniciales y el equilibrio (mg/l) de Pb (II) en la solución; V es el volumen (L) de solución y M es la masa (g) de adsorbente.

Cinética e isothermas de adsorción

La cinética de adsorción muestra el mecanismo de reacción del carbón activado con respecto al tiempo; para ello, se determinó las constantes de velocidad mediante la correlación de los datos experimentales con los modelos de pseudo primer orden o la ecuación de Lagergren y pseudo segundo orden. Para calcular el tiempo equilibrio de adsorción, se llevó a cabo la rapidez, tomando alícuotas de 10 ml, cada periodo de tiempo entre 10 y 200 minutos.

Las isothermas de adsorción

Describe cómo interactúa los adsorbentes con el adsorbato y establecen el equilibrio entre los iones metálicos adsorbidos por el adsorbente y los iones metálicos residuales en la solución durante la

adsorción en la superficie (Feng et al. 2010). Los dos tipos más comunes que describen el proceso de adsorción son las isothermas de Langmuir y Freundlich, cuyas ecuaciones de presenta en la siguiente tabla.

Todas las pruebas fueron realizadas por triplicado, eligiendo el promedio aritmético de los datos, el procesamiento de los datos experimentales fueron procesados en la hoja de cálculo Excel.

Tabla 1. Ecuaciones matemáticas de cinética e isothermas de adsorción

Modelo	Ecuación	Leyenda
Pseudo primer orden	$\text{Log}(q_e - q_t) = \text{Log } q_e - (k_1/2.303)t$	Q _e y Q _t son cantidades adsorbidas mg g ⁻¹ t= tiempo
Pseudo segundo orden	$t/q_t = 1/k_2 q_e^2 + t/q_e$ $C_e / q_e = 1 / q_{\text{max}} b + C_e / q_{\text{max}}$	k ₂ constante de pseudo orden g mg ⁻¹ min Q _{max} capacidad de la monocapa (mg g ⁻¹)
Langmuir		b constante de bioadsorción
Freundlich	$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + (1/n) \text{log } C_e$	K _f y 1/n son constantes de la isothermas de Freundlich

Fuente: Elaboración propia

Modelamiento matemático de la adsorción del Pb (II) de las aguas del río Anticona-Cerro de Pasco

El experimento de adsorción del Pb (II) de las aguas del río Anticona-Cerro de Pasco se desarrolló en función al diseño experimental presentado en la Tabla 2, para el análisis de datos se utilizó el diseño factorial 2^k, con tres réplicas y un k=2.

Tabla 2. Diseño experimental de la adsorción del Pb (II) del río Anticona – Cerro de Pasco

Nº de Exp.	Variable Independiente		Variable dependiente (mg/L)		
	pH	t	adsorción	adsorción	adsorción
1	3	60	Y1	Y1	y1
2	5	60	Y2	Y2	y2
3	3	120	Y3	Y3	y3
4	5	120	Y4	Y4	y4

Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición fisicoquímica de la cáscara de naranja

Con el objetivo de identificar la composición fisicoquímica de la cáscara de naranja, lo cual se muestra en la tabla 3, el contenido de carbono fijo y ceniza representa el ideal para ser considerado como un polímero adecuado para la preparación del carbón activado. Al respecto Sun-Kuo *et al.* (2014) manifiestan que para obtener un carbón activado de calidad, el precursor debe contener un bajo contenido de cenizas, y alto contenido de carbono fijo y de materia volátil, los cuales garantizan un buen rendimiento.

Tabla 3. Análisis físico-químico del precursor y del carbón activado con H_3PO_4 (% en peso) antes de la calcinación

Muestra	Humedad	Volátiles	Cenizas	Carbón fijo
Precursor	5,62	83,15	0,398	10,832
CA con H_3PO_4	4,52	29,32	13,05	58,71

Fuente: Elaboración propia

Tejada *et al.* (2016) determinaron la composición química de la cáscara de naranja, encontraron que el elemento con mayor porcentaje en la biomasa fue el carbono, con un 44,43%. Por otro lado, Abdelhafez y Li (2016), determinaron que el contenido del carbono en la cáscara de naranja fue de 65,72 %. El resultado obtenido se encuentra por encima del obtenido por Tejada *et al.* (2016) y por debajo de Abdelhafez y Li (2016), el factor que influyó en la determinación del carbono estaría en función al agente químico activante.

