Technol. innov. j. (2025). Vol. 4 Núm. 1 págs. 34-48

TECHNOLOGICAL INNOVATIONS JOURNAL
ISSN: 2955-8239
https://tijournal.science
Editada por: Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú

ARTÍCULO ORIGINAL

Adsorción de oro mediante un compósito formado por porcelana – coral zoanthus en la minería artesanal de la zona de Arirahua- Condesuyos

Gold adsorption using a composite formed by porcelain – zoanthus coral in artisanal mining in the area of Arirahua – Condesuyos

Adsorção de ouro usando um compósito de porcelana-coral zoanthus na mineração artesanal na área de Arirahua-Condesuyos

Pavel Delgado
Universidad Hipócrates, Acapulco – Estado de Guerrero, México
Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi, Perú, Puno – Perú
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú
https://orcid.org/0000-0002-9328-545X
pdelgado@inudi.edu.pe (correspondencia)

Carmen Pancca
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú
https://orcid.org/0009-0001-3172-2407
cpancca@unsa.edu.pe

Jannyllú Covarrubias
Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa - Perú
https://orcid.org/0009-0007-2625-9503
jcovarrubias@unsa.edu.pe

DOI: https://doi.org/10.35622/j.ti.2025.01.003

Recibido: 05/11/2024 Aceptado: 26/12/2024 Publicado: 11/01/2025

PALABRAS CLAVE

adsorción, impacto ambiental, minería artesanal, oro.

RESUMEN. Los métodos tradicionales de extracción de oro, como la cianuración con uso de carbón activado, generan un considerable impacto ambiental debido al empleo de sustancias tóxicas y la generación de residuos peligrosos. Frente a este escenario, se plantean tecnologías más eficientes y ecológicas, como el proceso de adsorción utilizando un compósito de porcelana – coral zoanthus como adsorbente. El objetivo del estudio fue evaluar la eficiencia del compósito de porcelana – coral zoanthus para una muestra cianurada de oro proveniente de una mina artesanal ubicada en Arirahua – Condesuyos. Para ello, se propuso esta investigación de carácter exploratorio, experimental, cuantitativo y correlacional mediante un sistema de adsorción tipo Batch. Además, se aplicó el diseño factorial completo 2k con replica en los puntos centrales y el análisis de varianza (ANOVA) para determinar la capacidad de adsorción y los efectos e interacciones de las variables independientes en la concentración final de oro. Los resultados mostraron que, un 78.50% de capacidad de adsorción de oro del compósito, lo que indica que una gran cantidad del oro disuelto en la solución fue recuperada bajo las condiciones experimentales especificadas. También se determinó el modelo matemático y se evaluó el comportamiento de la isoterma de adsorción, ajustándose a la isoterma de Freundlich con R^2 igual a 0.8132, sugiriendo que la adsorción de oro se produce por un proceso físico y reversible. Se concluye que, este compósito podría ser considerado como una alternativa viable para la extracción de oro, contribuyendo de manera sostenible en el sector de la minería artesanal peruana.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

KEYWORDS

adsorption, environmental impact, artisanal mining, gold.

ABSTRACT. Traditional gold extraction methods, such as cyanidation using activated carbon, generate a considerable environmental impact due to the use of toxic substances and the generation of hazardous waste. Faced with this scenario, more efficient and environmentally friendly technologies are being proposed, such as the adsorption process using a porcelain-zoanthus coral composite as an adsorbent. The objective of this study was to evaluate the efficiency of the porcelain-zoanthus coral composite for a cyanide-laced gold sample from an artisanal mine located in Arirahua, Condesuyos. To this end, this exploratory, experimental, quantitative, and correlational study was proposed using a batch adsorption system. In addition, a 2k full factorial design with replicates at the center points and analysis of variance (ANOVA) were applied to determine the adsorption capacity and the effects and interactions of the independent variables on the final gold concentration. The results showed a 78.50% gold adsorption capacity of the composite, indicating that a large amount of dissolved gold was recovered under the specified experimental conditions. The mathematical model was also determined, and the adsorption isotherm behavior was evaluated, fitting the Freundlich isotherm with R^2 equal to 0.8132, suggesting that gold adsorption occurs through a physical and reversible process. It is concluded that this composite could be considered a viable alternative for gold extraction, contributing sustainably to the Peruvian artisanal mining sector.

PALAVRAS-CHAVE

adsorção, impacto ambiental, mineração artesanal, ouro.

RESUMO. Os métodos tradicionais de extração de ouro, como a cianetação com carvão ativado, geram um impacto ambiental considerável devido ao uso de substâncias tóxicas e à geração de resíduos perigosos. Diante desse cenário, tecnologias mais eficientes e ecologicamente corretas estão sendo propostas, como o processo de adsorção utilizando um compósito de porcelana-coral zoanthus como adsorvente. O objetivo do estudo foi avaliar a eficiência do compósito porcelana-coral zoanthus para uma amostra de ouro cianeto de uma mina artesanal localizada em Arirahua – Condesuyos. Para tanto, foi proposta esta pesquisa exploratória, experimental, quantitativa e correlacional, utilizando um sistema de adsorção do tipo Batch. Além disso, o planejamento fatorial completo 2k com replicação nos pontos centrais e análise de variância (ANOVA) foram aplicados para determinar a capacidade de adsorção e os efeitos e interações das variáveis independentes na concentração final de ouro. Os resultados mostraram uma capacidade de adsorção de ouro de 78,50% do compósito, indicando que uma grande quantidade de ouro dissolvido na solução foi recuperada nas condições experimentais especificadas. Foi também determinado o modelo matemático e avaliado o comportamento da isoterma de adsorção, ajustando-se à isoterma de Freundlich com R^2 igual a 0,8132, sugerindo que a adsorção de ouro ocorre por um processo físico e reversível. Conclui-se que este compósito pode ser considerado uma alternativa viável para a extração de ouro, contribuindo de forma sustentável para o setor de mineração artesanal peruano.

