ÓRGANO DE DIVULGACIÓN DE LAS DIVISIONES DE INGENIERÍA, CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES Y CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

EPISTEMUS

CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SALUD

ISSN: 2007-8196

UNIVERSIDAD DE SONORA, ENERO-JUNIO DE 2023, NÚMERO 34

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

Lixiviación de metales, insectos como alimentos y residuos como nutrientes.

INVESTIGACIÓN

Modelo digital del campus Universidad de Sonora mediante fotogrametría con drones

Incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en el concreto

Remoción de los iones Ca2+ y Mg2+ de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio

Análisis integral de la disolución de los metales preciosos con sistemas de lixiviación novedosos a base de aminas

Análisis voltamperométrico de la descomposición reductiva de la calcopirita en el sistema ácido acético-agua

DESDE LA ACADEMIA

La miel de abejas sin aguijón: una medicina diferente

Residuos agroindustriales como fuente de nutrientes y compuestos fenólicos

La Supremacía del Número Uno

Harina de larva de mosca soldado negro y de organismos unicelulares como alternativas proteicas para alimentos acuícolas

CTS EPISTEMUS

Lixiviación de calcopirita con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en medio oxidante

¿Virus o bacteria? esa es la cuestión

Lixiviación de plomo con citrato a partir de un mineral de galena, efecto del pH.

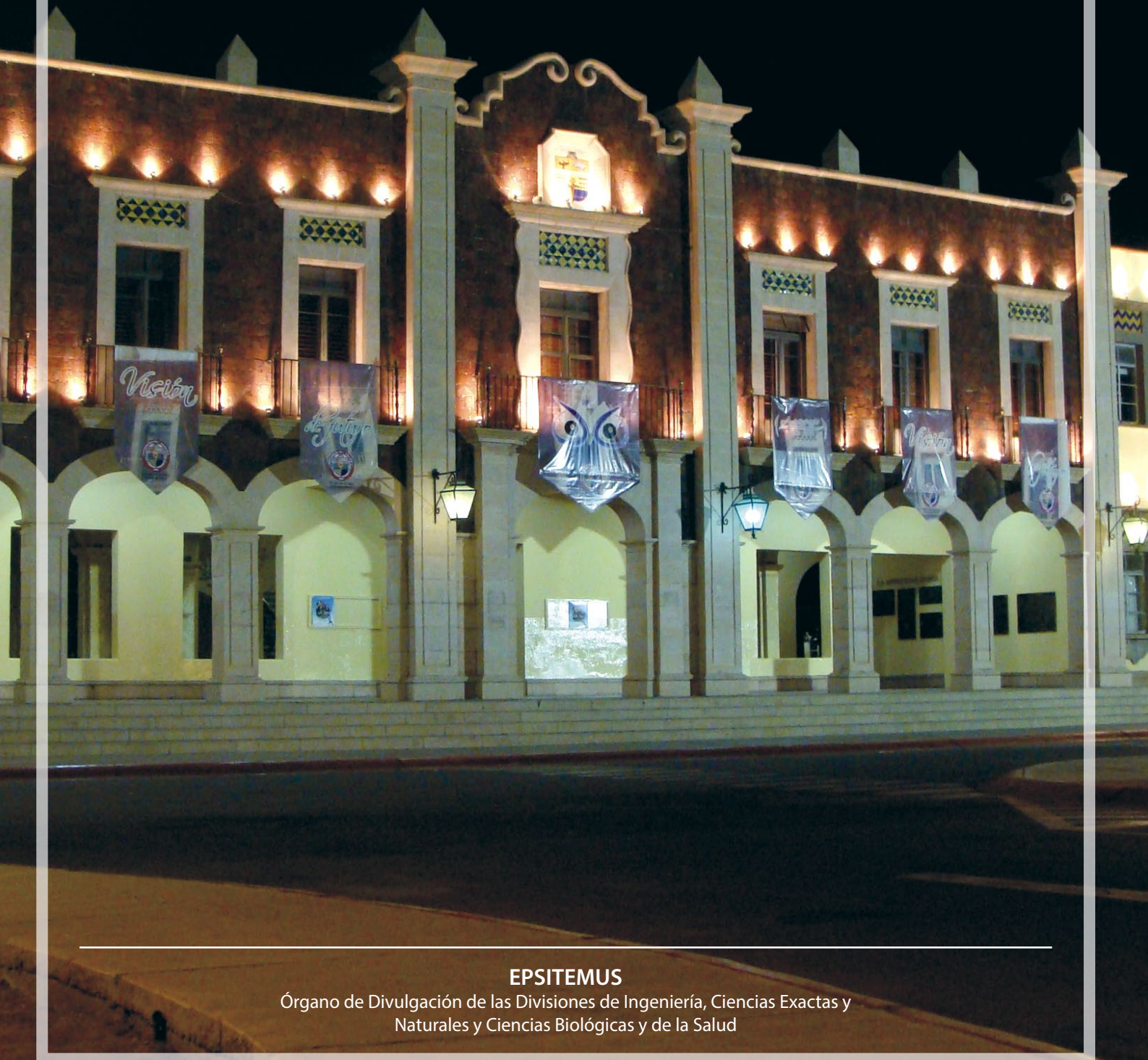
Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis

Tecnología de Bioflóculos: Un camino hacia la acuacultura sustentable

Indexada en:

AURA · biblat · CRIS - UNISON Sistema de Gestión de la Investigación · Dialnet · DOAJ Directory of Open Access Journals · SciELO México · EZB Elektronische Zeitschriftenbibliothek · Google Académico · I40C · latindex catálogo · MIAR Matriz de Información para el Análisis de Revistas · OpenAIRE · PERIÓDICA

“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



EPSITEMUS
Órgano de Divulgación de las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud

CONTENIDO

CONTENIDO 1

DIRECTORIO 2

EDITORIAL 3

BASES 4

INVESTIGACIÓN

MODELO DIGITAL DEL CAMPUS UNIVERSIDAD DE SONORA MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES 7
MARCO ANTONIO RAMOS CORELLA, DAVID ARTURO IBARRA DUARTE, GERARDO RAMIREZ URIBE, GEMA KARINA IBARRA TORUA, ISRAEL EDUARDO MIRANDA TORRES

INCORPORACIÓN DE VIDRIO PULVERIZADO Y CONCHAS DE ABANICO CALCINADAS EN EL CONCRETO 15
ERICK LUIS MILLA MONTES

REMOCIÓN DE LOS IONES CA^{2+} Y MG^{2+} DE LAS AGUAS DE FLOTACIÓN DE SULFUROS COMPLEJOS MEDIANTE LA ADICIÓN DE CARBONATO DE SODIO 24
SANDRA DANIELA OJEDA-VILLEGAS, ALEJANDRO URIBE-SALAS

ANÁLISIS INTEGRAL DE LA DISOLUCIÓN DE LOS METALES PRECIOSOS CON SISTEMAS DE LIXIVIACIÓN NOVEDOSOS A BASE DE AMINAS 33
CLAUDIA EMILIA COS CASTILLO, JUAN CARLOS FUENTES ACEITUNO

ANÁLISIS VOLTAMPEROMÉTRICO DE LA DESCOMPOSICIÓN REDUCTIVA DE LA CALCOPIRITA EN EL SISTEMA ÁCIDO ACÉTICO-AGUA 41
L.D. JASSO RECIO, J.C. FUENTES-ACEITUNO, R. PÉREZ-GARIBAY

DESDE LA ACADEMIA

LA MIEL DE ABEJAS SIN AGUIJÓN: UNA MEDICINA DIFERENTE 49
MARÍA GABRIELA GUAITA GAVILANES, MACARIO MARTINEZ CASTILLO, ARACELI HERNANDEZ ZAVALA

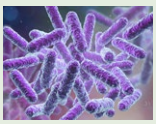
RESIDUOS AGROINDUSTRIALES COMO FUENTE DE NUTRIENTES Y COMPUESTOS FENÓLICOS 60
NORMA JULIETA SALAZAR-LÓPEZ, SALMA A. ENRÍQUEZ-VALENCIA, BAGDI SHAIN ZUÑIGA MARTÍNEZ, GUSTAVO A. GONZÁLEZ-AGUILAR

LA SUPREMACÍA DEL NÚMERO UNO 70
RODRIGO GONZÁLEZ GONZÁLEZ, ROBERTO NÚÑEZ GONZÁLEZ, RODRIGO IVÁN GONZÁLEZ VALENZUELA

HARINA DE LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRO Y DE ORGANISMOS UNICELULARES COMO ALTERNATIVAS PROTEICAS PARA ALIMENTOS ACUÍCOLAS 77
MARTIN PEREZ-VELAZQUEZ, HUGO CAÑEDO-ORIHUELA, REYNA D. FÉLIX-BERUMEN, MAYRA L. GONZÁLEZ-FÉLIX

CTS-EPISTEMUS

LIXIVIACIÓN DE CALCOPIRITA CON ÁCIDO ETILENDIAMINOTETRAACÉTICO (EDTA) EN MEDIO OXIDANTE 85
CARLOS URIEL MENDEZ-VELASCO, DANDY CALLA-CHOQUE, JOSHUA EMMANUEL FUENTES-RUBIO, MAURICIO JOAQUIN REYNA-ROBELO



¿VIRUS O BACTERIA? ESA ES LA CUESTIÓN 92
MÓNICA LIZETH MONTAÑO ICEDO

LIXIVIACIÓN DE PLOMO CON CITRATO A PARTIR DE UN MINERAL DE GALENA, EFECTO DEL PH. 107
DAVID MOISÉS PANTALEÓN TOLENTINO, DANDY CALLA CHOQUE, JOSÉ ENRIQUE SANTOS JALLATH

REMOCIÓN DE ZINC A PARTIR DE UN EFLUENTE SINTÉTICO POR ELECTRODIÁLISIS 115
LUCIA HERNÁNDEZ LAVALLE, JAIME CRISTÓBAL ROJAS MONTES, LUÍS RAMÓN ARELLANO PIÑA, VÍCTOR JESÚS MARTÍNEZ GÓMEZ, DIANA CRISTINA MARTÍNEZ CASILLAS

TECNOLOGÍA DE BIOFLÓCULOS: UN CAMINO HACIA LA ACUACULTURA SUSTENTABLE 123
MARÍA ELENA OCHOA-HERNÁNDEZ, EMMANUEL VILLANUEVA-GUITÉRREZ, LUIS RAFAEL MARTÍNEZ-CÓRDOVA, KADIYA CALDERÓN

EPISTEMUS

UNIVERSIDAD DE SONORA

EPISTEMUS. Año 17, No. 34, enero-junio 2023 es una publicación semestral arbitrada y es editada por la Universidad de Sonora a través de las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud. Blvd. Luis Encinas y Blvd. Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo Sonora; Tel. (662) 2592157, (662)2592183, www.epistemus.uson.mx. Editor ejecutivo: Dr. Raúl Sánchez Zeferino. Co-Editores y Dr. José Manuel Galván Moroyoqui y Mtro. Jesús Fernando García Arvizu. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-082917561100-102.ISSN: 2007-8196 otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: equipo interno de la Editorial de Epistemus de la Universidad de Sonora; fecha de la última modificación 30 de junio del 2023.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación. Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la presente publicación siempre y cuando se cite plenamente la fuente.

Información del contacto institucional de la publicación: Universidad de Sonora, Unidad Regional Centro, Blvd. Luis Encinas y Rosales s/n, Col. Centro, C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México. Tel. (662)2592157, Correo electrónico: epistemus@unison.mx, At'n. Raúl Sánchez Zeferino, Editor ejecutivo.

EPISTEMUS está Indexadaen: Scientific Electronic Library Online (SciELO México), en el portal especializado en Revistas Científicas y Académicas publicadas en América Latina y el Caribe (Biblat), en el portal de difusión de la Fundación Dialnet de la Universidad de la Rioja, España, Directory of Open Access Journal (DOAJ), en E-Z3 de Alemania, en el Google Académico, I40C – Crossref, el Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX), Base de datos MIAR, en la base de datos Open Aire de Europa, en el Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias (PERIODICA), en los respositorios de la Unison CRIS-Unison, Catalogo de Libros y Ciencia Unison.

Y en los sitios de consulta / repositorios AURA, EZ3, Google Académico, I40C, MIAR, OpenAire, Catalogo de Libros de la UniSon, Repositorio Institucional CRIS-UNISON y Ciencia Unison y es firmante de la Declaración DORA.

REVISTA EPISTEMUS
Universidad de Sonora
Unidad Regional Centro, Blvd. Luis Encinas y Rosales, s/n, Col. Centro, C.P. 83000,
Hermosillo, Sonora, México.
Teléfono: (662) 259 2157.
Correo: epistemus@unison.mx
Atn. Dr. Raúl Sánchez Zeferino
Editor Ejecutivo

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

Dra. María Rita Plancarte Martínez
Rector
Dr. Ramón Enrique Robles Zepeda
Secretaria General Académica
Dra. Rosa María Montesinos Cisneros
Secretaria General Administrativa
Dra. Luz María Durán Moreno
Vicerrectora de la Unidad Regional Centro
Dr. Rodolfo Basurto Álvarez
Director de Vinculación y Difusión

DIRECCIÓN GENERAL

Dr. Martín Antonio Encinas Romero
Dr. Rodrigo Melendrez Amavizca
Dr. Juan Carlos Gálvez Ruíz

EDITOR EJECUTIVO

Dr. Raúl Sánchez Zeferino
Departamento de Física - Universidad de Sonora
epistemus@unison.mx

SECRETARIO EPISTEMUS

Dr. José Luis Ochoa Hernández
Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Sonora

CORRECTOR DE ESTILO

Dra. Esther Hugues Santa Cruz
Departamento de Lenguas Extranjeras
Universidad de Sonora
Dra. Martha Olivia Ramírez Armenta
Departamento de Letras y Lingüistica
Universidad de Sonora

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

Dra. Erika Silva Campa
Departamento de Investigación en Física - Universidad de Sonora
Dr. Raúl Sánchez Zeferino
Departamento de Física - Universidad de Sonora
Dr. Francisco Javier Cuen Romero
Departamento de Geología - Universidad de Sonora

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

M.A. Jesús Fernando García Arvizu
Departamento de Ingeniería Civil y Minas - Universidad de Sonora
Dr. José Luis Ochoa Hernández
Departamento de Ingeniería Industrial - Universidad de Sonora

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

Dra. Kadiya del Carmen Calderón Alvarado
Departamento de Investigación Científica y Tecnológica - Universidad de Sonora
Dr. José Manuel Galván Moroyoqui
Departamento de Medicina y Ciencias de la Salud - Universidad de Sonora

DISEÑO GRÁFICO

L.D.G. José Benito Montaño Dórame

PÁGINA WEB

http://www.epistemus.uson.mx/

EDITORIAL

EPISTEMUS es la revista de la Universidad de Sonora, encargada de la divulgación y difusión de temas relacionados con las ciencias exactas y naturales, la ingeniería y ciencias de la salud.

El carácter interdisciplinario de las publicaciones de Epistemus en estos campos conduce a nuevas propuestas de investigación y soluciones que se aplican a diversos problemas locales, nacionales e internacionales.

El consejo editorial de Epistemus agradece a los Editores Asociados nacionales e internacionales su apoyo en la publicación de este número 34.

Epistemus es una revista que poco a poco se ha venido consolidando en el área de ciencias exactas, físicas, biológicas y naturales, con autores internacionales de países como Perú y nacionales de las ciudades de Saltillo, Ciudad de México, Mexicali, Hermosillo, Zacatecas y Querétaro.

Los artículos de la sección de investigación reflejan las novedades tecnológicas de hoy en día, el uso de drones en diversos sectores como el urbano, la incorporación de conchas de mar al concreto, para mejorar la resistencia de este, sistemas novedosos de lixiviación para separar metales preciosos entre otros procedimientos.

En la sección Desde la academia, los profesores investigadores promocionan los productos naturales como alternativa a medicamentos como el caso de la miel de abeja sin aguijón, la harina de insectos como alimento alternativo para peces y la reutilización de los residuos agroindustriales como fuente de nutrientes. Y de manera particularmente interesante, las diversas aplicaciones de la ley de Benford en sus cálculos matemáticos respecto al número 1.

Por último, en la sección de ciencia tecnología y salud, los diversos autores destacan la diferencia entre virus y bacterias, así como el uso de biofloculos, que es una tecnología de microorganismos que mantienen la calidad del agua en los procesos de acuacultura.

Cómo pudimos conocer estos títulos reflejan algunos de los aconteceres novedosos de la actualidad. Agradecemos la lectura de este número y su interés por la revista Epistemus. Mantengase en contacto con nuestras redes sociales y no dude en escribirnos para resolver cualquier duda.

Con todo lo anterior esperamos que este número cumpla con las expectativas de nuestros lectores, así como los trabajos publicados en los números anteriores.

Atte. Dr. Raúl Sánchez Zeferino
Editor Ejecutivo
Dr. José Luis Ochoa Hernández
Secretario

BASES PARA PARTICIPAR CON ARTÍCULOS O COLABORACIONES EN EPISTEMUS

POLÍTICA EDITORIAL

La educación, la ciencia y tecnología son consideradas como pilares fundamentales sobre los que se sustenta el desarrollo de un país; por eso es importante fortalecer el enlace entre los que generan el conocimiento y los beneficiados de ello: la sociedad. Uno de los aspectos que distingue a la Universidad de Sonora es la generación de conocimiento y su impacto en la sociedad. Es así como las Divisiones de Ingeniería, Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y de la Salud crearon el proyecto editorial Epistemus el cual, constituye un medio de información y comunicación para dar a conocer las investigaciones realizadas o en proceso, las actividades académicas, las reflexiones en torno a la ciencia, la tecnología y la salud.

OBJETIVO

Divulgar el conocimiento que se crea, genera y enseña en las áreas de Ingenierías, Ciencias Exactas y Naturales y las Ciencias Biológicas y de la Salud para favorecer el debate académico y la producción de nuevos conocimientos para generar un espacio de difusión, reflexión y crítica, en nuestro entorno.