Caracterización del adsorbente- Espectros FTIR

Los espectros FTIR para el carbón activado con el H_3PO_4 y sin el ácido se muestran en la figura 1, el espectro FTIR sin el ácido, los picos amplios e intensos de adsorción alrededor de $3\ 520\ cm^{-1}$, corresponden a la O-H vibraciones de tensión debido a la inter e intra -molecular de enlace de hidrógeno de composición de polímeros como alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos, como la pectina, celulosa y lignina.

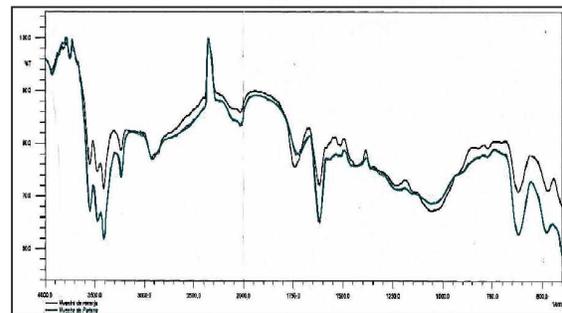
Por otra parte, se muestra los picos de $2\ 934\ cm^{-1}$ se atribuye a la simetría y asimetría C-H estiramiento de ácidos alifáticos. El pico $1\ 944\ cm^{-1}$ es la vibración de tensión de enlaces debidos a los grupos carboxilo no iónicos como $-COOH$, $-COOCH_3$.

El espectro FTIR del carbón activado con el ácido fosfórico presenta una señal a $3\ 732,0\ cm^{-1}$, al que se le asigna la vibración de estiramiento de compuestos O - H (alcoholes, celulosa, pectina). Los picos a $1058\ cm^{-1}$ pueden ser debido a la vibración de estiramiento de C-OH de los grupos alcohólicos y carboxílicos. En los espectros de muestran algunos similitudes entre uno y el otro espectro.

Al respecto, Ning, Chuan y Xue-yi (2012) manifiestan que los picos más amplios e intensos de absorción a $3\ 350\ cm^{-1}$ corresponden a la O-H, vibraciones de celulosa, pectina, absorbe el agua, hemicelulosa y lignina.

Los grupos carboxílicos con carga negativa ($-COO^-$) en la superficie del OP desempeñan un papel importante (aproximadamente 90 %) en la biosorción de Pb^{+2} a través de atracciones electrostáticas (Ning-chuan y Xue-yi, 2012).

Tejada *et al.* (2016) observaron que los picos de absorción, a $3\ 745\ cm^{-1}$, los cuales, corresponden a las vibraciones de estiramiento de los grupos O-H presentes en la celulosa, en la pectina y en la lignina del biomaterial.



----- negro carbón activado sin el ácido fosfórico
 ----- azul carbón activado con ácido fosfórico

Figura 1. Espectros FTIR del precursor con el H_3PO_4

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 2a y 2b, muestran las microfotografías SEM, se observa la textura morfológica del adsorbente, la superficie morfológica del carbón activado con H_3PO_4 presenta una estructura más regular y porosa con cavidades inferiores a $10\ \mu m$, características que favorecen una mejor adsorción de los iones de $Pb(II)$ en comparación al CA sin el H_3PO_4 . La estructura porosa se le atribuye a la relación de impregnación con el ácido fosfórico y a la temperatura de activación superiores a $450^\circ C$ (Sun-Kuo *et al.*, 2014). Al respecto, Abdelhafez y Lia (2016) muestran que los biocarbones de caña de azúcar (SC-BC) y cáscara de naranja (OP-BC) presentan una mayor porosidad que favorece la bioadsorción de los iones de plomo. Asimismo, Sun-Kuo *et al.* (2014) presentan las microfotografías SEM a una magnificación entre 400X y 1000X, donde demuestran una mayor porosidad del material con cavidades interiores de un diámetro de $8\ \mu m$.