1. INTRODUCCIÓN

La minería aurífera es una de las actividades económicas más importantes en el Perú, esto debido a que cuenta con 36.67T de reservas de oro (Trading Economics, 2024) y al alto valor económico de este metal precioso (Cooper Acción, 2024), lo que genera un incremento proporcional en la actividad de la minería pequeña o artesanal, e incluso en la minería ilegal según el reporte del Ministerio del Ambiente (MINAM, 2013), ocasionando de esta manera daños medioambientales irremediables que afectan también a la salud pública debido al uso de insumos que contaminan el aire, suelo y agua para los métodos convencionales de extracción empleados como la amalgamación, flotación y la cianuración por agitación y en pilas (Vizcarra Núñez, 2021). Algunos de estos procesos requieren el uso de carbón activado de madera, el cuál pasa por pretratamiento químicos y un proceso de carbonización para su obtención (Menéndez Díaz & Martín Gullón, 2006), lo que

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

conllevaría a la depredación de bosques y la contaminación del aire generada por las emisiones que se producen al carbonizar la materia, además de tener un alto costo por ser un producto importado.

Por ello, estudios previos como el de Acosta Calcina (2022) y Tapia Medina (2021), han examinado alternativas más económicas de extracción de oro u otros metales y que sean menos perjudiciales para el medio ambiente, como el proceso de adsorción mediante el uso de adsorbentes alternativos, siendo la exploración de nuevos adsorbentes una opción poco investigada pero prometedora, como el compósito de porcelana – coral zoanthus. Este proceso de adsorción es un método que emplea materiales sólidos para eliminar sustancias de soluciones líquidas o gaseosas, produciéndose debido a las fuerzas de atracción entre las moléculas del fluido y de la superficie sólida (Agouborde Manosalva, 2008).

Además, existen antecedentes que han evidenciado el potencial de diversos materiales enfocados en la adsorción de metales pesados mediante una mezcla compuesta por piedra caliza, carbón activo y turba (Guijarro Padilla, 2022) o el coral en forma autoenroscada (Xianbiao et al, 2015) para su uso como adsorbentes, dando lugar a la experimentación para el desarrollo de un adsorbente que pueda optimizar el proceso de recuperación de oro que no dependa de materiales costosos o requiera procesos complejos ni limite su adopción en la minería artesanal.

Por lo tanto, la problemática central de este estudio radica en la necesidad de mejorar la eficiencia del proceso de adsorción para la recuperación de oro, reduciendo al mismo tiempo la contaminación ambiental causada por los métodos tradicionales de extracción a través del uso de carbón activado, mediante un análisis exhaustivo del compósito de porcelana – coral zoanthus; esperando que con los resultados obtenidos se establezca un modelo que garantice una alta capacidad de adsorción, proporcionando así una base científica para la aplicación de este material en la minería artesanal y promoviendo un enfoque innovador, sostenible y accesible para la recuperación de oro en el Perú.

2. MÉTODO

Esta investigación se realizó en el Laboratorio de Termodinámica de la escuela profesional de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, ubicado en la ciudad de Arequipa. La metodología desarrollada es de carácter exploratorio, experimental, cuantitativo y correlacional, debido a que los experimentos que se realizaron fueron a través de un sistema de adsorción tipo Batch, variando las condiciones de las variables independientes descritas en la Tabla 1, esto con el objeto de determinar la interacción y los efectos de las variables independientes con respecto a la variable dependiente, que es la concentración final de oro.

Asimismo, es de tipo cuantitativo, de diseño correlacional, de tipo experimental y de carácter exploratorio (Hernández Sampieri et al.,2014) debido a que los experimentos que se realizaron fueron a través de un sistema de adsorción tipo Batch, variando las condiciones de las variables independientes descritas en la Tabla 1, esto con el objeto de determinar la interacción y los efectos de las variables independientes con respecto a la variable dependiente, que es la concentración final de oro.

Para la parte experimental, se utilizó el diseño factorial completo 2k (Fernández Bao, 2020), debido a que se ha considerado que la cantidad de variables independientes que puedan afectar más al proceso de adsorción son 3, como se muestra en la Tabla 1. Como “k” representa a las variables independientes, su valor sería igual a 3,

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

siendo la cantidad de corridas experimentales igual a 8. Para determinar los puntos centrales, se determinó la media de la sumatoria de los niveles máximos y mínimos para cada variable, obteniéndose 3 puntos centrales, los cuales, sumadas a las corridas halladas dieron como resultado final 11 corridas experimentales.