DIRIGIDA A

Está dirigida a investigadores, profesores y estudiantes de las Ingenierías, las Ciencias Exactas y Naturales y Ciencias Biológicas y la Salud, y a todos aquellos profesionales que desarrollan la ciencia y la aplican en estas áreas.

SECCIONES DE LA REVISTA

La revista publica artículos originales e inéditos de proyectos de investigación, reseñas, ensayos, y comunicaciones breves sobre ciencia y tecnología y salud, en las siguientes secciones:

Investigación

Incluye resultados de proyectos de investigación y requiere mostrar la metodología del caso.

Divulgación

- **Desde la academia.** Comprende los temas relacionados con el quehacer académico, ensayos, reseñas, desarrollo de problemas, temas de la vida académica y su relación con el entorno.
- **Políticas de Ciencia y Tecnología**. Incluye temas que tienen que ver con el análisis de las políticas en materia de ciencia y tecnología, la relación entre la investigación y el desarrollo, la innovación y las políticas públicas.
- **Ciencia, Tecnología y Sociedad**. Se trata de promover una cultura científica, tecnológica, de la salud y de la sociedad, abordando diversos temas específicos que inviten a la reflexión, y/o al análisis para comprender el conocimiento.

ARBITRAJE

Cada trabajo será revisado por integrantes del Comité Editorial, y una vez que el trabajo sea considerado pertinente, se someterá al proceso de revisión en doble ciego por al menos dos especialistas en el área al que corresponde el artículo. Estos pares académicos deben ser de una institución diferente a la(s) institución(es) de origen del artículo. En caso de que los dictámenes de los especialistas sean contradictorios, el artículo se someterá al Consejo Editorial, o bien se solicitará una evaluación adicional.

- **La decisión podrá ser**: Aceptado, Condicionado o Rechazado.

El dictamen, será comunicado por escrito exclusivamente al autor corresponsal, en un plazo no mayor a tres meses, a partir de la fecha de recepción del original.

EXCLUSIVIDAD

Todos los textos deberán ser originales e inéditos, enviando declaratoria de originalidad (https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/libraryFiles/downloadPublic/11) y de no presentarse en paralelo para otras publicaciones. Se deberá asumir la responsabilidad si se detecta falsificación de datos y falta de autenticidad en la publicación.

DERECHOS DE AUTOR

La revista adquiere los derechos patrimoniales de los artículos sólo para difusión sin ningún fin de lucro, sin menoscabo de los propios derechos de autoría.

Los autores son los legítimos titulares de los derechos de propiedad intelectual de sus respectivos artículos, y en tal calidad, al enviar sus textos expresan su deseo de colaborar con la Revista Epistemus, editada semestralmente por la Universidad de Sonora.

Por lo anterior, de manera libre, voluntaria y a título gratuito, una vez aceptado el artículo para su publicación, ceden sus derechos a la Universidad de Sonora para que la Universidad de Sonora edite, publique, distribuya y ponga a disposición a través de intranets, internet o CD dicha obra, sin limitación alguna de forma o tiempo, siempre y cuando sea sin fines de lucro y con la obligación expresa de respetar y mencionar el crédito que corresponde a los autores en cualquier utilización que se haga del mismo.

Queda entendido que esta autorización no es una cesión o transmisión de alguno de sus derechos patrimoniales en favor de la mencionada institución. La Universidad de Sonora le garantiza el derecho de reproducir la contribución por cualquier medio en el cual usted sea el autor, sujeto a que se otorgue el crédito correspondiente a la publicación original de la contribución en Epistemus.

Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica se distribuyen bajo una licencia de uso y

Creative Commons (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/). Puede consultar desde aquí la versión informativa y el texto legal de la licencia. Esta circunstancia ha de hacerse constar expresamente de esta forma cuando sea necesario.

FORMATO GENERAL

1. **Título:** de la colaboración, máximo de 12 palabras. Escrito en los idiomas Español e Inglés. Debe representar el contenido del artículo y permitir al lector situarse en el contexto específico que aborda.
2. **Nombre(es) de los autores:** en mayúsculas, separados por una coma, sin grados. Máximo 5 autores.
3. **Resumen:** Aproximadamente de 100 a 150 palabras, colocado después de los autores del artículo. Debe contener información concisa de principales resultados, métodos y conclusiones.
4. **Palabras clave:** Mínimo 3 y máximo 5.
5. **Abstract:** La traducción al inglés del resumen es responsabilidad del autor.
6. **Keywords:** Mínimo 3 y máximo 5. La traducción al inglés es responsabilidad del autor.
7. **Afiliación de los autores:** ámbito disciplinar, institución académica, dirección de correo electrónico de autor(es).
8. **Estructura deseable para artículos de investigación** (mínima de 3000 palabras y maxima de 5000 palabras)**:**
   - **A.** Introducción.
   - **B.** Objetivo.
   - **C.** Planteamiento del problema.
   - **D.** Método de trabajo.
   - **E.** Resultados.
   - **F.** Discusión.
   - **G.** Conclusiones.
9. **Estructura deseable para artículos de divulgación** (Extension mínima de 2500 palabras y maxima de 4000 palabras):
   - **A.** Introducción.
   - **B.** Desarrollo.
   - **C.** Conclusiones.
10. **Citas y referencias:** Preferentemente de los últimos 5 años; deben seguir el formato IEEE (https://biblioguias.uam.es/citar/estilo_ieee) e ir al final de la colaboración.
11. **Contenido:** Elaborado en Microsoft Word de Windows. Utilizar letra tipo Arial de 12 puntos, normal, a doble espacio, justificada. Para las expresiones matemáticas debe usarse un editor de ecuaciones y deberán estar numeradas consecutivamente entre paréntesis. No incluir notas en pie de página.
12. **Tablas, fotos y gráficos:** Se deben incluir en archivos separados. Incluir el título (como nombre Figura1.ext). Fotos y gráficos en formato jpg o tif con una resolución (en puntos por pulgada) de 300 ppp para imágenes a escala de grises o color, 600 ppp para combinaciones imagen texto o 1,200 ppp para imágenes a línea; las tablas en Excel. Las imágenes deben ser originales o de licencia creative commons (libres de regalías).
13. **Plantilla:** Bajar la plantilla con el formato general para el documento: Para desarrollar el artículo se encuentra una plantilla establecida de acuerdo a las características de los artículos. En la liga https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/libraryFiles/downloadPublic/25 se puede encontrar la plantilla en Word para la publicación de los trabajos.

POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO

Esta revista proporciona un acceso abierto inmediato a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global de conocimiento. Las personas que utilicen la información contenida en la revista para su difusión están obligadas a referenciar la revista como fuente de información.

Esta revista no aplica ningún cargo económico ni en la entrega de artículos ni para la producción editorial de los artículos.

CLÁUSULA DE EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del Comité Editorial de la publicación. Las imágenes son responsabilidad de los autores y o de la imprenta que realiza el diseño. El Comité Editorial declina toda responsabilidad por los derechos que pudieran derivarse de ellas.

FECHAS DE RECEPCIÓN DE ARTÍCULOS

Los artículos se reciben durante todo el año de manera electrónica en la página:

www.epistemus.uson.mx

- Cierre de la edición del primer número del año: Primera quincena de marzo
- Cierre de la edición del segundo número del año: Primera quincena de septiembre
- Diseño final y distribución: Junio y Diciembre de cada año.

MAYORES INFORMES AL CORREO Y PÁGINA WEB

epistemus@unison.mx

www.epistemus.uson.mx

Dra. María Rita Plancarte Martínez

Rector de la Universidad de Sonora

2021 – 2024

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

A lo largo de 79 años, la Universidad de Sonora se ha consolidado como el espacio idóneo para el cultivo del conocimiento científico, social, artístico, desde cualquier vertiente que posea nuestra oferta educativa.

Además, nuestra institución es también el espacio privilegiado donde generaciones de estudiantes han conformado una comunidad universitaria orgullosa de su identidad, de sus valores. Ese mismo orgullo traspasa los muros de la institución y permea en la sociedad.

Desde esta administración institucional, tenemos claro que, cada vez más, debemos insertar el saber que propicia la Universidad, en servicio de los diferentes sectores que requieran apoyo.

Con esa consigna, la Universidad de Sonora continúa su fortalecimiento, mediante un verdadero diálogo con las y los sonorenses que, durante casi ocho décadas, han tenido en la Unison a una aliada, un respaldo firme y generoso para el desarrollo de la región.

En Junio de 2021, la Junta Universitaria lo elige por mayoría de votos como rector de la máxima casa de estudios del estado de Sonora, por el periodo comprendido del 16 de junio de 2021 al 15 de junio de 2024.

Dra. María Rita Plancarte Martínez

Modelo digital del campus Universidad de Sonora mediante fotogrametría con drones

Digital Model of the University of Sonora Campus through Photogrammetry with Drones

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Marco Antonio Ramos Corella [1]
David Arturo Ibarra Duarte [2]
Gerardo Ramirez Uribe [3]
Gema Karina Ibarra Torua [4]
Israel Eduardo Miranda Torres [5]

Recibido: 14 / 11 / 2022
Aceptado: 07 / 02 / 2023
Publicado: 23 / 02 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.263

Autor de Correspondencia:
Marco Antonio Ramos Corella
Correo : marco.ramos@unison.mx

Resumen

El objetivo de este trabajo fue proporcionar una perspectiva de los alcances que tiene la fotogrametría aérea para realizar diferentes actividades en la Ingeniería de la construcción en general. Asimismo, determinar si un dron comercial es capaz de realizar tareas que faciliten labores en algunos procesos de gestión administrativa en Universidad de Sonora con fines de logística, planificación, mantenimiento y registros de avance de obra dentro del campus. Se realizaron comparativas entre mediciones físicas de campo de manera tradicional y mediciones digitales en el modelo de nube de puntos 3D generado en el software. De esta comparativa se obtuvo, un valor promedio de 3.7 milímetros de variación por metro lineal.

Palabras clave: administración de la construcción, Fotogrametría aérea, Dron, Modelo digital

Abstract

The objective of this study was to provide a perspective of the aerial photogrammetry's scope to carry out different activities in construction engineering in general. Additionally, to determine if a commercial drone is able to perform tasks that facilitate work in some administrative management processes at the University of Sonora for purposes of logistics, planning, maintenance, and work progress records inside the campus. Comparisons were made between physical field measurements in a traditional way, and digital measurements in the 3D point cloud model generated by the software. From this comparison, an average value of 3.7 millimeters of variation per linear meter was obtained.

Keywords: *construction management, Aerial photogrammetry, Drone, Digital model*

1 *Doctor en Ingeniería de Proyectos: medio ambiente, seguridad, calidad y comunicación, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Sonora, México, marco.ramos@unison.mx, https://orcid.org/0000-0002-2564-3307.*
2 *Maestro en Ingeniería Urbana, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Sonora, México, david.ibarradu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9635-7861.*
3 *Doctor en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Sonora, México, gerardo.ramirez@unison.mx, https://orcid.org/0000-0001-7036-764X .*
4 *Doctora en Ciencias, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Sonora, México, gema.ibarra@unison.mx, https://orcid.org/0000-0001-6130-9640 .*
5 *Maestro en Ingeniería Urbana, Departamento de Ingeniería Civil y Minas, Universidad de Sonora, Sonora, México, israeleduardo.mirand@unison.mx, https://orcid.org/0000-0003-3745-7365.*

INTRODUCCIÓN

Productividad en la Ingeniería de la construcción

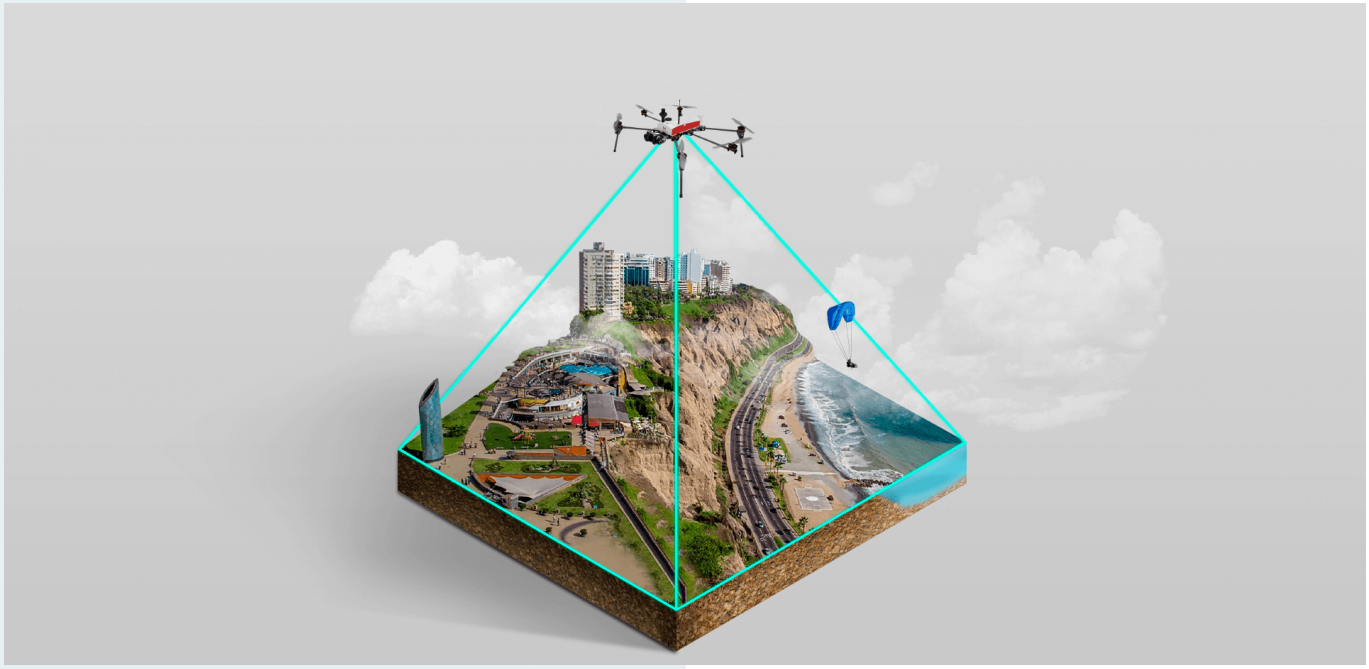
En un estudio elaborado por el McKinsey Global Institute acerca de los sectores económicos con mayor crecimiento en su productividad en las últimas décadas [1], se señala que, aunque el sector de la construcción es uno de los más grandes de la economía mundial, desde el año de 1945 el aumento de la productividad a penas se ha notado, cuando en industrias como la manufacturera o agricultura este incremento ha sido del 1 500 por ciento. En este informe, se agrega un gráfico en el que se muestra el crecimiento anual del valor agregado bruto real, por hora trabajada, por personas ocupadas, en el que aparece México como el país con mayor rezago en crecimiento en la productividad de esta industria entre todos los países analizados. Sin embargo, este instituto afirma que el uso de nuevas tecnologías puede contribuir a disminuir el rezago existente y cerrar la brecha entre estos países, sin incrementar los costos de manera considerable.

Uno de los mayores desafíos de la construcción es la entrega eficiente de los proyectos; ya que se realizan en entornos complejos y llenos de incertidumbre, por lo que es prudente promover soluciones innovadoras que coadyuven a superar los desafíos y a crear valor para los involucrados [2]. Es posible resolver muchos de estos problemas por medio de datos y evidencia obtenida de manera rápida, eficiente y segura, mediante el uso de drones. [3] Lo anterior, debido a que su uso disminuye el costo y el tiempo de las construcciones, además de incrementar la seguridad, productividad y brindar otros beneficios, por lo que el uso de vehículos aéreos no tripulados podría ser la solución a algunos de los grandes desafíos que enfrenta la industria [2]. Esta serie de beneficios se puede alcanzar ya que los drones tienen la ventaja de ser más rápidos que las personas, que pueden llegar a lugares inaccesibles y dado que se tiene la opción de equiparlos con cámaras de video, sensores, radares, hardware de comunicación, etc., pueden transferir información en tiempo real a los encargados de administrar las obras [4].

A partir de la automatización del proceso con ayuda de los drones se aprecia una reducción en el esfuerzo requerido, comparado con los métodos tradicionales por lo que se mejoran las operaciones, la planificación y se pueden hacer ajustes o correcciones en el sitio de la obra [5]. Por beneficios como el anterior, [6] consideran que los drones inteligentes serán la próxima gran innovación y modificación en la industria de la construcción y que sus aplicaciones serán aún más amplias, sobre todo en el campo de infraestructura. [7] refuerzan esta idea y manifiestan que las aeronaves pilotadas a control remoto son una innovación tecnológica que va a revolucionar el mundo de la construcción ya que aceleran el progreso de los proyectos y contribuyen a incrementar la seguridad de las obras.

TIPOS DE DRONES

Los drones se pueden clasificar en dos principales categorías: los aviones de ala fija y los aviones de ala giratoria o multirrotores [8]. Mediante el uso de un dron de ala fija se puede abarcar más territorio ya que presentan mayor autonomía de vuelo, pero para trabajos de carácter local se pueden utilizar plataformas de vuelo multirrotor [9]. Los drones de tipo multirrotor presentan las ventajas de bajo costo y alta maniobrabilidad [8], este tipo de aeronaves son las más adecuadas para desarrollar las actividades más requeridas como capturar imágenes y videos; además, tienen las ventajas de despegue y aterrizaje vertical, vuelo estacionario o a muy baja velocidad, gran maniobrabilidad, precisión de vuelo y pueden transportar cargas más volu-



minosas en relación con su tamaño en comparación con los aviones [10] por lo que tienen un gran potencial para facilitar el proceso de construcción de muchas formas [11].

FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es una técnica de medición por coordenadas en tercera dimensión que, utiliza fotografías y puntos de referencia topográficos sobre el terreno como medio de medición. Si se trabaja con una foto es posible obtener información bidimensional, pero si se trabaja con dos o más fotos, y éstas cuentan con una zona de traslape, permite obtener visión estereoscópica o información tridimensional [12]. Anteriormente, las actividades de recolección de este tipo de información se realizaban mediante métodos de topografía clásica, que requiere mucho tiempo y presupuesto, y fotogrametría, que requiere grandes infraestructuras y es de disponibilidad selectiva; sin embargo, la evolución de la tecnología ha brindado soluciones como el uso de los drones cuyas características permiten cubrir las necesidades del control de obra pues, combinan las bondades de la topografía clásica y la fotogrametría, mientras reducen sus inconvenientes [13].

La fotogrametría con drones es una técnica de reconstrucción tridimensional basada en imágenes que se ha adoptado en diversas actividades de construcción [14]. Esta técnica permite medir sobre fotografías y con ello determinar las propiedades geométricas y situaciones espaciales de objetos [12], debido a que los datos obtenidos de imágenes de drones pueden usarse para elaborar un modelo digital 3D por medio de técnicas de visión fotogramétrica por computadora [15]. Para realizar esto, primeramente, se realiza un vuelo denominado fotogramétrico. Como resultado del vuelo se obtiene una nube densa de puntos, modelo digital del terreno y ortofoto [13]. Una vez tomada esta serie de fotografías con el dron y mediante los softwares de Diseño Asistido por Computadora (CAD) es posible crear un Modelo Digital del Terreno (DTM) a partir de la nube de puntos, y con ellos crear una superficie para representar las curvas de nivel, modelo de elevaciones o modelo de pendientes [12].

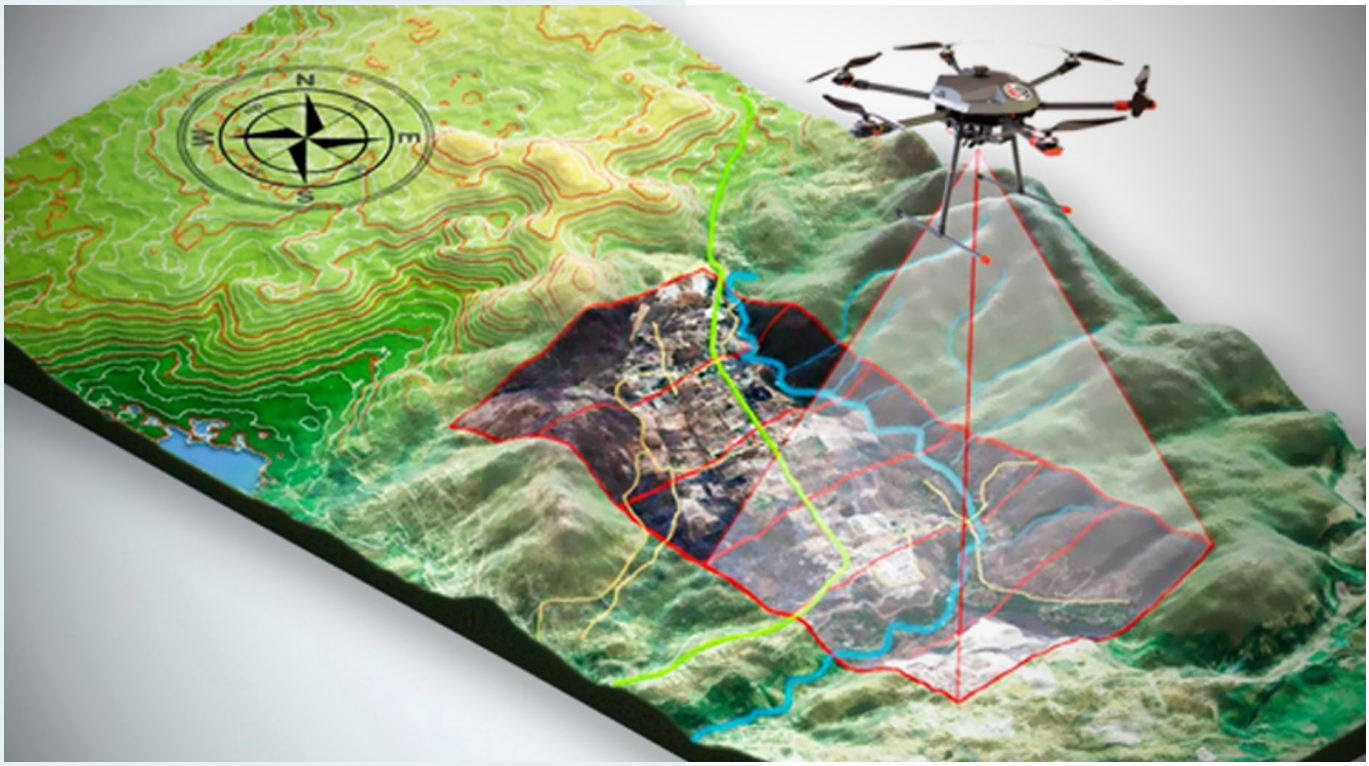
En resumen, la fotogrametría permite, a partir de imágenes aéreas o terrestres 2D, reconstruir un modelo 3D en forma de "nube de puntos", del cual es posible derivar medidas 3D exactas de elementos arquitectónicos [16]. Este proceso se puede realizar mediante el uso de drones para capturar imágenes o vistas aéreas, lo cual tiene la ventaja de una mayor resolución, rapidez y bajo costo [6], [8]. Lo anterior, ha desencadenado que la fotogrametría digital aérea con drones sea una de las principales técnicas para obtener información de estructuras tridimensionales a partir de modelos bidimensionales [17].

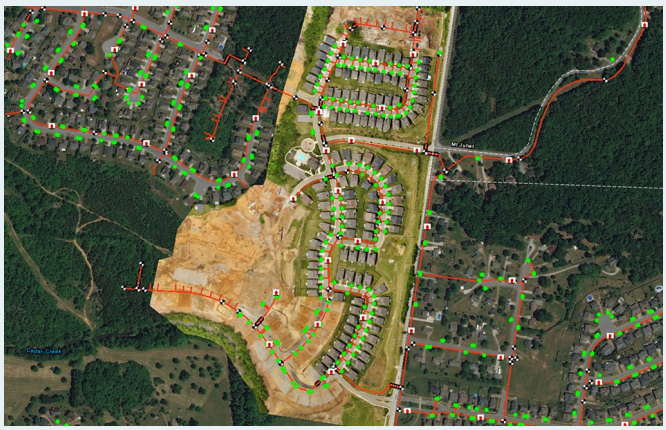
ESTADO DEL ARTE

En 2018 se realizó una investigación sobre las aplicaciones de los drones multirrotor en la cual se analizaron sus beneficios y exploraron el potencial en el futuro de la industria de la construcción [11]. En dicho estudio se revisan y discuten algunos de los aspectos principales sobre la aplicación de esta tecnología en varias etapas del proyecto tales como: topografía, logística, proceso de construcción en el sitio, mantenimiento y demolición. Asimismo, se eevelan que las principales contribuciones se dan en materia de seguridad laboral, así como una mayor rentabilidad y la reducción de las emisiones de carbono. Se concluye que su utilidad seguirá en aumento en la industria de la construcción en el futuro próximo.

Por otra parte, en un estudio realizado en el sitio arqueológico de Todos Santos en Ecuador [18], se utilizó la fotogrametría digital tridimensional para documentar los bienes patrimoniales. Este trabajo abarcó el levantamiento fotogramétrico, el uso de distintos softwares para procesar la información y finalmente la construcción del modelo 3D. Se concluye que, aunque el uso de esta tecnología requiere dominio previo de diferentes medios de representación gráfica y uso de herramientas, a su vez abre posibilidades para la gestión y conservación del patrimonio cultural, y para procesos educativos y de difusión.

En 2019, se realizó un estudio para evaluar cómo se ejecuta el trabajo desde la perspectiva de la Ingeniería de Resiliencia [19]. Elaboraron una lista de verificación de elementos de seguridad con base en activos recolectados por drones en el sitio de trabajo. El objetivo era evaluar el cumplimiento de las normas de seguridad brasileñas mediante la lista de verificación elaborada e investigar cómo los drones pueden contribuir al sistema de gestión de la seguridad en la obra mediante un monitoreo del trabajo que se realiza cada día. Se encontró que el uso de recursos tecnológicos como fotografías y videos para analizar el trabajo real puede identificar los puntos en donde la práctica se aleja de los procedimientos establecidos y mejorar los protocolos de seguridad. Como conclusión agregan que los drones pueden ser utilizados para realizar inspecciones periódicas en materia de seguridad y proporcionar información que contribuya a tomar las mejores decisiones sobre todo en las tareas que implican un alto riesgo de sufrir accidentes.





Asimismo, en 2021 [8] desarrollaron un trabajo en el que se presenta cómo la tecnología de los drones puede ser usada para beneficiar el monitoreo de las construcciones urbanas durante su proceso de construcción y después de terminado. Se encontró que el uso de esta tecnología es cada vez más común en la industria de la construcción ya que facilita la verificación de los estándares de construcción. Concluyen que hay un incremento en la cantidad de investigaciones en las que se utilizan los drones y que será una tendencia, puesto que es fácil de usar, brinda accesibilidad a lugares inalcanzables para una persona y tiene bajos costos de operación.

OBJETIVO

En este trabajo se planteó como objetivo elaborar un modelo digital de superficie del Campus Hermosillo, de la Universidad de Sonora por medio de fotogrametría aérea con drones; con la finalidad de proporcionar una perspectiva de los alcances que tiene esta herramienta para realizar diferentes tareas en la construcción en general. Además de determinar si un dron comercial es capaz de realizar actividades prácticas útiles en la Universidad de Sonora con fines de logística, planificación, mantenimiento y registros de avance de obra dentro del campus. Para comprobar este uso práctico se analizó la precisión del modelo digital obtenido por medio de mediciones reales en sitio para evaluar su fiabilidad y justificar su uso.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria de la construcción siempre tiene el objetivo de reducir el tiempo y costo de los proyectos, así como realizarlos con la mayor habilidad y seguridad [3], es decir, mejorar la productividad. Una fuerte debilidad es que, comúnmente, la recopilación de información se realiza de manera manual y como es un proceso difícil se hace cada semana, quincena, o mes; por lo que la información se tiene con retraso y esto dificulta la capacidad de los gerentes de monitorear los avances y compararlos con el cronograma, con los costos y otros indicadores de desempeño [5]. Esto retrasa la toma de decisiones, evita que en el caso de una eventualidad se reaccione rápidamente y provoca que el costo de las correcciones se incremente por el paso del tiempo.

Uno de los mejores caminos para mejorar la productividad en la construcción es infundir tecnología digital, nuevos materiales y automatización avanzada [1]. Actualmente, se puede ahorrar en gestión de la construcción al realizar actividades de recolección y obtención de resulta-

dos mediante el uso de drones, sin la necesidad de tener a un trabajador [8]; además se agrega la ventaja de que se evita exponerlo a riesgos, sobre todo cuando las actividades se llevan a cabo en condiciones de trabajo difíciles. El uso de los drones puede reducir eficientemente el costo y el tiempo que se dedica a la inspección de los componentes, ya que tradicionalmente se realiza de manera manual y esto requiere el uso de mano de obra y tiempo, que se puede reducir si esta tecnología se utiliza [6].

MÉTODO DE TRABAJO

Descripción del caso de estudio

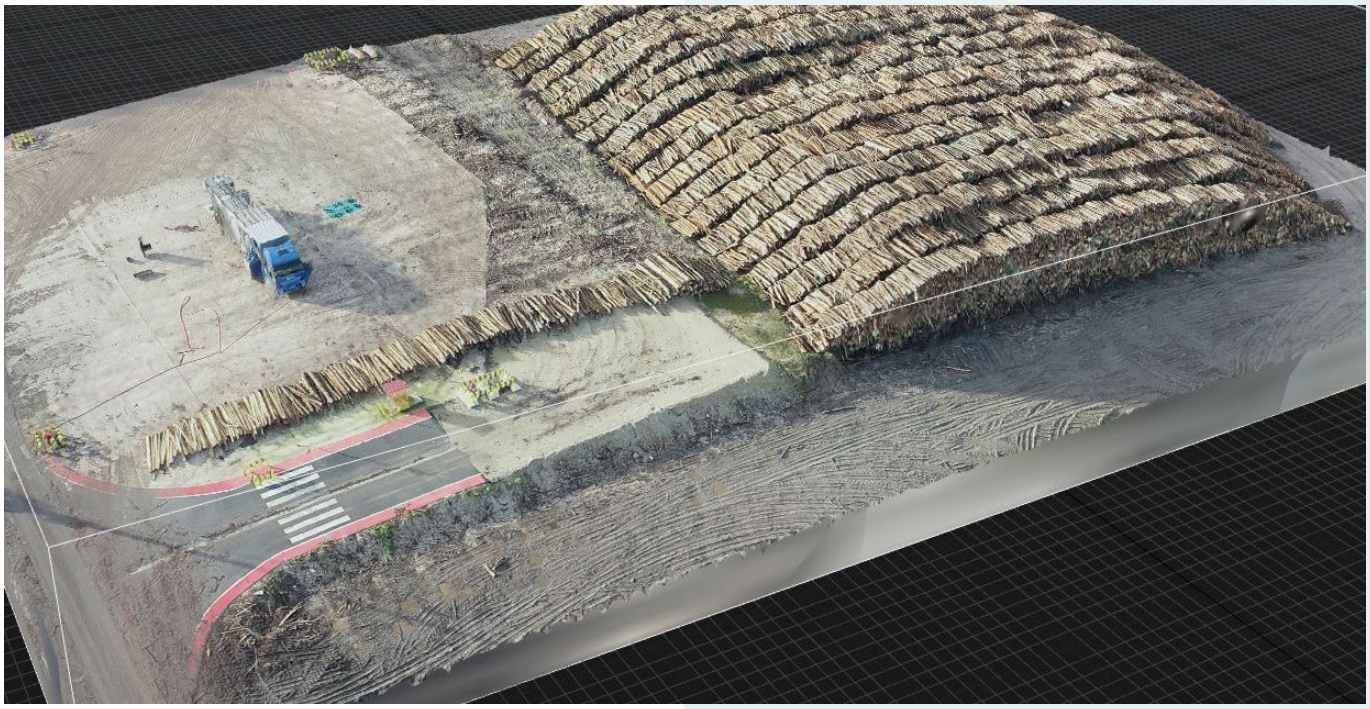
Para seleccionar el caso de estudio se analizaron dos aspectos principales: las características físicas de cada alternativa y sus posibles aportaciones sociales. Dentro de estas características fue importante verificar, el impacto que el desarrollo del proyecto tendría sobre el espacio aéreo de la zona de vuelo y asegurarse de que éste no se encuentre dentro del cerco de seguridad de vuelo en referencia a la norma NOM-107-SCT3-2019. Para la detección de la zona de seguridad, se hizo uso de la información proporcionada por DJI Technology Co., en su página de internet, donde aparece un mapa de geo-zona de seguridad de vuelo en el cual se pueden observar las zonas de riesgo de ocupación del espacio aéreo, mismas que no deben ser invadidas durante la realización del proyecto.

Como segundo aspecto de selección del caso de estudio se contemplaron instalaciones educativas, ya que se busca tener un beneficio social con un énfasis académico. Por tal motivo, se decidió seleccionar las instalaciones e infraestructura de la Universidad de Sonora Unidad Regional Centro, en la ciudad de Hermosillo.

NORMATIVIDAD

En México, la organización encargada de regular los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia en el espacio aéreo mexicano es la Dirección General de Aeronáutica Civil. Esta reglamentación se encuentra en la NOM-107-SCT3-2019, y las obligaciones a cumplir se dan en función a una clasificación del equipo realizada con base en sus características físicas, en particular el peso y el uso específico que se hará de la aeronave [20]. Esta clasificación por peso se establece en tres tipos: RPA (del Inglés Remotely Piloted Aircraft o Aeronave Pilotada a Distancia) Mini con peso máximo de despegue menor a dos kilogramos; RPA Pequeño con peso máximo de despegue entre los 2.001 y los 25 kg y RPA Grande con peso de despegue a partir de los 25.001.Cada una de las alternativas anteriores puede tener dos tipos de uso: recreativo, privado no comercial o Comercial, resultando un total de seis combinaciones [20].

El caso actual se clasifica como RPA pequeño de uso privado no comercial o comercial, y debe cumplir con los numerales 4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8que establecen, entre otras cosas: distancias mínimas de separación con aeródromos y helipuertos; que no se deben dejar caer objetos; no transportar materiales prohibidos o peligrosos, responsabilidad civil y respeto a otros reglamentos; así como, registro de la aeronave, altura máxima de vuelo y distancia máxima de operación. Con respecto al piloto, lo relacionado con seguridad y finalmente operaciones especiales como por ejemplo qué se debe hacer si se planea realizar vuelos nocturnos [20].



Diseño de la investigación

El dron seleccionado para realizar este proyecto fue del modelo Phantom 4 Advanced de uso comercial fabricado en el año 2017 por DJI Technology Co., que cumple con las características técnicas para la elaboración de vuelos programados para fotogrametría. Tiene capacidad de realizar vuelos de reconocimiento e inspección a una altura de 120 m, un rango de alcance horizontal aproximado de 2.5 Km dentro de la mancha urbana y 7 Km en campo abierto.

Para procesar e interpretar la información recabada por el dron se requirió acceso a una plataforma de fotogrametría. Para esto, se contactó a una empresa especializada en inspección aérea con drones, ubicada en el estado de Nuevo León llamada Global Scan México, quien permitió hacer uso de su plataforma para la elaboración de este proyecto con fines académicos. El software que se utilizó es Sitescan de 3D Robotics.