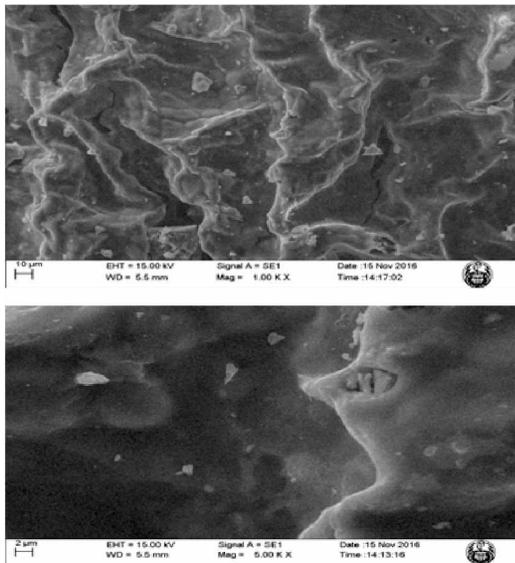


Figura 2a. Microfotografías del carbón sin el ácido fosfórico
Fuente: Elaboración propia

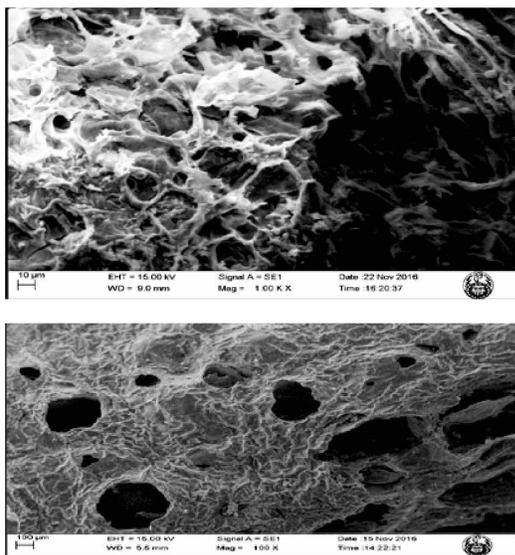


Figura 2b. Microfotografías del carbón activado con el ácido fosfórico
Fuente: Elaboración propia

El área superficial calculada por el procedimiento BET, el adsorbente con H_3PO_4 presenta un área de $1\,626,44\text{ m}^2/\text{g}$ y el área del carbón sin el ácido fosfórico muestra un $33,53\text{ m}^2/\text{g}$, de los resultados se puede mencionar que el ácido fosfórico incremento el área superficial de los adsorbentes.

En ese sentido, Ning, Chuan y Xue-yi (2012) mencionan, en el estudio adsorción del plomo con cáscara de naranja modificado con hidróxido de sodio, presenta un área superficial del $1496\text{ m}^2/\text{g}$. Asimismo, en el estudio adsorción de metales pesados con carbones activados a partir de semillas de aguaje activados con H_3PO_4 encontraron $1014\text{ m}^2/\text{g}$ (Sun-Kuo *et al.*, 2014). De igual manera, Peña *et al.* (2012) determinó el área superficial de carbones provenientes de cáscara de naranja fue de 940 y $1,200\text{ m}^2/\text{g}^{-1}$.

Cinética e isoterma de adsorción

Cinética de adsorción

Una de las características más importantes de la adsorción, es la cinética de adsorción o velocidad con la que la fase sólida adsorbe los iones. La figura 3, muestra el proceso de adsorción y el ajuste y caracterización del modelo cinético pseudo-segundo orden, en él se observa que en los 10 primeros minutos se tuvo la mayor adsorción de los iones, esta tendencia podría ser explicada debido a que el adsorbente contiene gran cantidad de grupos funcionales como los hidroxilos y carboxilos. Tejada *et al.* (2014), mencionan que la caracterización de los materiales adsorbentes por FTIR encontraron que los grupos hidroxilos y carboxílicos son los principales responsables de la capacidad de adsorción. Asimismo, Tejada *et al.* (2016) afirma que la presencia de lignina en la cáscara de ñame aumenta el número de grupos funcionales hidroxilos y carboxílicos que favorecen el proceso de carboxilación creando más sitios disponibles para la adsorción del metal.