Tabla 1

Variables independientes del experimento

Variables Independientes	Unidades	Nivel 1 (-)	Nivel 2 (+)	Punto Central
Concentración inicial de oro	mg/L	1	2	1.5
Masa del adsorbente	g/L	4	8	6
Tiempo	h	2	3	2.5

Preparación del compósito

Primeramente, se recolectó restos de porcelana del Relleno Sanitario de Quebrada Honda, ubicado en el distrito de Yura, los cuales pasaron una inspección cualitativa de color, ya que debido a su composición principalmente de arcilla de caolín, tiende a una coloración grisácea que en comparación con la cerámica tiene un color rojizo (PMA Ceramic, 2022), la cual concuerda con las muestras recolectadas. Luego se realizó una prueba física para determinar el porcentaje de absorción de agua de la porcelana de acuerdo con lo dispuesto por el estándar de la American Society for Testing and Materials (ASTM, 2023), la cuál debe ser un valor menor o igual al 0.5% debido a la baja porosidad del material.

Para efectuar esta prueba de absorción de agua, fue necesario lavar y secar los restos de porcelana en un horno por 12 horas, para que una vez estén a temperatura ambiente se determine su peso en seco siendo igual a 255.553 gr.; después se procedió a sumergir las piezas en agua hirviendo por un periodo de 5 horas y se mantuvieron en el agua durante 24 horas, para finalmente determinar el peso final (PMA Ceramic, 2022), siendo este igual a 256.383 gr. Con los datos obtenidos se halló el porcentaje de absorción de agua mediante la diferencia entre los pesos húmedo y seco dividido entre el peso en seco y multiplicado por el 100%, obteniéndose como resultado 0.364%, el cual nos indica que el material recolectado si es porcelana.

Con respecto al coral, se obtuvo una muestra de coral zoanthus en estado fenológico fresco de las playas de Mollendo, la cual se envió al laboratorio de Botánica del Herbarium Areqvipense (HUSA) para determinar la clasificación y especie del coral, siendo este de la familia Zoanthidae y de la subclase hexacorallia.

Una vez caracterizadas las muestras obtenidas, se procedió a pulverizar las muestras en un mortero de porcelana y se tamizó el pulverizado hasta alcanzar la pasante malla # 200 (tamaño de 74 µm), obteniendo un tamizado de porcelana (Vizcarra Núñez, 2021) y el nanofiltro de coral zoanthus (Acosta Calcina, 2022).

Activación química y térmica de la porcelana

Se pesó 100g de la muestra pulverizada de porcelana en un crisol y se le adicionó ácido acético glacial al 25% en masa en una relación del pulverizado con la solución de ácido acético de 1:2 y se agitó por un periodo de 4 horas a 200 RPM (Vizcarra Núñez, 2021). Luego se dejó reposar por 24 horas y se eliminó el excedente de

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

líquido, después se lavó la muestra con agua destilada hasta que el pH sobrenadante sea igual a 5.5 (Montaño et al, 2019) y finalmente se secó a 75°C por 4 horas (Morales Romero, 2023) y se guardó en un desecador como es observado en la Figura 1.

Figura 1

Porcelana activa química y térmicamente

Activación térmica de coral zoanthus

Se procedió a lavar tres veces el coral para eliminar las impurezas con agua destilada (agua desionizada), luego se filtró el agua excedente para finalmente secar el coral en el horno de secado 75°C por un tiempo de 4 horas (Rivera et al, 2004), obteniéndose el nanofiltro de coral zoanthus activo térmicamente (Figura 2).

Figura 2

Coral zoanthus activa térmicamente

Preparación de muestra minera

La muestra cianurada de oro se obtuvo de una pequeña mina artesanal, ubicada en Condesuyos en el sector de Arirahua, la cual primeramente se envió a Laboratorios Analíticos del Sur para determinar su concentración de oro, siendo ésta igual a 12.82 ppm, para luego proceder a realizar las diluciones a 2.0, 1.5 y 1.0 ppm de oro (Rojas Villalva y Zarate Vásquez, 2015).

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

Adsorción de oro

Para la síntesis del compósito, se consideró las proporciones de 80% porcelana y 20% coral zoanthus. Estas condiciones fueron establecidas después de considerar variables como la capacidad de adsorción de cada componente (Agouborde Manosalva, 2008), con el propósito de obtener un alto rendimiento de adsorción de oro según Rodríguez Martínez (2011) y Moreno Marenco (2013). Una vez mezclados y sintetizados los componentes del compósito, se procedió a pesar las cantidades requeridas para las pruebas experimentales según el diseño factorial. En un vaso de precipitado se colocó la cantidad de masa de compósito según la Tabla 1 con 400 ml de muestra, se agitó a 500 RPM (Barazorda Cuellar & Lima Condori, 2019) y se mantuvo el pH a 10 (Vizcarra Núñez, 2021) a una temperatura de 20 °C. Concluido el tiempo de agitación, se filtró la solución con papel filtro de tránsito lento para separar el adsorbente. La solución resultante se almacenó en envases, para posteriormente ser llevados a analizar por absorción atómica a Laboratorios Analíticos del Sur.

Figura 3

Adsorción de oro

3. RESULTADOS

Resultados del análisis de varianza (ANOVA) para adsorción de oro

En la Tabla 2, se observa los resultados finales de concentración de oro y el porcentaje de adsorción, donde se destaca la prueba 2 con un valor mínimo de 0.31 mg/L de concentración de oro, con el cual se determinó que la cantidad de oro adsorbido por el compósito siendo igual a 0.69 mg/L. Por otro lado, con respecto al porcentaje de adsorción se resalta que con la prueba 8 se logró un 78.50% de adsorción de oro y una concentración final de oro de 0.43 mg/L, determinándose también la cantidad de oro adsorbida por el compósito igual a 1.57 mg/L.