Posteriormente. se procedió a la planeación y ejecución de vuelo tomando en cuenta factores técnicos del equipo, ambientales, accesibilidad, etc., para incrementar la precisión de la información recabada. Se obtuvo por medio de Google Earth una aproximación de la superficie del polígono de estudio y de su forma, con la finalidad de determinar puntos clave para la configuración de los vuelos, puntos de despegue y la cantidad de baterías necesarias para el mapeo. Con esta información se sectorizó en cuatro bloques el polígono como se muestra en la imagen 1. El criterio utilizado fue que las zonas mantuvieran extensiones de terreno al alcance de un vuelo para mantener tiempos de vuelo no mayores a las dos horas. También, se realizó una inspección física del sitio para observar la infraestructura existente y analizar posibles obstrucciones que pongan el riesgo la seguridad tanto de las instalaciones como del equipo.

Imagen 1: Sectorización del polígono de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso fue la elaboración de los planes de vuelo y proceder a su ejecución. Considerando que para que un vuelo fotogramétrico sea óptimo en su procesamiento se recomienda un rango de traslape frontal y lateral que ronde del 60% al 70% [17]; para este caso se decidió considerar un traslape frontal del 70% y uno lateral del 65%.

Una vez realizados los vuelos se continuó con el procesamiento de datos, para lo cual se debe ingresar en el software la siguiente información: el sistema de coordenadas geográficas a utilizar, coordenadas de los puntos de control, densidad de la nube de puntos deseada, parámetros de la cámara y formatos de salida. La misma plataforma de fotogrametría muestra un reporte del vuelo realizado, en esta se observan ciertos parámetros de calibración de imagen, puntos de coincidencia, rangos de traslape, varianza de geolocalización, entre otras. Este procedimiento tiene varios pasos de comprobación de metadatos que identifican a cada una de las 1,676 fotografías realizadas. Como resultado, se obtuvo el modelo 3D del campus en formato digital, parte del cual se puede observar en la Imagen 2.

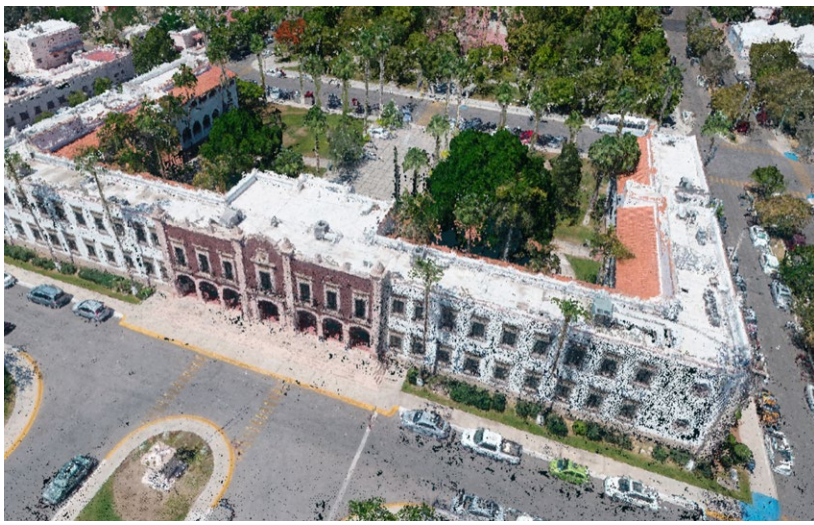


Imagen 2: Visualización del edificio de rectoría de la Universidad de Sonora a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se propusieron algunas situaciones hipotéticas para conocer la precisión en las cuales se realizaron mediciones directamente en el modelo digital y posteriormente en campo con el método tradicional y se compararon tales resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para justificar el uso de un modelo digital como alternativa viable dentro del campus se hizo una comparativa entre los resultados de mediciones obtenidas de la forma tradicional y mediciones en el modelo digital. Éstas se realizaron tanto en vertical como en horizontal en distancias cortas y largas. Como resultado de este ejercicio hipotético, se obtuvieron los datos que se muestran en las Tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1. Mediciones horizontales menores a 5 metros.

Lugar	Medición en el sitio (m)	Medición digital (m)	Variación (m)	Variación por metro (cm/m)	Promedio (cm/m)
Estacionamiento multinivel	1.80	1.79	0.01	0.56	0.28
Cancha de basquetbol	3.57	3.56	0.01	0.28	
Estacionamiento centro de las artes	4.84	4.84	0.00	0.00	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Mediciones horizontales mayores a 30 metros.

Lugar	Medición en el sitio (m)	Medición digital (m)	Variación (m)	Variación por metro (cm/m)	Promedio (cm/m)
Estacionamiento multinivel	56.22	56.11	0.11	0.20	0.32
Campo de softball	41.54	41.38	0.16	0.39	
Estacionamiento centro de las artes	30.00	30.11	0.11	0.37	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Mediciones verticales (alturas).

Lugar	Medición en el sitio (m)	Medición digital (m)	Variación (m)	Variación por metro (cm/m)	Promedio (cm/m)
Gimnasio universitario	4.32	4.32	0.00	0.00	0.47
Gimnasio universitario	4.35	4.33	0.02	0.46	
Estacionamiento multinivel	3.38	3.36	0.02	0.59	
Estacionamiento multinivel	14.15	14.09	0.06	0.42	
Edificio 3N	4.52	4.48	0.04	0.88	

Fuente: elaboración propia.

Se puede observar que en el caso de las mediciones en horizontal se cuenta con un mejor desempeño, ya que la variación promedio es de menos de 3 milímetros por metro lineal medido. Respecto a las mediciones en vertical se presenta una variación un poco mayor al ser de 4.7 milímetros; se presume que este mayor margen de error es por la perspectiva de las fotografías tomadas por el dron. Sin embargo, se puede considerar que la diferencia entre las mediciones realizadas en el sitio de trabajo por el método tradicional y las mediciones hechas directamente en el modelo digital en la computadora, presentan poca variación. En este sentido, dependiendo del uso que se le vaya a dar a esa información puede llegar a ser despreciable; por ejemplo, si se desea obtener información de campo para cuantificación de estimaciones de avance de obra o mediciones previas para realizar presupuestos, un error de magnitud menor a los 5 milímetros por metro puede resultar despreciable.

CONCLUSIONES

Se logró obtener un modelo digital 3D de la Unidad Regional Centro de la Universidad de Sonora. En él se realizaron mediciones digitales que se compararon con mediciones de campo hechas de la forma tradicional. La variación entre estas mediciones fue en promedio de 3.77 milímetros por metro, que representa un margen de error de 0.377%. Dados los resultados anteriores, se considera que el modelo tiene un buen desempeño, ya que además de que estas mediciones se pueden tomar más rápido, se realizan desde la oficina sin la necesidad de transportarse al sitio, lo que en ocasiones puede ser complicado o causa de un accidente ocupacional. En el caso de utilizarse para estimaciones de avance de obra se podría programar un vuelo al final de cada jornada y supervisarse diariamente para tener un mejor control de la obra.

Se considera que la precisión del modelo puede mejorarse si se realizan vuelos que capturen imágenes de mayor resolución, en mayor cantidad, o a una altura de vuelo más baja. Una debilidad de esta investigación es el software, debido a que para realizar este trabajo se tuvo acceso gratuito gracias a la empresa Global Scan México; sin embargo, en caso de querer aplicar este instrumento institucionalmente se requiere de la búsqueda de opciones de software para su implementación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] McKinsey Global Institute, "Reinventing construction: a route to higher productivity," McKinsey & Company, 2017.

[2] V. Charlesraj and N. Rakshith, "Stakeholder perspectives on the adoption of drones in construction projects," Kitakyushu, Japan, 2020. Doi: 10.22260/ISARC2020/0168.

[3] C. Loveless, "Drones in Construction," Available at SSRN, pp. 1-30, 2017.

[4] T. Umar, "Applications of drones for safety inspection in the Gulf Cooperation Council construction," Engineering, Construction and Architectural Management, 2020. Doi: 10.1108/ECAM-05-2020-0369.

[5] D. Arba, "Using Unmanned Aerial Vehicles for Automated BIM-based Construction Progress & Reporting," PM World Jurnal, vol. 9, no. 8, pp. 1-15, 2020.

[6] K. Korkmaz and S. Mohammed, "Evaluating the Use of Drones in the Area of Transportation / Construction," Journal of Architectural Environment & Structural Engineering Research, vol. 03, no. 01, pp. 1-4, 2020. Doi: 10.30564/jaeser.v3i1.1787.

[7] H. Golizadeh, M. RezaHosseini, D. Edwards, S. Abrishami, N. Taghavi and S. Banihashemi, "Barriers to adoption of RAPs on construction projects: a task-technology fit perspective" Construction Innovation, vol. 19, no. 2, pp. 149-169, 2019. Doi: 10.1108/CI-09-2018-0074.

[8] F. Canhete and R. Machado, "The use of drones in urban construction: literature review," International Jounal of Development Research, vol. 10, no. 02, pp. 44388-44396, 2021. Doi: 10.37118/ijdr.20946.02.2021.

[9] F. Mesas and A. García-Ferrer, "Aplicaciones Urbaníticas," in Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil, Madrid, 2015, pp. 211-219.

[10] M. Oñate, "Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto," in Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil, Madrid, 2015, pp. 49-57.

[11] Y. Li and C. Liu, "Applications of multirotor drone technologies in construction mangement," International Journal of Construction Management, vol. 19, no. 5, PP. 401-412, 2018. Doi: 10.1080/15623599.2018.1452101

[12] D. Saez and A. Beltrán, "Aplicaciones cartográficas," in Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil, Madrid, 2015, pp. 67-76.

[13] Í. Campo, "Aplicaciones en el control de obras y evaluación de impactos," in Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil, Madrid, 2015, pp. 149-160.

[14] Y. Jiang and Y. Bai, "Determination of construction site elevations using drone technology," in Construction Research Congress, Tempe, Arizona, 2020. Doi: 10.1061/9780784482865.032

[15] E. Ciampa, L. De Vito and M. Pecce, "Practical issues on the use of drones for construction inspections," Journal of Physics: Conference Series, pp. 1-11, 2019. Doi:10.1088/1742-6596/1249/1/012016

[16] M. Mongelli, d. C. G. I. Roselli, M. Malena, A. Nacuzi and G. de Felice, "3D Photogrammetric Reconstruction by Drone Scanning for FE Analysis and Crack Pattern Mapping of the "Bridge of the Towers", Spoleto," Key Engineering Materials, vol. 747, pp. 423-430, 2017. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.747.423.

[17] E. Tacuri, L. Lupercio, G. Lupercio and M. López, "Uso de imágenes de RPAS para generación de topografía a detalle," Revista Geoespacial, vol. 14, no. 1, pp. 32-42, 2017. Doi: 10.24133/geoespacial.v14i1.1594.

[18] P. Aparicio, F. Espinoza-Figueroa, M. d. C. Aguirre, P. Mejía and C. Matovelle, "Fotogrametría digital para el levantamiento 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador)," Estoa, vol. 7, no. 13, pp. 25-35, 2018. Doi: 10.18537/est.v007.n013.a02.

[19] R. Melo and D. Costa, "Reducing the gap between work as done and work as imagined on construction safety supported by UAS," Kalmar, Sweden, 2019. Doi: 10.15626/rea8.02.

[20] Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Diario Oficial de la Federación, 2019.

Cómo citar este artículo:

Ramos Corella, M. A., Ibarra Duarte, D. A., Ramírez Uribe, G., Ibarra Torúa, G. K., & Miranda Torres, I. E. (2023). Modelo digital del campus Universidad de Sonora mediante fotogrametría con drones. EPISTEMUS, 17(34).
https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.263

Incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en el concreto

Incorporation of Powdered Glass and Calcined Fan Shells into Concrete

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Erick Luis Milla Montes [1]

Recibido: 25 / 10 / 2022
Aceptado: 20 / 02 / 2023
Publicado: 27 / 03 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.253

Autor de Correspondencia:
Erick Luis Milla Montes
Correo : construyeperu@hotmail.com

Resumen

La investigación busca determinar la influencia de la incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en la resistencia a la comprensión del concreto f'c=210 kg/cm2. La metodología empleada en la investigación es de tipo aplicada, el diseño es experimental con un enfoque cuantitativo y las muestras están integradas por una cantidad de 18 testigos. Los resultados obtenidos nos indican que: a los 7 días la fuerza es de 194.5kg/cm2 en el concreto patrón y de 196.5kg/cm2 en el concreto muestra; en el día 14 fue de 237.8kg/cm2 en el concreto patrón y de 238.9kg/cm2 en el concreto muestra. Por último, a los 28 días se observó que la resistencia a la compresión en el concreto patrón fue de 295.4kg/cm2 menor que el concreto muestra que fue de 306.1kg/cm2, resaltando que al emplear vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas mejora la calidad del concreto de diseño f¨c=210 kg/cm2.

Palabras clave: concreto, vidrio pulverizado, fluorescencia.

Abstract

The research seeks to determine the influence of the incorporation of pulverized glass and calcined fan shells on the pressure resistance of concrete f'c=210 kg/cm2. The methodology used in the research is applied, the design is experimental, with a quantitative approach and the samples are made up of an amount of 18 witnesses. The obtained results indicate that in the 7 days it is 194.5kg/cm2 in the standard concrete and 196.5kg/cm2 in the sample concrete; by day 14 it was 237.8kg/cm2 in the standard concrete and 238.9kg/cm2 in the sample concrete, additionally by 28 days we could observe that the compressive strength in the standard concrete was 295.4kg/cm2 less than the concrete shows that it was 306.1kg/cm2. It is important to highlight that by using powdered glass and calcined fan shells the quality of the design concrete f¨c=210 kg/cm2 is improved.

Keywords: *concrete, powdered glass, fluorescence.*

1 *Bachiller en Ingeniería civil, Ancash, Universidad Cesar Vallejo, Huaraz, Perú, construyeperu@hotmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4046-9853*

INTRODUCCIÓN

Los residuos constituyen hoy en día una preocupación a nivel mundial, entre ellos tenemos el vidrio reciclado. El cual es un producto que no tiene salida en el mercado y tarda mucho tiempo en degradarse, lo que se convierte en un problema ambiental de suma importancia, ya que a diario se generan desechos, convirtiéndose en un gran problema a nivel internacional. En un informe del Banco Mundial "se analiza el panorama de administración de los desperdicios sólidos hasta 2050 en el mundo, se reporta que, si no se actúa urgentemente, la generación de residuos aumentará en un 70% debido al rápido desarrollo urbano y el crecimiento social" [5].

"La industria del reciclaje de vidrio, permite a los recolectores y empresas relacionadas con esta actividad, la oportunidad de mejorar su economía actual a través del aprovechamiento este recurso, el cual se encuentra presente entre los principales residuos sólidos de su localidad" [10].

En la actualidad, las construcciones son las que producen mayor desarrollo en nuestro país, sin embargo, hay una gran cantidad de construcciones que están generando una sobreproducción de recursos no degradables, lo que implica una contaminación de avance rápido en el Perú. Se tiene conocimiento que se ha explorado diversos materiales que pueden sustituir en porcentajes a la mezcla del concreto como respuesta para elevar la resistencia del mismo, pero a pesar de ello, la mayor parte daña y contamina el medio ambiente. "En la ciudad de Huaraz se puede observar gran contaminación de las calles, lo que implica un problema difícil de controlar por parte de las autoridades a causa del desuso de vidrio y su bajo costo, lo que hace más fácil reemplazar el material que reusarlo" [6].

El vidrio cuenta con propiedades favorables para la construcción por ser una materia tenaz a la compresión,

así como también las conchas de abanico el cual está conformada de caparazones de carbonato cálcico, llegando a ser materiales no nocivos para el concreto y con características similares al agregado convencional, considerándolos como componentes alternativos para elaborar concreto.

Debido a la problemática se formuló la siguiente pregunta ¿Cuál es la influencia de la incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en la resistencia a la comprensión del concreto f'c=210 kg/cm2? El objetivo general es determinar la influencia de la incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en la resistencia a la comprensión de concreto f'c=210 kg/cm2. Los objetivos específicos son:

Determinar las características del vidrio pulverizado y las conchas de abanico calcinadas mediante fluorescencia de rayos x.

Realizar el diseño de la mezcla de un concreto con agregado convencional, y con adición del vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas de una resistencia de f'c=210 kg/cm2.

Analizar la resistencia a la comprensión de la mezcla de concreto con la incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas con el concreto patrón f'c=210 kg/cm2.

Dentro de la hipótesis se concluyó que la incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas mejora la resistencia a la comprensión de concreto f'c=210 kg/cm2; así como en las hipótesis específicas podemos observar que la composición química del vidrio pulverizado y las conchas de abanico calcinadas mediante fluorescencia de rayos x tienen características similares, con el porcentaje añadido de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas se logrará la combinación más práctica con mayor eficiencia en los procesos constructivos y referente a la mezcla diseñada con el vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, ello aumentará la resistencia a la comprensión del concreto con respecto al concreto base.

METODOLOGÍA

El proyecto de investigación es del tipo aplicada, porque se busca poner en práctica los conocimientos para adaptarlos directamente a los diversos problemas que aqueja a la sociedad respecto al uso de un determinado porcentaje de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas como adición al concreto, con el objetivo de aplicar una mejor determinación en la elección de un mejor diseño [8]. El diseño es experimental por ser un proceso en la cual se va, a someter al concreto a diversas condiciones y tratamientos, con el fin de examinar los efectos, o las reacciones que estas producen [2].

Tiene un enfoque cuantitativo porque recolecta y analiza datos con el fin de contestar preguntas y probar hipótesis, la investigación cuantitativa toma una forma estructural con el fin de recopilar y analizar datos obtenidos, lo que indica el uso de diversas herramientas informáticas, estadísticos y matemáticos, esto ayudará a obtener resultados. Su propósito es de medir el problema y ver qué tan propagado se encuentra, por medio de la búsqueda de resultados proyectados a una determinada producción [1].

La población serán todas las probetas de concreto que se pueda elaborar, puesto que la población a ser estudiada es un grupo de casos, se encuentra limitado, pero es accesible, sirve de referencia para elegir la muestra [3].