De la misma manera, Ning-Chuan *et al.* (2010) Abdelhafez y Li (2016), concluyen que la presencia de grupos funcionales como los carboxilo, hidroxilo y carbonilo son probablemente los responsables de la adsorción de iones de plomo.

Para caracterizar la cinética de adsorción se usaron los modelos pseudo- primer orden y pseudo-segundo orden como se detalla en la tabla 4.

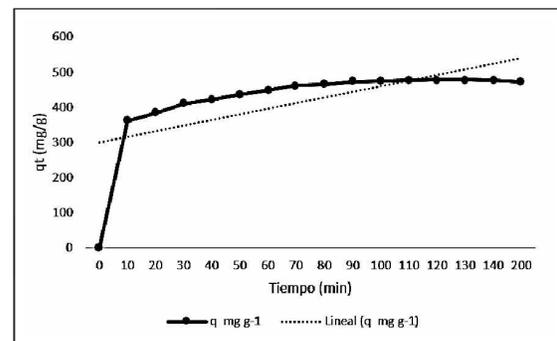


Figura 3. Cinética de adsorción y ajuste del modelo cinético de adsorción de Pb (II) usando carbón activado de cáscara de naranja.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Parámetros cinéticos de adsorción de Pb (II)

	Pseudo-primer orden	Pseudo-primer orden	
q_e cal.	70,31	q_e cal.	50,00
k_1	0,23744	$k_1\text{ min}^{-1}$	0,033
R^2	0,2478	R^2	0,999

Fuente: Elaboración propia

El modelo cinético que mejor correlación tuvo para el carbón de cáscara de naranja fue el modelo Pseudo-segundo orden, que permitió demostrar matemáticamente que el proceso de adsorción es el resultado de una interacción del tipo químico o quimisorción, al respecto Ning-Chuan *et al.* (2010) demostró que el proceso de biosorción siguió la cinética del modelo pseudo- segundo orden. Liang *et al.* (2009) encontraron que la ecuación matemática que describe el proceso cinético de la adsorción que mejor ajuste tuvo fue el modelo pseudo- segundo orden.

Asimismo, Pinzón y Vera (2009) mencionan que los resultados obtenidos permiten corroborar que el proceso de bioadsorción de Cr (III) sobre cáscaras de naranja está controlado por reacción química.

Isoterma de adsorción

Las isotermas de adsorción describen cómo interactúa los adsorbentes con el adsorbato estableciendo el equilibrio entre los iones metálicos adsorbidos por el adsorbente y los iones metálicos residuales en la solución durante la adsorción en la superficie (Feng *et al.*, 2010). La figura 4, muestra las isotermas de adsorción de Pb (II), el cual se incrementa con el aumento de la concentración de equilibrio y tiende a acercarse a valores constantes

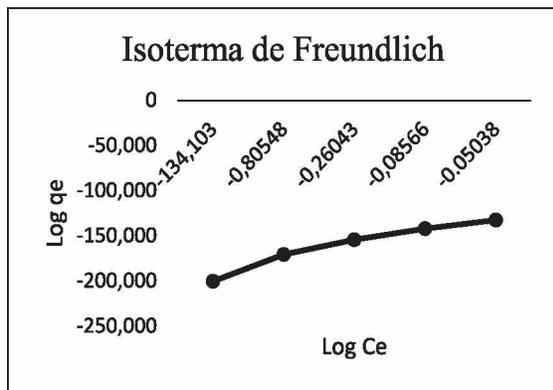


Figura 4. Ajuste de isoterma de Freundlich a la adsorción de Pb (II) usando cáscara de naranja
 Fuente: Elaboración propia