Tabla 3

ANOVA para adsorción de oro

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Masa de Adsorbente	0.0128	1	0.0128	12.39	0.0721

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
B: Tiempo	0.0072	1	0.0072	6.97	0.1185
C: Concentración Inicial de Oro	0.0968	1	0.0968	93.68	0.0105
AB	0.01445	1	0.01445	13.98	0.0647
AC	0.03125	1	0.03125	30.24	0.0315
BC	0.13005	1	0.13005	125.85	0.0079
ABC	0.0018	1	0.0018	1.74	0.3177
Falta de ajuste	0.00280152	1	0.00280152	2.71	0.2414
Error puro	0.00206667	2	0.00103333		
Total (corr.)	0.299218	10			

Nota. Datos obtenidos mediante el Software Statgraphics Centurion 19, estando en color rojo los efectos más significativos.

Mediante el análisis de varianza ANOVA, también se pudo obtener la ecuación de regresión lineal adaptada a los datos para determinar los valores del modelo matemático, siendo este:

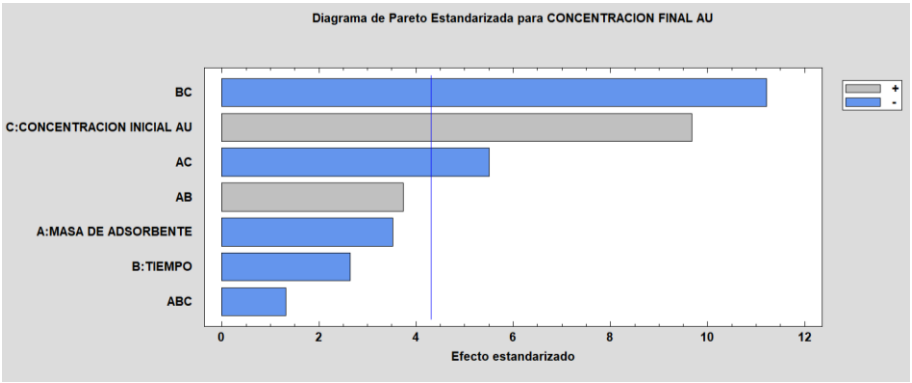
Concentración Final Au = -0.679773 - 0.145*Masa de adsorbente + 0.18*Tiempo + 1.42*Concentración inicial de Au + 0.0875*Masa de adsorbente*Tiempo + 0.0125*Masa de adsorbente*Concentración inicial Au - 0.33*Tiempo* Concentración inicial Au - 0.03*Masa de adsorbente*Tiempo*Concentración inicial Au

Gráficas factoriales de la adsorción de oro

La Figura 4 muestra el Diagrama de Pareto estandarizado, el cual presenta las variables que sobrepasan la línea de valor crítico, lo que indica que estas son significativas como también lo son sus interacciones. Por lo que, se infiere que el efecto de las interacciones dobles BC, AC y el efecto de la concentración inicial de oro son significativas, siendo incluso la interacción BC la más resaltante con respecto a la concentración final de oro para lograr la adsorción de oro.

Figura 4

Diagrama de Pareto estandarizada para concentración final de oro

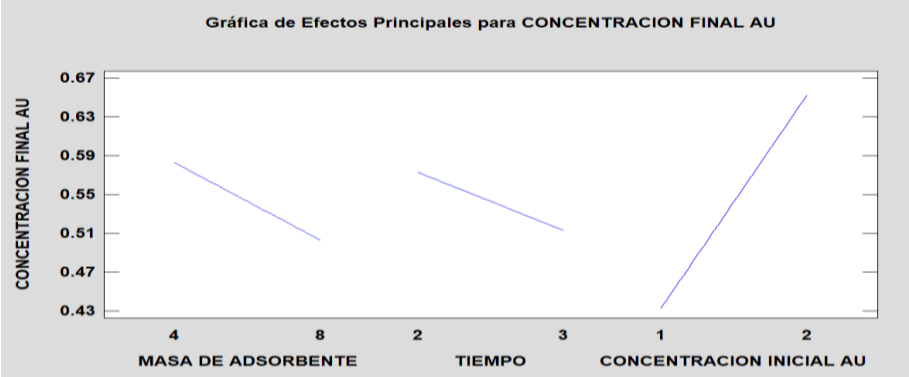


Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

En la Figura 5, se observa que a mayor masa del compósito la concentración final de oro será menor; con respecto al tiempo se muestra que a mayor tiempo de tratamiento la concentración final de oro tiende a disminuir, por lo que podemos inferir que los efectos de estas variables son inversamente proporcionales con respecto a la variable de respuesta. Se observa que, a menor concentración inicial de oro, menor es también su concentración final, evidenciando una relación directamente proporcional.

Figura 5

Efectos principales para la concentración final de oro

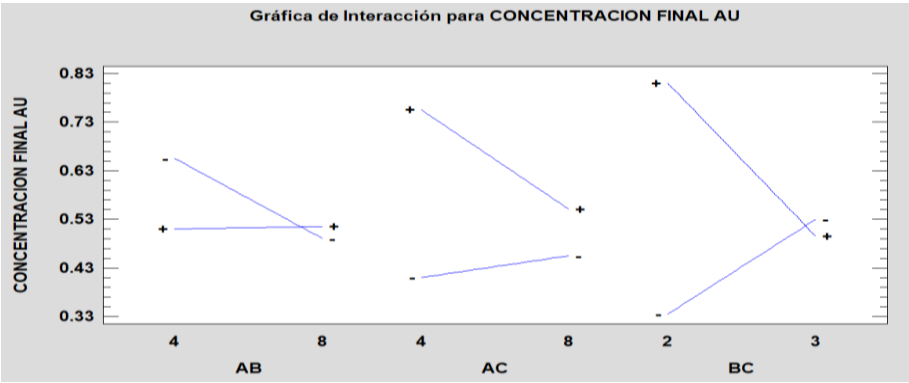


Nota. Gráfica obtenida mediante el Software Statgraphics Centurion 19.