La muestra estuvo integrada por una cantidad de 18 testigos, utilizándose la totalidad de ellos, 9 probetas de concreto patrón y 9 probetas de concreto con adición de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, en un 2% cada uno. El muestreo en esta investigación es no probabilístico porque al seleccionar los testigos de concreto no dependen de probabilidades.

La principal herramienta para la recolección de datos fue la guía de observación, los ensayos de fluorescencia para el vidrio pulverizado y las conchas de abanico calcinadas.

En este sentido primero se efectuó la recolección de muestras del vidrio en la ciudad de Huaraz y las conchas de abanico del botadero de Huarmey. Después se trituró el vidrio en un mortero y calcinó las conchas de abanico en un horno para luego molerlas, y así obtener moléculas de conchas de abanico calcinadas. Para los ensayos de fluorescencia se mandaron las muestras de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas a un laboratorio, con el fin de ver la composición química elemental de cada una de las muestras e identificar los elementos que contienen y las cuales aportarán para la resistencia del concreto.

También se ejecutó el diseño de mezcla por el método ACI con los agregados de la cantera de Tacllan, posteriormente se hicieron las 18 briquetas, 9 probetas patrón y 9 probetas con la muestra de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, basándose en la norma E-060.

Finalmente se ejecutó el ensayo de compresión simple de las probetas a los 7, 14 y 28 días tanto para el concreto patrón y la muestra, para evaluar los resultados obtenidos y ser representados en gráficos comparativos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se puede observar que la resistencia a la comprensión de la muestra al cual se añadió vidrio pulverizado en un 2% y conchas de abanico en el mismo porcentaje, resulta favorable para el concreto, puesto que las cifras que arrojan en el laboratorio nos muestran que a los 28 días es más favorable respecto a los 7 y 14 días, comparando a la resistencia del concreto patrón, en los 28 días el concreto patrón llego a tener una resistencia de 295.4 kg/cm2, mientras que el concreto con adición de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas mostraron como resultado una resistencia de 306.1kg/cm2, guardando relación con lo que indica [7], porque en los resultados de su investigación muestran el incremento en la resistencia a la comprensión del concreto al ir añadiendo los porcentajes de vidrio molido, concluyendo que es viable emplear estos materiales, porque cada uno de estos cumplió con la resistencia del diseño base.

Tabla 1. Comparación de la resistencia a la comprensión promedio.

CONCRETO DE RESISTENCIA 210 KG/CM²	EDAD	KG/CM²
Concreto patrón	7	194.5
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	7	196.5
Concreto patrón	14	237.8
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	14	238.9
Concreto patrón	28	295.4
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	28	306.1

Fuente: Resultados obtenidos en el laboratorio NICOLES HYDGEOSTRUCT S.A.C

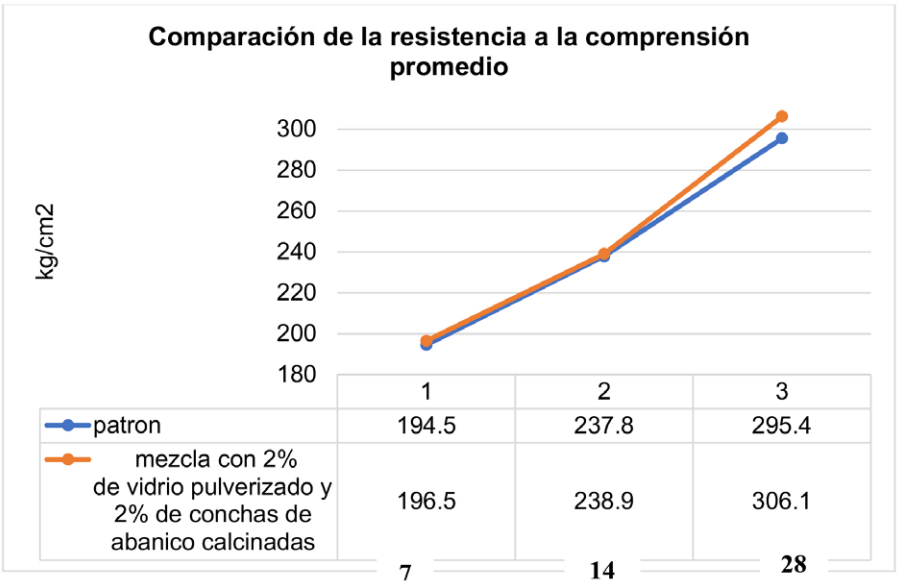


Figura 1. Resistencia a la comprensión con adición de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas. Fuente: Elaboración propia

La tabla 1 y la figura 1, muestra que la mezcla diseñada a la cual se añadió vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, a los 28 días, es más favorable que al de los 7 y 14 días respecto al concreto patrón, mostrando una diferencia de f´c=10.7 kg/cm2 entre el concreto patrón, ello nos indica que al emplear vidrio y conchas de abanico mejoran la resistencia a la comprensión del concreto.

Las características del vidrio pulverizado y las conchas de abanico calcinadas mediante fluorescencia de rayos x, mostraron los siguientes resultados:

Tabla 2. Composición química elemental del vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, analizado en el laboratorio a través del método de fluorescencia de rayos x.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL VIDRIO PULVERIZADO		COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS CONCHAS DE ABANICO CALCINADAS		MÉTODO UTILIZADO
COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %[1]	COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS, %[1]	
Silicio, Si	47.074	Silicio, Si	0.363	Espectrometría de florescencia de rayos X de energía dispersiva [2]
Sodio, Na	35.218	Sodio, Na	0.000	
Calcio, Ca	10.449	Calcio, Ca	97.303	
Aluminio, Al	3.443	Aluminio, Al	0.000	
Magnesio, Mg	2.516	Magnesio, Mg	0.000	
Potasio, K	0.432	Potasio, K	0.499	
Azufre, S	0.408	Azufre, S	0.026	
Hierro, Fe	0.307	Hierro, Fe	1.066	
Cromo, Cr	0.061	Cromo, Cr	0.000	
Fosforo, P	0.036	Fosforo, P	0.000	
Circonio, Zr	0.033	Circonio, Zr	0.019	
Estroncio, Sr	0.023	Estroncio, Sr	0.490	

Fuente: Resultados obtenidos en el laboratorio LABICER

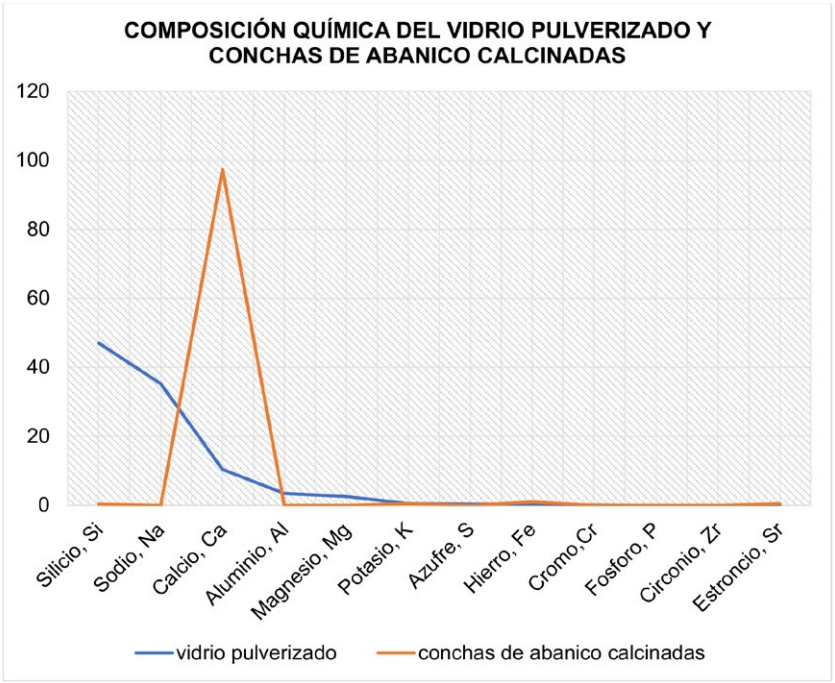


Figura 2. Comparación entre vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2 y la figura 2 se observa que los elementos más significativos que conforman al vidrio pulverizado son el silicio, sodio y calcio mientras que las conchas de abanico calcinadas están compuestas en mayor cantidad por el calcio, hierro y potasio, apreciando que el calcio que compone las conchas de abanico calcinadas, supera al calcio que compone el vidrio pulverizado en una diferencia de 86.854%.

Tabla 3. Muestra del análisis químico expresado en óxidos del vidrio pulverizado y de las conchas de abanico calcinadas.

	DESCRIPCION	VIDRIO PULVERIZADO	CONCHAS DE ABANICO
1	óxido de silicio, SIO2	65.157	0.681
2	óxido de sodio, Na2O	20.037	0.000
3	óxido de calcio, CaO	7.976	96.815
4	óxido de aluminio, Al2O3	3.845	0.000
5	óxido de magnesio, MgO	1.743	0.000
6	óxido de azufre, SO3	0.587	0.552
7	óxido de potasio, K2O	0.289	0.491
8	óxido de hierro, Fe2O3	0.231	1.006
9	óxido de cromo, Cr203	0.046	0.000
10	óxido de fosforo, P2O5	0.045	0.000
11	óxido de circonio, ZrO2	0.027	0.019
12	óxido de estroncio, SrO	0.016	0.435

Fuente: Resultados obtenidos en el laboratorio LABICER

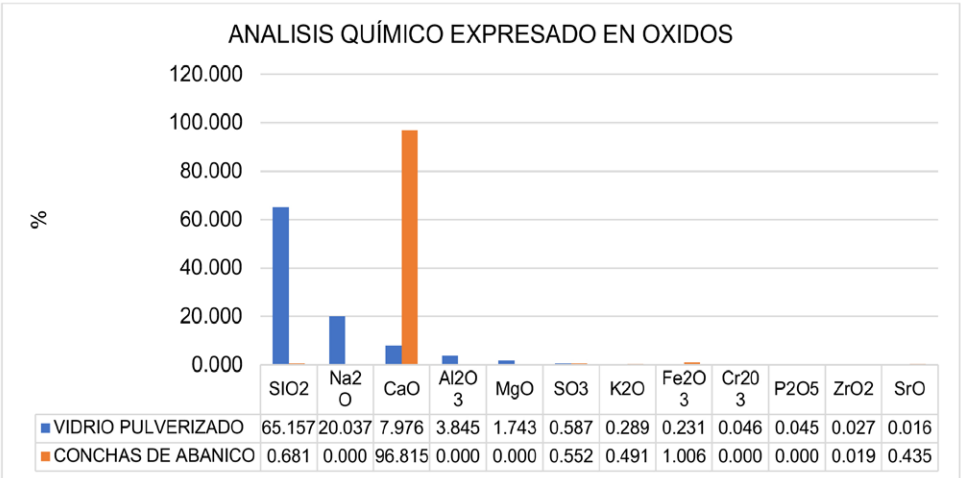


Figura 3. Comparación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas expresados en óxidos. Fuente: elaboración propia

En la tabla 3 y la figura 3, se aprecia que ambas muestras contienen óxido de calcio CaO, en el vidrio encontramos un 7.976% y en las conchas de abanico un 96.815%, dando una diferencia de 88.839%, mientras tanto en el óxido de silicio se aprecia que el vidrio contiene un 65.157% y las conchas de abanico contiene un 0.681%, dando una diferencia de 64.476%.

La tabla 4, tabla 5, tabla 6 y la tabla 7 nos detalla la cantidad de material a utilizar para la obtención del diseño de la mezcla de un concreto, con agregado convencional y con adición del vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas, de una resistencia de f'c 210 kg/cm2, basándose en la medida de la probeta mostrada en la figura 4.

Tabla 4. Peso de materiales por kg/m3

Descripción	Cemento (kg/m³)	A. fino (kg/m³)	A. grueso (kg/m³)	Agua (lt/bolsa)
Seco	475.74	833.85	931.53	216
Húmedo	475.74	869.16	940.98	169.64
Por cada bolsa	1	77.65	84.06	15.15

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Peso de materiales por bolsa

PROPORCIONAMIENTO EN PESO			
42.5	77.65	84.06	15.15
C	AF	AG	AGUA
BLS	KG	KG	KG

Fuente: Elaboración propia

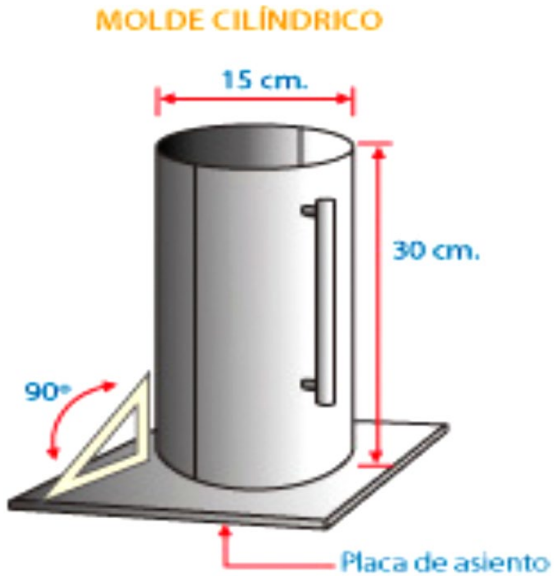


Figura 4. Medidas de la probeta.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Proporción de materiales por 9 probetas de la muestra patrón

PARA 9 PROBETAS DEL DISEÑO		
v=pixr2xh	0.005301	m³
v=0.005301*9	0.047709	m³
v=1.2*0.047709	0.057251	m³
cemento=0.0572508*475.74	27.2365	kg
Af=0.0572508*869.16	49.76011	kg
Ag=0.0572508*940.98	53.87186	kg
Agua efectiva=0.047709*169.64	8.093354	lt
SUMA	**138.962**	**kg**

Fuente: Elaboración propia

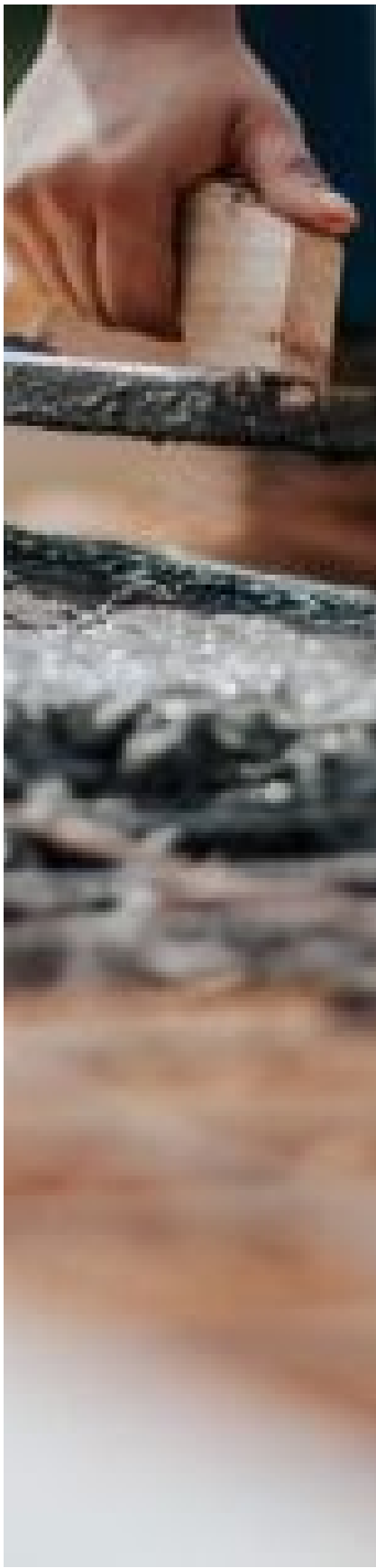


Tabla 7. Proporción de materiales por probeta, añadiendo 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas

PARA 9 PROBETAS DEL DISEÑO			Vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas	
v=pixr2xh	0.005301	m^3		
v=0.005301*9	0.047709	m^3	2% vidrio pulverizado	2.779
v=1.2*0.047709	0.057251	m^3	2% conchas de abanico calcinadas	2.779
cemento=0.0572508*475.74	27.2365	kg	**SUMATORIA**	**5.558**
Af=0.0572508*869.16	49.76011	kg		
Ag=0.0572508*940.98	53.87186	kg		
Agua efectiva=0.047709*169.64	8.093354	lt		
SUMA	**138.962**	**kg**		

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la mezcla de 9 probetas se usarán: cemento 27.2365 kg, agregado grueso 53.87 kg, agregado fino 49.76 kg, agua 8.09 kg; de los cuales para las 9 probetas que se emplearán como muestras, se añadirá el vidrio pulverizado al 2% que representan un total de 2.779 kg, lo mismo para las conchas de abanico calcinadas se usarán 2.779 kg.