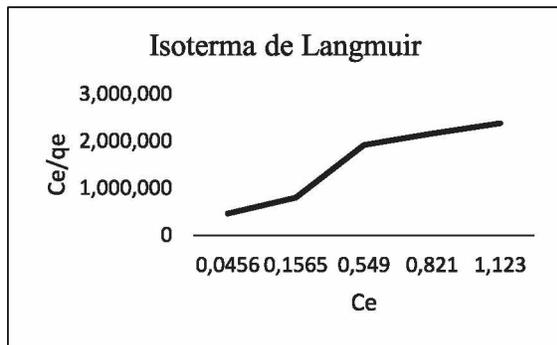


Figura 5. Ajuste de isoterma de Langmuir a la adsorción de Pb (II) usando cáscara de naranja
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Parámetros de ajuste de los datos experimentales a los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich

Modelo Langmuir	Modelo de Freundlich
R² 0,9237	R² 0,9734
q_{max} 0,05457	K_F 0,9734
K_L 3,2923	1/n 0,4745
	N 2,10748

Fuente: Elaboración propia

Los valores de los parámetros de las ecuaciones matemáticas y las correlaciones de las isotermas de Langmuir y Freundlich, se muestran en la tabla 5, se determinó que el modelo que mejor describe el proceso de adsorción de los iones del Pb (II) es la ecuación de Freundlich, asumiendo que la superficie del adsorbente es energéticamente heterogénea, conformada por grupos de sitios de adsorción de energías características. También, en esta isoterma, se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas y que sólo se adsorbe una monocapa.

Corroborando este hallazgo, Tejada *et al.* (2016) demostraron que el modelo que mejor describe la adsorción de Pb (II), para el zuro de maíz y cáscara de naranja sin modificar y modificado es el de Freundlich.

Comparación entre las capacidades de adsorción

La tabla 6 muestra la comparación entre las diferentes publicaciones consultadas y las obtenidas en el presente trabajo, con respecto a la capacidad de adsorción de los iones de Pb (II), usando como material adsorbente cáscara de naranja.

Tabla 6. Capacidades de adsorción de Pb (II) usando cáscara de naranja

Capacidad de adsorción mg/g	Método de activación	Referencia
49,98	Modificación CaCl ₂	Tejada et al. (2016)
74,8	Modificación H ₃ PO ₄	Sun-Kou et al. (2014)
56,18	Modificación CaCl ₂	Ning-chuan y Xue-yi (2012)
27,86	Pirolisis de biomasa	Abdelhafez y Li (2016)
12,44	Tratamiento alcalino	Lavado y Oré, (2016)
476,1	Hidrolisis ácida	Ning-chuan et al. (2010)
23,27	Tratamiento alcalino 30%	Herney y Enriquez, (2014)
478,5	Modificación H ₃ PO ₄	Presente estudio

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de adsorción en el presente estudio muestra mayor capacidad de adsorción de Pb (II), en relación a los obtenidos por Abdelhafez y Li (2016) y Herney y Enriquez (2014) y Lavado y Oré (2016), existiendo una similitud con lo obtenido por Tejada *et al.* (2016). Por otro lado, con respecto a la capacidad de adsorción presentado por Sun-Kou *et al.* (2014) demuestran que la adsorción de plomo fue mayor con el adsorbente activado con H₃PO₄, en comparación al presente estudio, cabe mencionar que las investigadoras usaron relaciones de impregnación de ácido fosfórico mucho más altas.

Modelamiento matemático de la adsorción del Pb (II) de las aguas del río Anticona – Cerro de Pasco

La tabla 7 muestra los datos experimentales del proceso de adsorción del Pb (II) de las aguas del río Anticona-Cerro de Pasco, el contenido inicial del plomo en las aguas del río Anticona fue de 0,735 mg/L, luego de la adsorción se redujo al 0,2354 mg/L, reduciendo el 67,97%.

Tabla 7. Adsorción del Pb (II) de las aguas el río Anticona – Cerro de Pasco

Nº de Exp	Variable Independiente		Variable dependiente (mg/L)		
	pH	t min	Bioadsorción	Bioadsorción	Bioadsorción
1	5	60	0,204	0,265	0,263
2	5	120	0,278	0,294	0,308
3	3	60	0,323	0,365	0,337
4	3	120	0,470	0,453	0,396

Fuente: Elaboración propia

Modelo matemático decodificado a escala natural
% adsorción = 37,055+8,29pH – 0,1675t

La tabla 8 muestra la simulación de la adsorción de Pb (II) confirmando que el modelo matemático predice satisfactoriamente el proceso de adsorción.