En la Figura 6 se muestra la gráfica de interacción entre los factores dobles AB, AC y BC, del cual se puede inferir que la interacción AB tiene una ligera disminución en la concentración final de oro cuando se pasa de un nivel a otro por lo que esto sugiere que la interacción de este factor no es significativa con respecto a la concentración final de oro. En contraste con las interacciones de los factores AC y BC, se puede apreciar una mayor variabilidad en la concentración final de oro, lo cual indica que tienen una fuerte interacción en la variable respuesta y por ende sus impactos son significativos.

Figura 6

Interacción para la concentración final de oro



Nota. Gráfica obtenida mediante el Software Statgraphics Centurion 19.

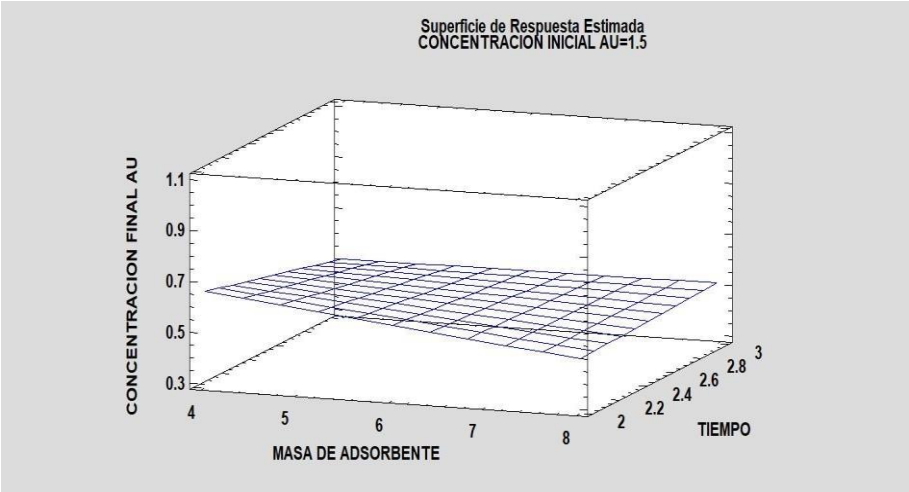
En la Figura 7, se aprecia un diagrama de Superficie de Respuesta estimada a una concentración inicial de oro de 1.5 mg/L, en donde se puede inferir que a medida que aumenta la masa del adsorbente, la concentración

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

final de oro tiende a disminuir ligeramente, esto debido a que el aumento de la cantidad de adsorbente genera más sitios activos para capturar el oro.

Figura 7

Superficie de Respuesta Estimada - Concentración inicial de oro



Nota. Gráfica obtenida mediante el Software Statgraphics Centurion 19, donde se observa la optimización del proceso a una concentración inicial de 1.5 mg/L.

De igual forma, con respecto al efecto del tiempo, a medida que este se incrementa la concentración final de oro también disminuye, ya que favorece al proceso de adsorción al darse un mayor tiempo de contacto entre la solución cianurada y el adsorbente. Por lo tanto, se puede señalar que tanto la masa del adsorbente como el tiempo influyen en la concentración final de oro con una tendencia a disminuirla; sin embargo, al ser los efectos de estas dos variables independientes relativamente suaves, su interacción no se considera significativa con respecto a la variable de respuesta.

Evaluación del compósito porcelana – coral zoanthus en la adsorción de oro

Los resultados obtenidos posibilitan la evaluación de la capacidad de adsorción del compósito, para lo cual se consideraron los valores de la Prueba 8, realizando una nueva corrida experimental de adsorción con el objeto de reducir errores, generándose los resultados de la Tabla 4:

Tabla 4

Capacidad de adsorción de oro en el compósito

Masa de Compósito (g)	Concentración Inicial de Oro en Solución (mg/l)	Ce del Adsorbato en la Solución (ppm, mg/kg)
0	1	1.00
8	1	0.31
8	1	0.32
8	1.5	0.54

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

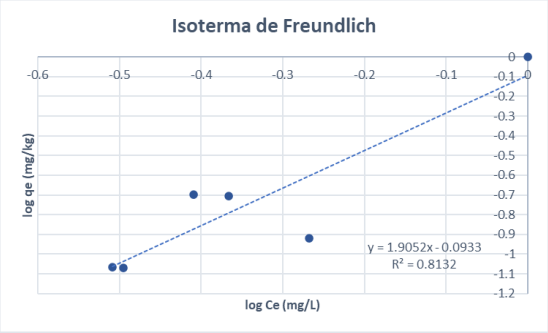
8	2	0.39
8	2	0.43

Nota. Se procesaron los datos en base a las condiciones de la Prueba 8.