Tabla 8. Cronograma para el análisis de la resistencia

DESCRIPCION	CANTIDAD DE MUESTRAS	FECHA		EDAD EN DIAS
		ELABORACION	ROTURA	
Ensayo de mezcla de concreto patrón	3	03/09/2022	10/09/2022	7
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	3	03/09/2022	10/09/2022	7
Ensayo de mezcla de concreto patrón	3	03/09/2022	17/09/2022	14
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	3	03/09/2022	17/09/2022	14
Ensayo de mezcla de concreto patrón	3	03/09/2022	01/10/2022	28
Ensayo de mezcla de concreto con 2% de vidrio pulverizado y 2% de conchas de abanico calcinadas	3	03/09/2022	01/10/2022	28

Fuente: Elaboración propia

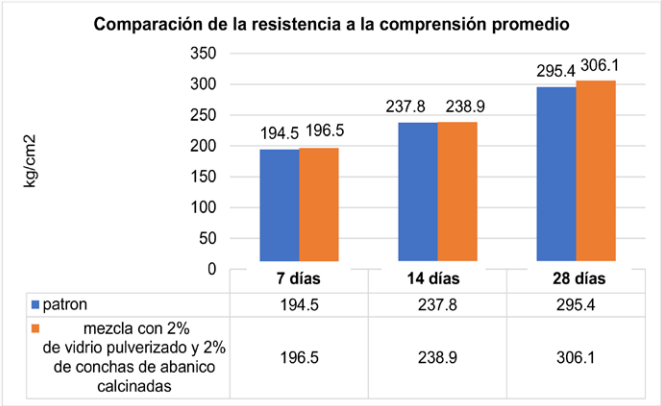


Figura 5. Resultados promedio de los 7, 14 y 28 días en los ensayos a compresión Fuente: Elaboración propia

En la tabla 8, se muestra el cronograma para el análisis de la resistencia y en la figura 5 muestra la comparación de la resistencia a la comprensión en las edades 7, 14 y 28 días; mostrando mínima diferencia entre el concreto patrón y el concreto añadido vidrio pulverizado y conchas de abanico, a los 7 y 14 días en 1 kg/cm2 y 1.1 kg/cm2 respectivamente, mientras que en los 28 días la diferencia es de 10.7 kg/cm2, esto nos indica que la resistencia a la comprensión da mejores resultados a los 28 días de curado.

CONCLUSIONES

La resistencia a la comprensión del concreto f'c 210 kg/cm2, incorporando vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas a los 28 días, fue de 306.1 kg/cm2 con respecto al concreto patrón 294.7 kg/cm2, ello nos indica que el vidrio y las conchas de abanico pueden ser incluidas en la elaboración del concreto, al ser muy favorables para obtener un concreto de mayor calidad.

Los compuestos químicos que predominan en las conchas de abanico calcinadas son el calcio en un 97.303% y el hierro 1.066%, mientras que los compuestos químicos que predominan en mayor cantidad en el vidrio pulverizado son: el silicio con un 47.074%, el sodio 35.218% y el calcio 10.449%, indicando que el compuesto químico que predomina en ambas muestras es el calcio.

Se concluye que a través del método A.C.I 211.1 basado en la norma ASTM C33 se determinaron las proporciones de los materiales como son (1:1.98:2.07/15.15); para el cemento, agregado fino, agregado grueso y el agua resaltando que al añadir el vidrio pulverizado al 2% y conchas de abanico calcinadas al 2%, los resultados a los 7 días dieron un promedio de 196.5 kg/cm2, a los 14 días arrojo un resultado de 238.9 kg/cm2 y a los 28 días se obtuvo una f`c máximo de 306.1 kg/cm2 en promedio, mostrando que el vidrio pulverizado y las conchas de abanico añaden un 45.7% de resistencia a la comprensión del concreto, no obstante a las 7 y 14 días de curado también tienden a ser superiores que el concreto patrón aunque en menor porcentaje.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D. Alan y L. Cortez. Procesos y fundamentos de la investigación científica. Universidad Técnica de Machala, 2017. ISBN: 978-9942-24-093-4

[2] F. Arias. Diseño experimental. (Archivo de blog), 2012.

[3] J. Arias; M. Villasís y M. Miranda. "El protocolo de investigación III: la población de estudio". Revista alergia México, 63(2), 201-206, 2016. ISSN: 0002-5151. DOI: https://doi.org/10.29262/ram.v63i2.181

[4] M. Cueva. Influencia del uso de residuo de concha de abanico como reemplazo de agregado en la porosidad del concreto. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Piura: Universidad de Piura, 2019. 104 pp.

[5] Empleo del vidrio reciclado triturado en sustitución parcial del árido fino para elaborar hormigón con fines de sostenibilidad por Zenaida Paulette Frómeta Salas [et al]. Santiago de Cuba: Centro de Información y Gestión Tecnológica, vol. 1, núm. 4: 64-81, agosto 2020.

[6] J. Giraldo. Investigación del uso del vidrio crudo en la ciudad de Huaraz – barrio de Shancayan como material constructivo. Proyecto de investigación. Huaraz: Universidad Nacional Santiago Antúnez De Mayolo, 2020. 14 pp.

[7] E. Hernández y J. Rojas. Estudio de la resistencia a la compresión del concreto, con vidrio molido reciclado como sustituto parcial del agregado fino. Tesis (Trabajo de grado). Bogotá: Universidad Católica De Colombia, 2021. 83 pp. https://hdl.handle.net/10983/27150

[8] J. Lozada. "Investigación aplicada". Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamericana, 3(1), 47-50, 2014. ISSN-e: 1390-9592.

[9] D. Peñafiel. Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Ecuador: Universidad Técnica De Ambato, 2016. 114 pp. http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23038

[10] J. Castañon. "El impacto económico y social de la gestión productiva en las empresas relacionadas al reciclaje de botellas de vidrio". Bachiller de ingeniería industrial (Trabajo de investigacion). Peru: Universidad Privada del Norte, 2020. 31 pp. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/26433/Trabajo%20de%20investigaci%C3%B3n.pdf?sequence=2

Cómo citar este artículo:

Milla Montes, E. L. (2023). Incorporación de vidrio pulverizado y conchas de abanico calcinadas en el concreto. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.253

Remoción de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio

Removal of Ca^{2+} and Mg^{2+} Ions from Complex Sulfide Flotation Waters by Sodium Carbonate Additions

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Sandra Daniela Ojeda-Villegas [1]
Alejandro Uribe-Salas [2]

Recibido: 07 / 11 / 2022
Aceptado: 11 / 03 / 2023
Publicado: 30 / 03 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.255

Autor de Correspondencia:
Sandra Daniela Ojeda Villegas
Correo: sandra.ojeda@gmail.com

Resumen

Los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} se encuentran presentes en las aguas del proceso de flotación de sulfuros, lo que afecta negativamente su flotabilidad y el grado de los concentrados finales obtenidos. Recientemente se ha reportado que su remoción mediante la adición de carbonato de sodio (Na_2CO_3) tiene un efecto benéfico en la flotabilidad, aunque las razones de este comportamiento aún no se conocen con detalle. Este documento presenta los resultados de un estudio diseñado para investigar el mecanismo de reacción entre iones metal-carbonato. Los resultados demuestran que la adición de Na_2CO_3 a una solución saturada de yeso (0.016 mol/L) conteniendo 50 ppm de Mg(II), promueve la precipitación del ión Ca^{2+}, como calcita y vaterita. El modelo cinético propuesto para describir la cinética de reacción sugiere que se trata de una cinética de segundo orden.

Palabras clave: calcio, Magnesio, Flotación.

Abstract

Ca^{2+} and Mg^{2+} ions are present in the water of the sulfide flotation process, negatively affecting its floatability and grade of the final concentrates obtained. It has recently been reported that its removal by adding sodium carbonate (Na_2CO_3) has a beneficial effect on flotation, although the reasons for this behavior are not yet known in detail. This paper presents the results of a study designed to investigate the reaction mechanism between the metal-carbonate ions. The results show that the addition of Na_2CO_3 to a saturated gypsum solution (0.016 mol/L) containing 50 ppm Mg(II) promotes the precipitation of the Ca^{2+} ion, such as calcite and vaterite. The kinetic model proposed to describe the reaction's kinetics suggests that it is about a second order kinetic.

Keywords: *calcium, Magnesium, Flotation.*

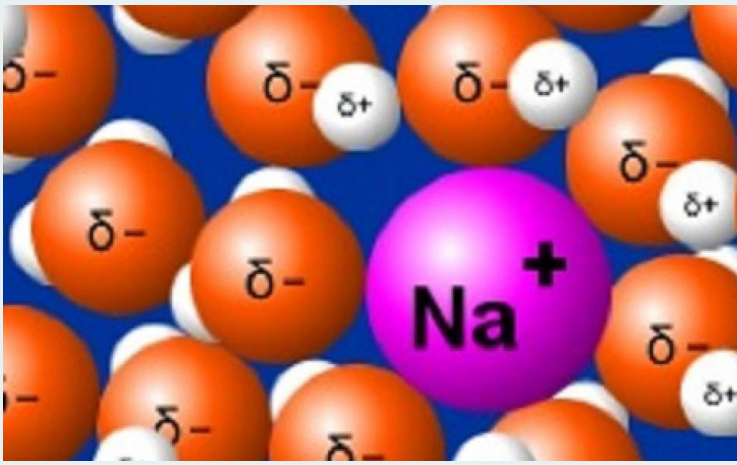
1 M.C. Sandra Daniela Ojeda Villegas, CINVESTAV IPN, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica 1062 Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, C.P. 25900, Ramos Arizpe, Coah., México. Sandraojvi@gmail.com, 0000-0003-1557-435X
2 D.C. Alejandro Uribe Salas, CINVESTAV IPN, Unidad Saltillo, Av. Industria Metalúrgica 1062 Parque Industrial Saltillo-Ramos Arizpe, C.P. 25900, Ramos Arizpe, Coah., México. Alejandro.uribe@cinvestav.edu.mx, 0000-0003-4549-9557

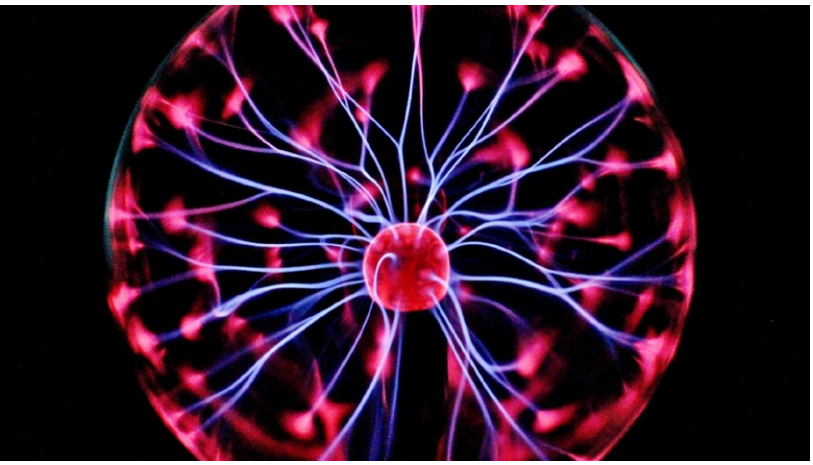
INTRODUCCIÓN.

En la actualidad, las medidas ambientales impuestas al sector minero se enfocan en el uso eficiente de los recursos hídricos y en la preservación del medio ambiente. Dado que el agua representa el 80-85% del volumen de la pulpa mineral procesada en los circuitos de flotación, se tiene la obligación de buscar una alternativa sustentable del uso del agua. El empleo de aguas recicladas en los circuitos de procesamiento de minerales en operaciones industriales es una solución que se ha comenzado a implementar. Sin embargo, el uso de aguas tratadas afecta el proceso de recuperación de minerales de sulfuros, debido a que los componentes químicos presentes hacen que el proceso se comporte de manera distinta a como lo hacen con el uso de agua fresca [1-3].

El agua de proceso tiene diversos agentes contaminantes que afectan la flotabilidad de algunos minerales de sulfuros. Los contaminantes comúnmente son calcio, magnesio y sulfato. Dichos agentes contaminantes se encuentran en las aguas recicladas debido al empleo de cal (CaO, $Ca(OH)_2$)) como un modificador y regulador de pH, el uso de cal es muy común en los procesos de flotación de minerales de sulfuros y a la oxidación natural del azufre de los sulfuros por parte del oxígeno atmosférico absorbido en las pulpas de flotación [4]. La presencia de magnesio se asocia a la existencia de minerales que lo contienen, tales como la dolomita ($CaMg(CO_3)_2$), magnesita ($MgCO_3$) y brucita ($Mg(OH)_2$), los cuales son ligeramente solubles en soluciones acuosas, llegando a alcanzar concentraciones del orden de 30 a 120 ppm en las pulpas de flotación (e.g., Unidades Madero y Naica, respectivamente, del Grupo Peñoles). Los estudios de plantas de procesamiento de minerales de sulfuros muestran que las concentraciones típicas de Mg están alrededor de las 50 ppm [5]. Así mismo, se reportan concentraciones típicas de calcio en el orden de 500 a 650 ppm [6, 7].

El efecto del calcio y el magnesio en el proceso de flotación de minerales de sulfuros ha sido objeto de estudios previos y se ha sugerido que la presencia de estos iones metálicos tiene un efecto negativo; es decir, tienen un efecto depresor en la flotación de minerales. En este sentido, se ha demostrado el efecto depresor de los iones Ca^{2+} en minerales como la esfalerita (ZnS), este efecto se atribuye a que los iones Ca se adsorben en la superficie del mineral disminuyendo el número de sitios activos durante la etapa de activación con cobre [8, 9]. De igual forma, estudios preliminares han reportado que la precipitación de estos iones con carbonato de sodio (Na_2CO_3) tiene un efecto benéfico en la cinética de flotación de galena (PbS) y esfalerita (ZnS). Asimismo, se ha sugerido que el carbonato de sodio causa la disolución del yeso que se encuentra adherido en la superficie del mineral y este precipita como carbonato de calcio ($CaCO_3$), lo que reduce el contenido de calcio en solución y el efecto adverso en la flotación de esfalerita [1, 3, 9, 10]. Sin embargo, a la fecha aún no existe una razón fundamental que explique dicho comportamiento. Por lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo investigar la remoción de calcio y magnesio mediante la adición de Na_2CO_3, caracterizar el sólido obtenido (MEB y DRX) y proponer un modelo cinético de la precipitación de calcio. Hasta el momento no se ha propuesto un modelo cinético para la precipitación del magnesio, debido a un comportamiento distinto al del calcio.





METODOLOGÍA

Materiales y reactivos

En el presente trabajo se prepararon soluciones con una concentración de 50 mg/L de magnesio (0.002 mol/L $MgSO_4 \cdot 7H_2O$) y 650 mg/L de calcio (0.016 mol/L $CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Para preparar las soluciones se utilizó agua desionizada y se adicionó Na_2CO_3, se utilizaron 3 concentraciones distintas (0.008, 0.016 y 0.024 mol/L); todos los reactivos utilizados fueron grado reactivo. Para filtrar la solución se utilizó papel filtro con un tamaño de retención de partícula de 2.5 µm y una bomba de vacío.

Procedimiento

Para la precipitación de Ca y Mg se prepararon soluciones con las concentraciones antes mencionadas, a temperatura ambiente y atmósfera abierta. Se estudió la precipitación de calcio y magnesio con 3 dosis distintas de Na_2CO_3

estas concentraciones se establecieron por un análisis termodinámico previo [11, 12]. Las soluciones se mantuvieron en agitación 15 o 60 minutos (véase Tabla 1). La solución fue filtrada con la ayuda de una bomba de vacío y papel filtro. Los sólidos retenidos se secaron a temperatura ambiente y las soluciones filtradas fueron analizadas químicamente para determinar la concentración residual de calcio y magnesio. El método de análisis fue espectrometría de Absorción Atómica (AA) para lo cual se utilizó un equipo marca THERMO SCIENTIFIC modelo ICE 3300.-

Se realizó una primera serie de pruebas, en la que se estudió la precipitación de calcio solo, magnesio solo y finalmente ambos, con la adición de Na_2CO_3. Con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura se realizó una segunda serie de pruebas donde se estudió la precipitación de calcio solo a una temperatura de 17 °C y un tiempo de reacción de 15 min. En la Tabla 1 se presentan las condiciones experimentales con las que se obtuvieron los sólidos.

Tabla 1. Condiciones experimentales para la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+}.

Exp.	Concentración inicial (mol/l)			Condiciones de prueba		Fuerza iónica
N°	Ca	Mg	Na_2CO_3	T (°C)	t(min)	I (mol/L)
1	0.016	-	0.008	25	60	0.084
2	0.016	-	0.016	25	60	0.104
3	0.016	-	0.024	25	60	0.124
4	-	0.002	0.008	25	60	0.028
5	-	0.002	0.016	25	60	0.048
6	-	0.002	0.024	25	60	0.068
7	0.016	0.002	0.008	25	60	0.092
8	0.016	0.002	0.016	25	60	0.108
9	0.016	0.002	0.024	25	60	0.128
10	0.016	-	0.008	17	15	0.084
11	0.016	-	0.016	17	15	0.104
12	0.016	-	0.024	17	15	0.124

Identificación de los sólidos mediante DRX

Los sólidos productos de la reacción de precipitación fueron filtrados, secados a temperatura ambiente y analizados mediante difracción de rayos X (DRX), empleando un difractómetro D8 Advance Bruker. La identificación de fases sólidas de realizó mediante MDI Jade 6.5.

Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La preparación de la muestra para analizar mediante MEB (Phillips XL30 ESEM) consistió en dejar secar el sólido obtenido de la reacción de precipitación a temperatura ambiente. Se realizó un análisis de la interacción superficial entre galena-sólidos obtenidos por lo que se utilizaron muestras de un cristal de PbS montado en baquelita. La técnica consistió en pulir la superficie del espécimen mineral y enjuagarlo muy bien con agua desionizada. A continuación, el espécimen mineral se sumergió en un recipiente cuadrado de 200 mL conteniendo 100 mL de una solución de agua desionizada conteniendo 1 g/L del precipitado obtenido a pH 10 con la adición de 0.1 mol/L de NaOH, y se dejó en agitación durante 10 min. Finalmente, los especímenes se analizaron mediante MEB-EDS.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Identificación mediante DRX de los reactivos utilizados.

Los reactivos utilizados en la experimentación se analizaron mediante DRX. Los difractogramas correspondientes se presentan en la siguiente sección. En la Figura 1 se observa el espectro de difracción del reactivo de Na_2CO_3 utilizado. Los picos característicos observados corresponden a termonatrita, Na_2CO_3 y trona, los cuales fueron identificados con los patrones de difracción 01-070-0845, 01-086-0299 y 01-075-1195 respectivamente.