Tabla 8. Simulación del proceso de adsorción del Pb (II)

Nº de exp.	Z ₁	Z ₂	%adsorción	%adsorción
			Experimento.	Modelo
1	3	60	53,53	51,88
2	5	60	66,8	68,45
3	3	120	40,2	41,82
4	5	120	60,10	58,4

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La máxima capacidad de adsorción de los iones Pb (II) fue de 478,5 mg/L, representando el 95,7 % de efectividad, demostrando que los grupos funcionales como carboxilo, hidroxilo, carbonilo, y del área superficial de 1 626,44 m²/g, son los agentes primarios de la adsorción.

La cáscara de naranja posee las características necesarias para ser considerada como un buen adsorbente para la adsorción de los iones de Pb (II), por su alto contenido de carbono fijo, su alta disponibilidad y bajo costo, además es considerado como un precursor amigable con el medio ambiente.

El estudio cinético mostró que la adsorción es muy rápida y puede alcanzar el equilibrio dentro de los 40 min, y los datos experimentales se adaptaron a la ecuación pseudo-segundo orden, y la isoterma que mejor experimento fue de Freundlich.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelhafeza, A. y Lia, J. (2016). Removal of Pb (II) from aqueous solution by using biochars derived from sugar cane bagasse and orange peel. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers.* 21-37.
- Ayala, M., Jorge y Pardo M. (1995). *Optimización por diseños experimentales con aplicación a la ingeniería.* Lima, Perú: A&B. S.A., CONCYTEC.
- Cáritas Huancayo. (2007). *El Mantaro revive.* Huancayo. Depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2008-13299,
- Feng, N., Guo, X., Liang, S., Zhu, Y. y Liu J. (2011). Biosorption of heavy metals from aqueous solutions by chemically modified orange peel. *Journal of Hazardous Materials. ScienceDirect.* 49 – 54.
- Herney, J. y Enriquez, M. (2015). Remoción de plomo (II) usando lignina obtenida a partir de procesamiento del seudotallo de plátano. *Acta Agronómica.* 64, 209-213.

- Lavado, C. y Oré, F. (2016). Estudio de la bioadsorción de plomo divalente de soluciones acuosas usando biomasa modificada de marlo de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 82(4), 403–414.
- Liang, S., Guo, X., Feng, N. y Tian, Q. (2010). Effective removal of heavy metals from aqueous solutions by orange peel xanthate. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 20, 187-191.
- Ning-chuan, F. y Xue-yi., G. (2012). Characterization of adsorptive capacity and mechanisms on adsorption of copper, lead and zinc by modified orange peel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 22, 1224-1231.
- Peña, K., Giraldo, L. y Moreno, J. (2012). Preparación de carbón activada de cáscara de naranja por activación química caracterización física y química. *Revista Colombiana de Química*. 311–323.
- Pinzón, M. y Vera, L. (2009). *Modelamiento de la cinética de bioadsorción de Cr (III) usando cáscara de naranja*. 95-106.
- Sun-Kou, M., Obregón, D., Pinedo, A., Paredes, A. y Aylas J. (2014). Adsorción de metales pesados empleando carbones activados preparados a partir de semillas de aguaje. *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 80(4), 225–236.
- Tejada, C., Herrera, A. y Nuñez J. (2016). Remoción del plomo por biomasa residual de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) y zuro de maíz (*Zea mays*). *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 19(1), 169-178.
- Tejada, C., Ruiz, E., Gallo, J. y Moscote J. (2014). Evaluación de la bioadsorción con bagazo de palma para la eliminación de Pb (II) en solución. *Prospect*. 13(1), 59-67.
- Tejada, C., Montiel, Z. y Acevedo, D. (2016). Aprovechamiento de cáscaras de yuca y ñame para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con Pb (II). *Información Tecnológica*. 27(1), 9–20.