Se utilizó la ecuación linealizada de la isoterma de Freundlich definida por Yang y Xing (2010); así como la ecuación linealizada de la isoterma de Langmuir (Tan et al, 2009) con los datos registrados de la Tabla 4, obteniéndose la isoterma de Freundlich como se muestra en la Figura 8, en la que el punto de intercepto de la línea es -0.0933 y la inclinación (pendiente) es 1.9052, lo que sugiere que el proceso de adsorción es favorable y que existen sitios de adsorción sobre la superficie del adsorbente con diferentes energías. En el caso de la isoterma de Langmuir (Figura 9), se observa que el punto de intersección de la línea igual a 4912.4 y la inclinación (pendiente) -4510.6, lo que indica que la capacidad de adsorción obtenida es extremadamente baja y la constante de afinidad negativa sugiere una repulsión entre el adsorbato y el adsorbente, por lo que se descarta que el sistema sea una adsorción en monocapa. Adicional a ello, en la isoterma de Freundlich el R^2 es igual a 0.8132, que en comparación con el R^2 de la isoterma de Langmuir igual 0.5158, nos indica que el modelo de Freundlich describe más adecuadamente el comportamiento en la adsorción de oro del compósito de porcelana – coral zoanthus con un 81.32% de variabilidad, por lo que se infiere que el proceso de adsorción se da sobre una superficie heterogénea y en múltiples capas.

Figura 8

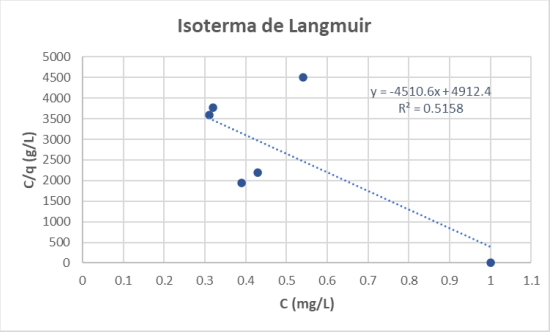
Isoterma de Freundlich



Nota. Gráficas obtenidas mediante el Software Statgraphics Centurion 19.

Figura 9

Isoterma de Langmuir



Nota. Gráficas obtenidas mediante el Software Statgraphics Centurion 19.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

4. DISCUSIÓN

La presente investigación evidenció que el compósito porcelana–coral zoanthus posee una destacada capacidad de adsorción de oro, alcanzando un 78.50% bajo condiciones experimentales óptimas. Esta eficiencia se obtuvo mediante un diseño factorial completo con réplicas en puntos centrales y análisis de varianza (ANOVA), lo cual garantiza solidez estadística con un nivel de confianza del 95%. Este valor posiciona al compósito como una alternativa altamente competitiva frente a adsorbentes tradicionales y naturales, como el carbón activado de cáscara de castaña de 64.76% (Barazorda Cuellar & Lima Condori, 2019) o la biomasa de coral zoanthus sin modificar de 23.00% (Acosta Calcina, 2022), según se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Capacidad de adsorción de diferentes tipos de absorbentes

Material	% Proporción	Tipos de adsorbato	% Adsorción	Referencia
Losas y cerámica	50:50	Pb	98.50	Vizcarra Núñez (2021)
Arrecife y cerámica	80:20	Fe	86.87	Morales Romero (2023)
Biomasa muerta de coral zoanthus	100	Au	23.00	Acosta Calcina (2022)
Carbón de cáscara de castaña	100	Au	64.76	Barazorda Cuellar y Lima Condori (2019)

La comparación con adsorbentes mixtos, como los compósitos losa–cerámica de 98.50% (Vizcarra Núñez, 2021) y arrecife–cerámica de 86.87% (Morales Romero, 2023), respalda la hipótesis de que la combinación de materiales con propiedades complementarias incrementa significativamente la eficacia de adsorción. En el caso del compósito evaluado, la mezcla en proporción 80:20 (porcelana: coral zoanthus) probablemente promovió una mayor porosidad y superficie específica, factores críticos en la captación de iones metálicos.

A nivel estructural y químico, la activación química de la porcelana con ácido acético glacial, proceso previamente reportado por Vizcarra Núñez (2021) y Montaño et al. (2019), permitió la introducción de grupos funcionales con carga negativa. Esto favorece la interacción electrostática con especies cargadas positivamente como el ion Au^{3+}, lo cual potencia la retención del metal en solución. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en la literatura sobre bioadsorbentes modificados, como los basados en arcillas activadas o quitina (Rodríguez Martínez, 2011; Moreno Marenco, 2013).

La adecuación del sistema al modelo de isoterma de Freundlich (R^2 = 0.8132) sugiere una adsorción heterogénea en múltiples capas, con sitios activos de distinta energía. Esto concuerda con estudios como el de Yang y Xing (2010), quienes asociaron este comportamiento a superficies irregulares con múltiples puntos de afinidad química. La validación del modelo permite concluir que el proceso es físico, reversible y está

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

influenciado por la heterogeneidad del adsorbente, descartando la adsorción monomolecular propuesta por el modelo de Langmuir, cuyo ajuste fue notablemente menor.

Por otro lado, los análisis gráficos del ANOVA y el modelo matemático derivado demuestran que las variables independientes —masa del adsorbente, tiempo y concentración inicial de oro— ejercen efectos significativos sobre la concentración final de oro, especialmente en sus interacciones dobles (BC y AC). La interacción BC, en particular, mostró un efecto notable en la eficiencia del proceso, lo cual coincide con lo reportado por Fernández Bao (2020), quien señala que en los sistemas multifactoriales la sinergia entre variables puede optimizar el desempeño del sistema de adsorción.