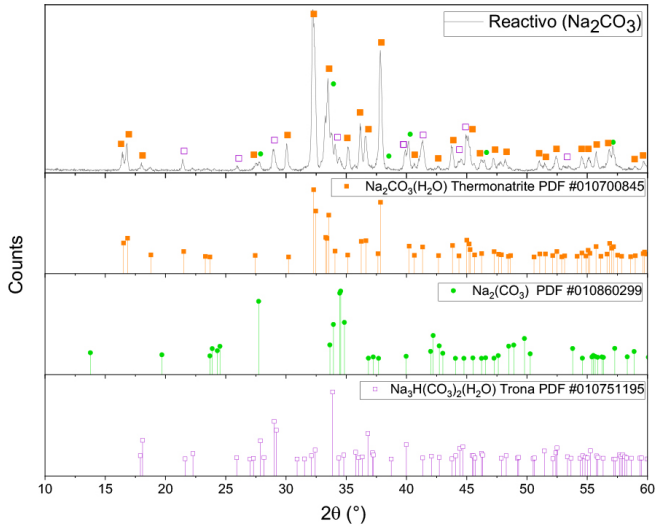


Figura 1. Espectros de difracción de rayos X (DRX) del reactivo de Na_2CO_3.

En la Figura 2 se presenta el espectro de difracción del reactivo de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ utilizado. Los picos característicos observados corresponden yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y $CaSO_4$, los cuales fueron identificados con los patrones de difracción 01-074-1433 y 01-080-0787, respectivamente.

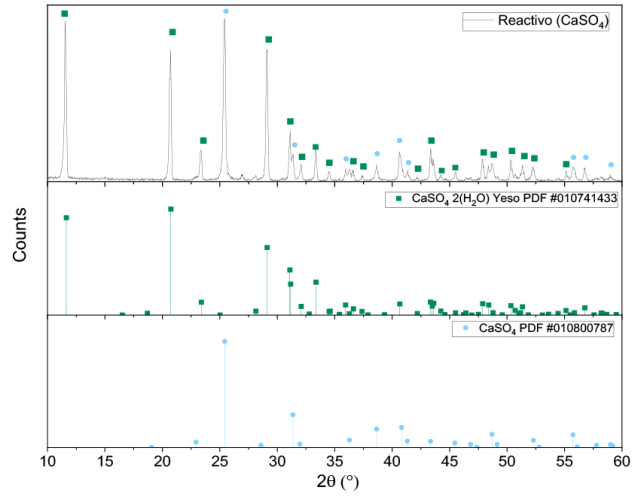


Figura 2. Espectros de difracción de rayos X (DRX) del reactivo de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

En la Figura 3 se presenta el espectro de difracción del reactivo de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ utilizado. Los picos característicos observados corresponden a hexadrita ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$) y epsomita ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) los cuales fueron identificados con los patrones de difracción 00-024-0719 y 01-072-0696.

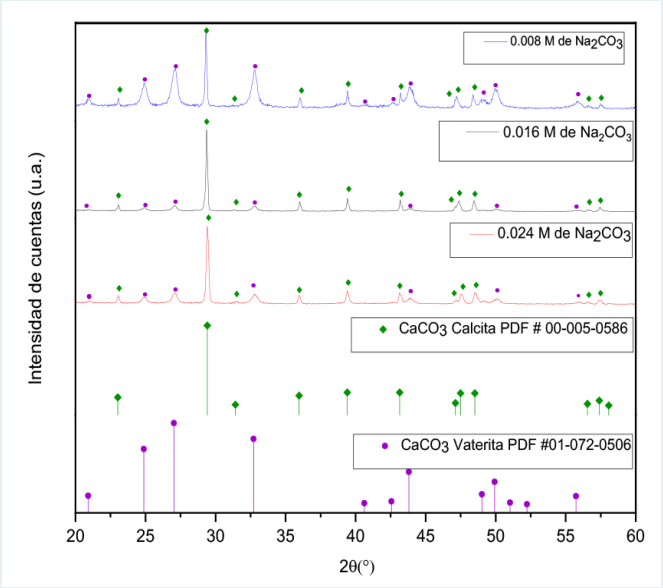
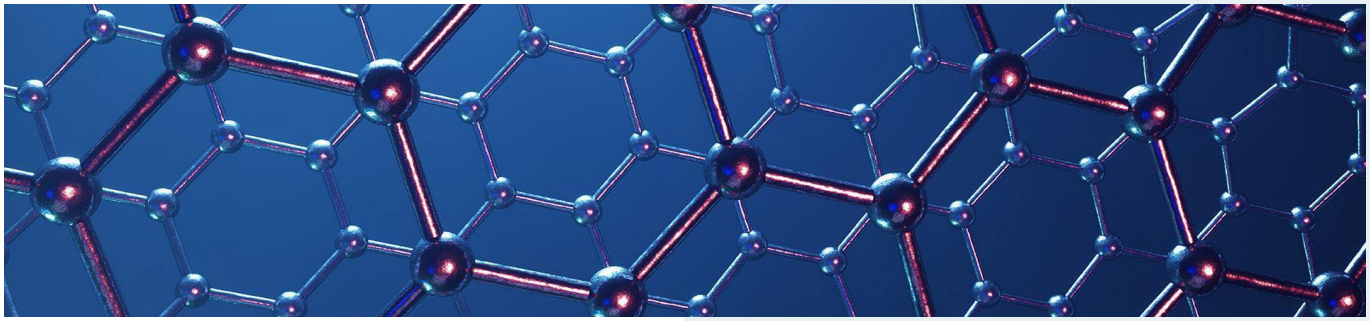


Figura 3. Espectros de difracción de rayos X (DRX) del reactivo de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$.

Identificación mediante DRX de los sólidos obtenidos

Los sólidos obtenidos de la reacción de precipitación se analizaron mediante DRX. Los difractogramas correspondientes se presentan en la Figura 4. Los picos característicos observados corresponden a calcita y vaterita (poliformo de la calcita), los cuales fueron identificados con los patrones de difracción 00-005-0586 y 01-072-0506, respectivamente. No se observa la presencia de otra fase, lo cual indica que los precipitados obtenidos son prácticamente $CaCO_3$. Se observa que la intensidad de los picos de cada muestra cambia ligeramente, por lo que se sugiere que la concentración de carbonato de sodio es una condición relacionada con la cristalización de las partículas.

Cabe mencionar que en el sistema de estudio con las condiciones establecidas y las distintas adiciones adiciones de carbonato de sodio, el sólido obtenido se identificó como calcita. La fracción de Mg precipitado no dio lugar a fases adicionales. Lo anterior, probablemente debido a la



baja concentración de magnesio (50 mg/L) en solución y a su dificultad para precipitarlo.

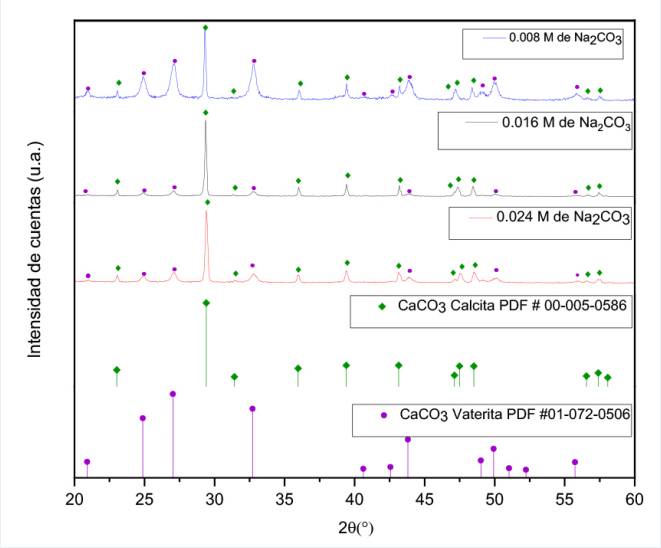


Figura 4. Espectros de difracción de rayos X (DRX) de los sólidos obtenidos de la precipitación de $CaCO_3$ en solución mediante la adición de carbonato de sodio (experimentos 10,11 y 12, respectivamente).

Caracterización mediante MEB-EDS de los sólidos obtenidos.

La adición de Na_2CO_3 a una solución saturada de sulfato de calcio (0.016 mol/L $CaSO_4$) promueve la precipitación del calcio como $CaCO_3$, tal como la modelación termodinámica lo sugiere. En la Figura 5 se observa el sólido obtenido en el experimento 11, el cual fue identificado mediante DRX como calcita y/o vaterita, sobre la superficie de galena. El análisis semi-cuantitativo mediante EDS detecta la presencia de Ca, C y O. La composición en porcentaje atómico es: 17.13% At de Ca, 20.15% At de C y 62.07% At de O, lo que sugiere la presencia de un carbonato de calcio. Es interesante observar dos morfologías distintas, una en forma de esfera y la otra de rombos apilados. Esto corrobora la existencia de dos especies en el sólido obtenido, calcita (romboédrica) y vaterita (di-hexagonal). Además, se observó que existe una adhesión de $CaCO_3$ en la superficie mineral. Sin embargo, el tamaño de las partículas del $CaCO_3$ (aprox. 7 µm) es menor al compararlo con las partículas de yeso (aprox. 38 µm) [13].

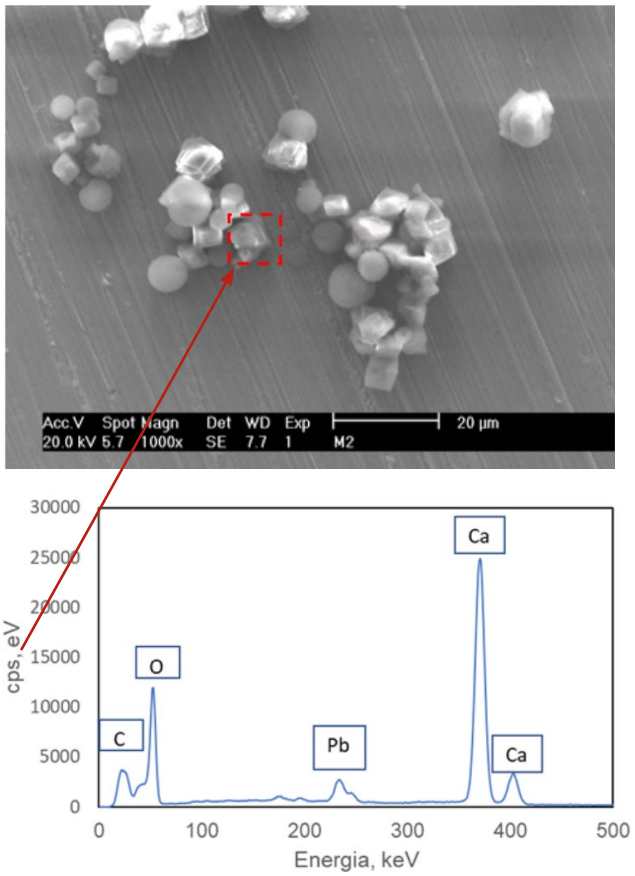


Figura 5. Micrografías MEB y análisis EDS de la interacción superficial entre galena y el calcio precipitado mediante la adición de carbonato de sodio.

Remoción de calcio y magnesio en solución mediante la adición de Na_2CO_3.

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos en los experimentos de remoción de Ca y Mg. En el gráfico se observa que, en el caso del calcio, tanto solo como con la presencia del Mg, su velocidad inicial de precipitación (%/min) incrementa conforme la concentración de Na_2CO_3 aumenta; es decir, se observa que aparentemente la velocidad inicial tiene un comportamiento lineal respecto a la concentración de carbonato de sodio adicionado. También se puede observar que, la remoción de Ca solo y Ca+Mg es muy similar; por lo anterior se puede inferir que la presencia del Mg no tiene algún efecto en la remoción de Ca. En relación con la remoción de Mg, se puede observar que la remoción es mayor con Mg solo y esta aumenta también con una mayor adición de carbonato de sodio; sin embargo, este comportamiento no parece lineal, sino que da ini-

cio una vez adicionada cierta cantidad de Na_2CO_3 (mayor a 0.008 M). Además, la precipitación de Mg es menor que la de Ca. Los resultados sugieren que la remoción de Mg sí se ve afectada por la presencia de calcio en solución, probablemente debido a que el calcio consume preferencialmente al ion carbonato.

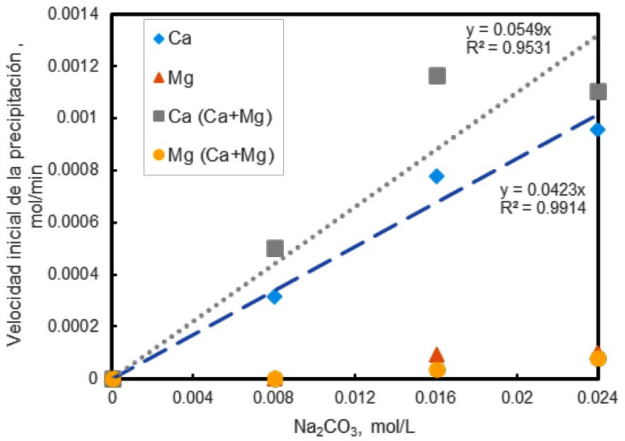


Figura 6. Remoción Ca^{2+} y Mg^{2+} mediante la adición de 0.008, 0.016 y 0.024 mol/L de Na_2CO_3.

Con los resultados obtenidos de esta serie de pruebas, se pudo establecer un modelo cinético a fin de entender el papel de la concentración de los reactantes y del tiempo de reacción, y estar en posibilidad de predecir la precipitación de Ca. Este modelo cinético se describe a continuación.

Cinética de reacción de Ca^{2+} con condiciones estequiométricas

Reacción:

$$Ca^{2+} + {CO_3}^{2-} \rightarrow CaCO3 \downarrow \quad (4)$$

Se propone una cinética de segundo orden para una reacción en fase homogénea (e.g., reactantes en fase acuosa):

$$-\frac{d[Ca]}{dt} = \boldsymbol{k[Ca][CO_3]} \quad (5)$$

Definiendo a R como la fracción de calcita que precipita:

$$\boldsymbol{R} = \frac{[Ca]_0 - [Ca]}{[Ca]_0} \quad (6)$$

Donde: $[Ca]_0$ es la concentración inicial de calcio y [Ca] la concentración de calcio en cualquier instante.

Dado que la reacción ocurre bajo condiciones estequiométricas, la concentración de calcio en cualquier momento es igual a la del carbonato:

$$[Ca] = [CO_3] \quad (7)$$

Sustituyendo y escribiéndolo en términos de la concentración de [Ca] tenemos:

$$-\frac{d[Ca]}{dt} = k[Ca][CO_3] = k[Ca][Ca] = k[Ca]^2 \quad (8)$$

Reagrupando e integrando con las condiciones a la frontera: para t=0, $[Ca]=[Ca]_0$ y para t=t, [Ca]=[Ca].

$$\frac{1}{[Ca]} - \frac{1}{[Ca]_0} = k\,t \quad (9)$$

Despejando [Ca]:

$$[\boldsymbol{Ca}] = \frac{[\boldsymbol{Ca}]_0}{\boldsymbol{kt}[\boldsymbol{Ca}]_0+\boldsymbol{1}} \quad (10)$$

Cinética de reacción bajo condiciones no estequiométricas.

$$[CO_3] = [CO_3]_0 - ([Ca]_0 - [Ca]) \quad (11)$$

Sustituyendo (11) en (4).

$$-\frac{d[Ca]}{dt} = k[Ca]\,([CO_3]_0 - ([Ca_3]_0 - [Ca])) \quad (12)$$

Agrupando [Ca]:

$$-\frac{d[Ca]}{[Ca]\,([CO_3]_0-([Ca]_0-[Ca]))} = -\,k\,dt \quad (13)$$

Integrando por fracciones parciales y despejando [Ca]:

$$[\boldsymbol{Ca}] = \frac{[\boldsymbol{Ca}]_o-[\boldsymbol{CO_3}]_o}{\boldsymbol{1}-\frac{[\boldsymbol{CO_3}]_o}{[\boldsymbol{Ca}]_o}\boldsymbol{exp}([\boldsymbol{CO_3}]_o-[\boldsymbol{Ca}]_o)\boldsymbol{kt}} \quad (14)$$

Para un valor supuesto de k, y conocida [Ca], se puede estimar la fracción de calcita precipitada R con la ecuación respectiva.

Con la ecuación (10) y (14) y se estimó la concentración y la precipitación de calcio en cualquier tiempo. Esta precipitación se representa con una línea punteada en la Figura 7. Como se mencionó anteriormente, la temperatura tiene un efecto en la remoción de Ca, por lo que se consideraron k distintas. Una k=19.06 (L^2/mol^2 min) para los datos experimentales de T=17 °C y una k=112.205 (L^2/mol^2 min) para una T=25°C. Con el objetivo de analizar el efecto de la temperatura en la remoción de calcio se realizaron pruebas con dos temperaturas distintas (17 °C y 25 °C). Los resultados de este análisis se presentan en la Figura 7. En la Figura 7 (a) se observa que a una temperatura de 17 °C la precipitación de calcio aumenta con concentraciones mayores de carbonato de sodio. Sin embargo, para un tiempo de reacción de 60 min y adiciones estequiométricas (e.g., 0.0016 M) y superiores (0.0024 M) el incremento no es notable. Por ejemplo, con una concentración de 0.016 mol/L de Na_2CO_3 la remoción de calcio es del 90%, mientras que con 0.024 mol/L de Na_2CO_3 es del 99%.

Se observó que la temperatura es un parámetro relevante, por lo que el análisis se realizó a una temperatura de 25° C, los resultados de presentan en la Figura 7 (b). Se observó un incremento en la remoción de calcio cuando la temperatura aumentó. Por ejemplo, cuando T= 17 °C y la concentración de Na_2CO_3= 0.008 mol/L, la remoción de calcio fue de 40%, mientras que, a una temperatura de 25 °C alcanzó el 54%, lo que permite inferir un efecto positivo de la temperatura en la recuperación de calcio, es decir la mayor posibilidad de que la precipitación se vea gobernada por la reacción química.