Desde una perspectiva ambiental y socioeconómica, este tipo de compósitos representa una alternativa viable y sostenible frente al uso del carbón activado, cuya producción implica deforestación, alto consumo energético y costos elevados (Menéndez Díaz & Martín Gullón, 2006). La utilización de residuos de porcelana recolectados en rellenos sanitarios y coral zoanthus disponible localmente, contribuye a la economía circular y reduce los impactos negativos asociados a la gestión de desechos sólidos (PMA Ceramic, 2022; Tapia Medina, 2021).

Asimismo, el desarrollo de esta tecnología es especialmente relevante para la minería artesanal, como la que se practica en la zona de Arirahua–Condesuyos, donde se requieren soluciones de bajo costo, fácil implementación y mínimo impacto ambiental. La reducción en el uso de insumos químicos agresivos y la recuperación eficiente del oro podrían ayudar a mitigar los efectos contaminantes de la minería ilegal y mejorar la sostenibilidad del sector, tal como ha sido señalado por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2013) y CooperAcción (2024).

En conjunto, los hallazgos de este estudio no solo validan la eficacia del compósito porcelana–coral zoanthus como un adsorbente eficiente y de bajo costo para la recuperación de oro, sino que también abren un abanico de posibilidades para investigaciones futuras en el campo de los materiales alternativos aplicados a la minería sostenible. Será fundamental, en etapas posteriores, profundizar en la optimización de parámetros operativos como la proporción exacta de los componentes del compósito, el tiempo de contacto, el pH del sistema, la temperatura y la masa del adsorbente, con el fin de maximizar la eficiencia del proceso en condiciones variables.

Finalmente, sería pertinente explorar el escalamiento del proceso hacia sistemas de mayor volumen y su integración con otras tecnologías limpias, lo cual permitiría validar su aplicabilidad en escenarios de producción minera artesanal e incluso en proyectos de remediación ambiental. Estos estudios complementarios permitirán consolidar el desarrollo de este compósito como una tecnología robusta, adaptable y sustentable en el ámbito de la minería del oro.

5. CONCLUSIONES

El compósito elaborado a partir de porcelana y coral Zoanthus demostró ser un adsorbente eficaz para la extracción de oro en el contexto de la minería artesanal en la zona de Arirahua – Condesuyos. Su desempeño evidencia una notable capacidad de retención del metal precioso, lo que pone de manifiesto su afinidad química con los iones presentes en la solución cianurada. Esta respuesta positiva en el proceso de adsorción resalta el potencial del compósito como una alternativa funcional y ambientalmente responsable frente a los métodos tradicionales que emplean carbón activado. En este sentido, su efectividad puede ser aprovechada en escenarios reales de producción minera artesanal, donde se requiere eficiencia, bajo costo y sostenibilidad.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

El modelo matemático derivado del análisis de varianza (ANOVA) permitió comprender y predecir el comportamiento del sistema de adsorción en función de las variables independientes: masa del adsorbente, tiempo de contacto y concentración inicial de oro. Esta herramienta estadística no solo brinda una aproximación cuantitativa a los efectos individuales y combinados de las variables, sino que también ofrece una base técnica robusta para la optimización del proceso. Al permitir simular condiciones de operación, el modelo facilita el diseño de experimentos más precisos y eficientes, orientados a maximizar la capacidad del compósito y a adaptar su uso en distintas condiciones operativas de campo.

Por otro lado, se evidenció que el modelo de la isoterma de Freundlich se ajusta mejor al proceso de adsorción del oro, lo cual indica que la interacción entre el adsorbente y el adsorbato ocurre sobre una superficie heterogénea, mediante un mecanismo físico, reversible y en múltiples capas. Esta característica es relevante para comprender la dinámica del sistema, ya que sugiere la presencia de diversos tipos de sitios activos con diferentes niveles de energía de adsorción. Además, está cualidad combinada con la alta afinidad observada entre el compósito y el oro, posiciona a este material como una alternativa altamente prometedora frente al uso de carbón activado.

En términos generales, el biocompósito desarrollado a partir de residuos de porcelana y coral Zoanthus se presenta como una opción innovadora, sostenible y de bajo costo para su aplicación en la minería artesanal. Su elaboración a partir de materiales reciclados no solo contribuye a la reducción de residuos sólidos, sino que también se enmarca dentro de los principios de la economía circular, al otorgar valor agregado a insumos desechados o de bajo valor económico. En comparación con el carbón activado, cuya obtención implica procesos intensivos en energía, uso de sustancias químicas y deforestación, este compósito representa una solución más respetuosa con el medio ambiente. Sin embargo, se requiere un mayor estudio del compósito con el objeto de optimizar su ratio de adsorción, así como evaluar la selectividad del compósito debido a que las soluciones de extracción de oro contienen otros iones y compuestos que podrían interferir con el proceso de adsorción.

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores declaran que no incurre en conflictos de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

Pavel Delgado: conceptualización, metodología, cuantificación de datos, investigación, recursos, escritura, revisión y edición, visualización, supervisión.

Carmen Pancca: metodología, validación, análisis, investigación, recursos, escritura, revisión y edición, visualización.

Jannyllú Covarrubias: metodología, validación, análisis, investigación, recursos, escritura, revisión y edición, visualización.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Los autores declaran que no recibieron un fondo específico para esta investigación.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber incurrido en aspectos antiéticos, ni haber omitido aspectos legales en la realización de la investigación.

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

REFERENCIAS

Acosta Calcina, E. V. (2022). *Evaluación de biosorción del oro por medio de nanofiltros biogénicos estructurados de Coral-Zoanthus en el proceso de extracción de oro en la pequeña minería.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín]. https://hdl.handle.net/20.500.12773/16227

Agouborde Manosalva, L. I. (2008). *Remoción de Metales Pesados por Medio de Adsorbentes No Convencionales*. [Tesis de Maestría, Universidad de La Frontera]. https://catalogo.ufro.cl/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=66753&shelfbrowse_itemnumber=92339

American Society for Testing and Materials. (03 de marzo de 2023). *Standard test methods for determination of water absorption and associated properties by vacuum method for pressed ceramic tiles and glass tiles and boil method for extruded ceramic tiles and non-tile fired ceramic whiteware products (ASTM C373-18)*. ASTM International. https://www.astm.org/c0373-18.html

Barazorda Cuellar, K. R. & Lima Condori, E. (2019). *Evaluación de la capacidad de adsorción de oro con carbón activado obtenido a partir de la cáscara de castaña*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Antonio Abad]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/handle/20.500.12918/4484

Cooper Acción. (27 de noviembre de 2024) *La marcha de la economía y la minería* https://cooperaccion.org.pe/economia-y-mineria-20/

Fernández Bao, S. (2020). *Diseño de Experimentos: Diseño Factorial*. [Tesis de Maestría, Universitat Politécnica de Catalunya BARCELONATECH]. UPCommons. https://upcommons.upc.edu/handle/2117/339723

Guijarro Padilla, A. S. (2022). *Determinación de la cinética de adsorción y curvas de ruptura de metales pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) en las sustancias adsorbentes piedra caliza, carbón activo y turba*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica de Ambato]. https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/3100552b-d7e4-401c-80b6-9777d7bbbe91/content

Menéndez Díaz, J. A. & Martín Gullón, I. (2006). Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production. En T. J. Bandosz (Ed.), *Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation* (Vol. 7, pp. 1-47). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S1573-4285(06)80010-4

Ministerio del Ambiente. (25 de octubre de 2013). Minería Ilegal. *Diálogos Ambientales con la Prensa.* https://www.minam.gob.pe/prensa/wp-content/uploads/sites/44/2013/12/dialogo-con-la-prensa-2_Minereia_ilegal.pdf

Montaño, D. F., Rosero, M. & Torres Palma, R. (2019). Arcillas activadas para el blanqueamiento del aceite de palma y remoción del colorante azul índigo carmín del agua. *Revista Producción + Limpia, 14*(2), 21-29. https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/2230

Morales Romero, J. F. (2023). *Tratamiento de Fe (III) en el río Coata por medio de un adsorbente compósito arrecife-cerámica y la determinación de la isoterma de adsorción, Juliaca - Puno*. [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio UNSA. https://hdl.handle.net/20.500.12773/16497

Moreno Marenco, A. R. (2013). *Estudio de diferentes bioadsorbentes como posibles retenedores de fosfatos en aguas*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.

https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/49446/52978683.2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y

PMA Ceramic. (2022) *What is the difference between porcelain and ordinary ceramics?* https://pmaimperio.com/en/blog/difference-between-porcelain-and-ceramic

Rivera, J., Tapia, N., Caja, V., Yarango, A., Reyes, I., Borja, A. & Figueroa, A. (2004). Biosorción del Cobre (II) por el Alga Marina Pretratada Lessonia Trabeculata. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química, 7*(2). 35-39. https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/download/4784/3858/16168

Rodríguez Martínez, M. L. (2011). *Adsorción de metales pesados mediante biocompósitos con base en quitina de diferentes grados de acetilación*. [Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.]. https://repositorio.ipicyt.edu.mx/handle/11627/2959

Rojas Villalva, Y. & Zarate Vásquez, C. C. (2015). *Efecto del pH y el tiempo de contacto en la adsorción de cromo hexavalente en solución acuosa utilizando montmorillonita como adsorbente.* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional del Centro Del Perú]. https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/1012

Tan, I. A. W., Ahmad, A. L. & Hameed, B. H. (2009). Adsorption isotherms, kinetics, thermodynamics and desorption studies of 2,4,6-trichlorophenol on oil palm empty fruit bunch-based activated carbon. *Journal of Hazardous Materials, 164*(3), 473-482. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.025

Tapia Medina, C. (2021). *Evaluación del concreto adicionando residuos de cerámica y porcelanato*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Chota]. https://repositorio.unach.edu.pe/handle/20.500.14142/176

Trading Economics. (2024). *Las reservas de oro – Lista de países – América.* https://es.tradingeconomics.com/country-list/gold-reserves?continent=america

Vizcarra Núñez, S. M. Z. (2021). *Determinación de parámetros óptimos de adsorción de plomo (II) en aguas residuales industriales mediante un compósito formado por losas y cerámica.* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de San Agustín]. http://hdl.handle.net/20.500.12773/14016

Xianbiao, W., Chuanliang, Z., Biao, K., Xiaoguang, Z., Jin, L., Wenzong, X., Weiping, C. & Huanting, W. (1 de septiembre de 2015). Self-curled coral-like γ-Al_2O_3 nanoplates for use as an adsorbent. *Journal of Colloid and Interface Science, 453*, 244-251. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.03.065

Yang, K. & Xing, B. (2010) Adsorption of Organic Compounds by Carbon Nanomaterials in Aqueous Phase: Polanyi Theory and Its Application. *Journal Chemical Reviews – American Chemical Society, 110*(10), 5989-6008. https://doi.org/10.1021/cr100059s

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0.