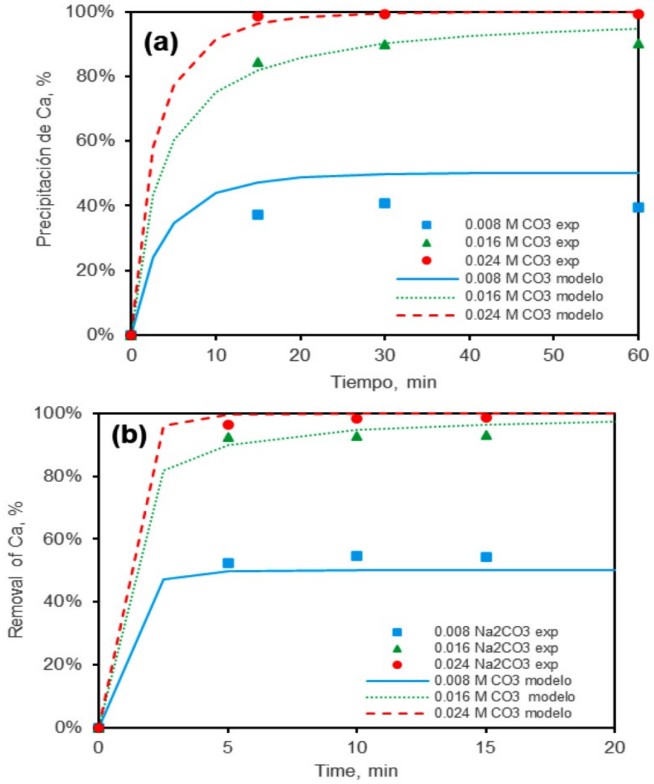


Figura 7. Efecto del tiempo en la recuperación de calcio en solución. (a) T=17 °C. (b) T=25°C.

CONCLUSIONES

La adición de Na_2CO_3 a una solución saturada de sulfato de calcio (0.016 mol/L $CaSO_4$) promueve la precipitación del calcio como $CaCO_3$. Se encontró que el calcio precipita como calcita y vaterita (poliformo de la calcita).

Las mediciones de potencial zeta efectuadas a los sólidos obtenidos de la adición de Na_2CO_3 a una solución de $MgSO_4$ (0.002 M) y $CaSO_4$ (0.016 M), mostraron que su carga es negativa, generada por la disolución incongruente del sólido, el cual disuelve más iones calcio que iones carbonato en un medio alcalino.

Los resultados sugieren que la precipitación de calcio con la adición de carbonato de sodio bajo condiciones estequiométricas y no estequiométricas, está descrita por una cinética de reacción de segundo orden.

RECONOCIMIENTOS

S. Ojeda-Villegas agradece a CONACYT por la beca otorgada para estudiar un posgrado, Se extiende el agradecimiento al personal técnico y administrativo del Cinvestav-IPN unidad Saltillo.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Grano, S.R., et al., "Detection and control of calcium sulphate precipitation in the lead circuit of the Hilton concentrator of Mount Isa Mines Limited, Australia". Proc. XIX International Mineral Processing Congress. Vol. 10. pp. 1139-1163. 1995.
[2] Bulut, G. and Ü. Yenial, "Effects of major ions in recycled water on sulfide minerals flotation". Minerals & Metallurgical Processing. Vol. 33. pp. 137-143 2016. DOI: https://doi.org/10.19150/mmp.6750.
[3] Levay, G., R.S.C. Smart, and W.M. Skinner, "The impact of water quality on flotation performance". The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy.Vol. march/abril. pp. 69-75. 2001.
[4] Zanin, M., H. Lambert, and C.A.d. Plessis, "Lime use and functionality in sulphide mineral flotation: A review". Minerals Engineering. Vol. 143 pp. 1-14. 2019 DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105922.
[5] El-ammouri, E., et al., "Aggregation index and methodology to study the role of magnesium in aggregation of sulphide slurries". CIM Bulletin. Vol. 95 pp. 67-72. 2002.
[6] Uribe-Salas, A., "Tratamiento del agua de alimentación a molinos de la Planta 2 Unidad Sabinas". 2010.
[7] Sinche-Gonzalez, M. and D. Fornasiero, "Understanding the effect sulphate in mining-process water on sulphide flotation". Minerals Engineering.Vol 165 pp 1-10. 2021 DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106865.
[8] Ikumapayi, F., B. Johansson, and H.R. Kota, "Recycling of process water : effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena". Minerals Engineering.Vol 39. pp. 77-88. 2012 DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.07.016.
[9] Dávila-Pulido, G.I., Estudio experimental del efecto del sulfato de calcio en las aguas de flotación sobre las propiedades superficiales de la esfalerita, in Tesis doctoral. 2014, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN: Coahuila, México.
[10] Lascelles, D., J.A. Finch, and C. SUI, "Depressant action of Ca and Mg on flotation of Cu activated sphalerite". Canadian Metallurgical Quarterly Vol. 42 pp.133-140. 2002.
[11] Bustos-Flores, E., M. Elizondo-Álvarez, and A. Uribe-Salas, "Thermodynamic and experimental studies on the removal of calcium and sulfate ions from recycling waters of complex-sulfide flotation operations.". Tansactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol. 31 pp. 3116-3127. 2021 DOI: https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65720-5.
[12] Elizondo-Álvarez, M.A., et al., "Interaction mechanism between galena and calcium sulfate ions". Minerals Engineering. Vol 111. pp. 116-123. 2017 DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.011.
[13] Dávila-Pulido, G.I. and A. Uribe-Salas, "Effect of calcium, sulphate and gypsum on copper-activated and non-activated sphalerite surface properties". Minerals Engineering. Vol 55 pp. 147-153. 2014.

Cómo citar este artículo:

Ojeda-Villegas, S. D., & Uribe-Salas, A. (2023). Remoción de los iones Ca2+ y Mg2+ de las aguas de flotación de sulfuros complejos mediante la adición de carbonato de sodio. EPISTEMUS, 17(34).
https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.255

Análisis integral de la disolución de los metales preciosos con sistemas de lixiviación novedosos a base de aminas

Comprehensive Analysis of the Dissolution of Precious Metals with Innovative Amine-Based Leaching Systems

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Claudia Emilia Cos Castillo [1]
Juan Carlos Fuentes Aceituno [2]

Recibido: 14 / 11 / 2022
Aceptado: 14 / 03 / 2023
Publicado: 20 / 04 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.267

Autor de Correspondencia:
M. en C. Claudia Emilia Cos Castillo
Correo: claudia.cos@cinvestav.edu.mx

Resumen

En este trabajo de investigación se estudiaron, desde un enfoque electroquímico, los sistemas de lixiviación novedosos a base de aminas; la monoetanolamina (MEA) y la etilamina (EA), para mejorar el entendimiento del mecanismo de reacción de la disolución de los metales preciosos, i.e., el oro y la plata. Se presenta el efecto de la concentración de la MEA y la EA, en la velocidad de oxidación de los metales preciosos. El estudio es complementado por medio de técnicas electroquímicas tales como: Técnica del potencial de circuito abierto (OCP), voltametría lineal (VL) y cronoamperometrías. Los resultados demuestran que estas aminas tienen un gran potencial al disolver el Au y la Ag, debido a que se alcanzan densidades de corriente promedio de 0.008 y 0.013 A/cm^2 empleando la MEA y 0.023 y 0.029 A/cm^2 utilizando la EA, respectivamente. Además, los resultados dictaminan que tanto la MEA como la EA podrían disminuir el impacto ambiental que conllevan los procesos hidrometalúrgicos.

Palabras clave: monoetanolamina, etilamina, oxidación, lixiviación, metales preciosos.

Abstract

In this research work, novel amine-based leaching systems monoethanolamine (MEA) and ethylamine (EA) were studied from an electrochemical approach to improve the understanding of the dissolution reaction mechanism of precious metals, i.e., gold and silver. The effect of MEA and EA concentration on the oxidation rate of precious metals is presented. The study is complemented with electrochemical techniques such as: open circuit potential technique (OCP), linear voltammetry (VL) and chronoamperometry. The results show that these amines have a great potential in dissolving Au and Ag since average current densities of 0.008 and 0.013 A/cm^2 are reached using the MEA, and 0.023 and 0.029 A/cm^2 using the EA, respectively. Furthermore, the results indicate that both MEA and EA could decrease the environmental impact involved in hydrometallurgical processes.

Keywords: *monoethanolamine, ethylamine, oxidation, leaching.*

1 M. en C. en Ingeniería Metalúrgica del Centro de Investigación y estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México. claudia.cos@cinvestav.edu.mx, https://orcid.org/0000-0001-9925-2133
2 D. en C. en Ingeniería Química, Centro de Investigación y estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México. juan.fuentes@cinvestav.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-3566-2835

INTRODUCCIÓN

Se han estudiado sistemas de lixiviación a base de tiosulfato y tiourea como una alternativa al sistema convencional de cianuro para la recuperación del oro y la plata. Sin embargo, estos sistemas tienen un mecanismo de reacción complejo lo que conduce a la comunidad científica a resolver su principal problema; el consumo masivo del cianuro, tiourea y tiosulfato en presencia del cobre. No obstante, se ha sugerido el uso de distintos compuestos químicos para la extracción de dichos metales preciosos (principalmente la plata) como lo es el nitrito [1] y la monoetanolamina (MEA) [2] para la estabilización del cobre y disminuir el consumo del tiosulfato durante la lixiviación del oro y la plata. Donde se logró encontrar la posibilidad de crear complejos del tipo Ag-MEA que favorecen la disolución de la plata, llevándonos a explorar sistemas lixiviantes a base de aminas para la disolución de los metales preciosos [1]–[9].

Como es el caso de los sistemas MEA-NH_3-H_2O_2 y EA-NH_3-H_2O_2, debido al logro eficiente de la disolución de la plata sustituyendo el agente oxidante cobre por el peróxido. En este sentido, al conocer que la MEA y EA son aminas primarias y que son considerados compuestos orgánicos amigables con el medio ambiente y poco tóxicas, dado al principal uso de éstas en la encapsulación del CO_2 en industrias petroleras, nos dan la posibilidad de disolver los metales preciosos sin perjudicar el medio ambiente tal y como lo hacen otras especies químicas altamente contaminantes e.g., el cianuro [10]–[13].

METODOLOGÍA

Materiales, equipos y reactivos

Las soluciones lixiviantes se prepararon con reactivos de grado analítico y agua destilada. Los reactivos utilizados fueron: electrodos de disco tipo rotatorio de oro y plata (99.999%, Alfa Aesar), etilamina (66-72%, Sigma-Aldrich) y monoetanolamina (99.76%, J. T. Baker). Para el ajuste del pH se utilizó, hidróxido de sodio (98.3%, Fermont).

Estudio termodinámico

Con el fin de estudiar la naturaleza de la disolución de la plata y del oro en soluciones de MEA y EA sometidas a diferentes condiciones de pH y concentraciones de los reactivos, se construyeron diagramas de Pourbaix (Eh-pH) para cada una de las soluciones para determinar las especies de MEA y EA con el fin de discernir el potencial anódico a partir del cual comienza la formación de los complejos deseados, es decir, MEA-Ag y EA-Ag.

La construcción de los diagramas termodinámicos se realizó en el software MEDUSA© (Make Equilibrium Diagrams Using Sophisticated Algorithms). A pesar de que este programa contiene Hydra, una base de datos extensa de constantes de equilibrio, es importante resaltar que a dicho programa se le anexaron las constantes de equilibrio para las diferentes posibles reacciones de complejación de la monoetanolamina y la etilamina tal y como lo muestra la tabla 1. Las condiciones para la modelación de las soluciones son reportadas en la tabla 2.

Tabla 1. Constantes de equilibrio anexadas al programa MEDUSA ©

Reacciones químicas	Log K	Referencia
$Ag^+ + EA = AgEA^+$	3.38 para I = 0.5	Smith & Martell, (1975) [14]
$Ag^+ + 2EA = Ag(EA)_2^+$	7.30 para I = 0.5	
$Ag^+ + MEA = AgMEA^+$	3.13 para I = 0.5	
$Ag^+ + 2MEA = Ag(MEA)_2^+$	6.68 para I = 0.5	
Donde I = fuerza iónica		

Tabla 2. Concentraciones utilizadas para la modelación termodinámica y construcción de los diagramas de Pourbaix (Eh-pH).

Sistema	Concentración (M)		
	Ag	EA	MEA
Ag-H_2O	$1x10^{-5}$		
Ag-EA-H_2O	$1x10^{-5}$	0.05	
Ag-MEA-H_2O	$1x10^{-5}$		0.05

Estudio electroquímico

Se utilizó una celda electroquímica convencional de tres electrodos para la realización de los experimentos electroquímicos, la cual constituye los siguientes componentes: un reactor de vidrio pyrex de 100 mL de capacidad, los electrodos de trabajo tipo disco rotatorio de plata y de oro de alta pureza, el electrodo de referencia de Ag/AgCl dentro del capilar de Luggin y el contraelectrodo de grafito. En el reactor de vidrio pyrex (vaso de precipitado de 100 mL) se vertieron 50 mL de las soluciones mostradas en las tablas 3 a diferente concentración de reactivos y pH a temperatura ambiente (24 °C). Cabe mencionar que el pH de cada solución se midió con un electrodo de pH (SENSOREX). De igual manera, la temperatura se registró empleando un termómetro de mercurio. Posteriormente, se conectaron el electrodo de trabajo de tipo disco rotatorio, el electrodo de referencia sumergido en la solución sobresaturada de KCl en el capilar de Luggin y el contraelectrodo de grafito al Potenciostato/Galvanostato (VersaStat 4) en donde se realizaron las técnicas electroquímicas pertinentes; las técnicas de potencial de circuito abierto (OCP) y de voltametría lineal (VL).

Tabla 3. Soluciones utilizadas para el estudio electroquímico de la oxidación de la plata y del oro.

Solución	Concentración (M)	pH
Blanco	Agua destilada (H_2O)	11.21
EA	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.80, 1.00 y 1.50 M	11.3, 11.6, 12.2, 12.4, 12.5, 12.6, 12.7 (natural)
MEA	0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.80, 1.00 y 1.50 M	10.8, 11.3, 11.5, 11.8, 11.8, 12.0, 12.1 (natural)

La primera técnica utilizada en el estudio electroquímico fue la de OCP durante 2 y 5 min. Una vez determinado el OCP, éste se tomó como punto de partida en la técnica de voltametría lineal (VL). En la técnica de VL los electrodos de trabajo tipo disco rotatorio de oro (Au) y plata (Ag) se sometieron a una velocidad de barrido de potencial de 35 mV/s, hacia la dirección anódica hasta el límite de descomposición de la solución electrolítica, 2.6 V vs SHE. Con estas pruebas se pretendió elucidar el potencial de corrosión y el potencial a partir del cual la disolución del Au y Ag son controlados por la difusión de especies fluidas a través de la doble capa de la interfase oro/plata-solución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio termodinámico de la lixiviación de la plata

El comienzo de esta investigación fue a partir del estudio termodinámico para tener un mejor entendimiento de la especiación de las soluciones lixiviantes, se delimitó el comportamiento del sistema Ag-MEA-H_2O.

Sistema Ag-MEA-H_2O

En la figura 1B se presenta un diagrama de Pourbaix para el sistema Ag-MEA-H_2O en donde se observa que al tener concentraciones bajas de MEA es posible la formación del complejo deseable $Ag(MEA)_2^+$ en medios alcalinos i.e., a un pH > 7. De igual forma, es evidente que la formación del complejo $Ag(MEA)_2^+$ se favorece conforme el pH se hace más alcalino, e.g., se requiere un potencial de 0.5 y 0.28 V vs SHE para oxidar a la plata en un pH de 7 y 10, respectivamente. Además, se puede diferenciar con

respecto a la figura 1A que las áreas donde prevalecen los sólidos de plata, así como la especie $Ag(OH)_2$, son desplazadas por la MEA, tal y como se infirió en estudios previos con respecto al uso de las aminas para disolver la plata [13].

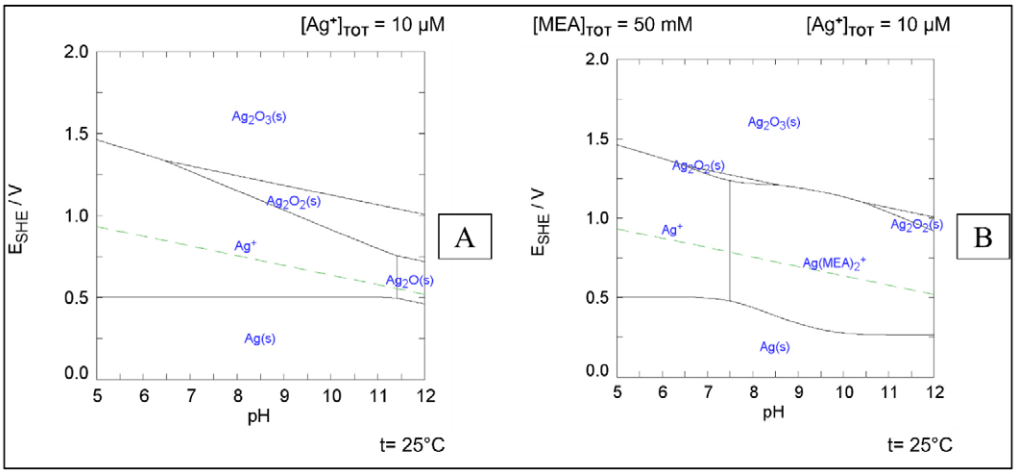


Figura 1. Diagrama de Pourbaix de los sistemas (A) Ag-H_2O y (B) Ag-MEA-H_2O.

Sistema Ag-EA-H_2O

De igual manera, se modeló termodinámicamente el sistema Ag-EA-H_2O, con el fin de dilucidar los complejos estables que la EA puede formar con la plata. En la figura 2B se puede observar que la etilamina también puede complejar a la plata, formando la especie $Ag(EA)_2^+$, con concentraciones bajas de etilamina; 0.05 M. El complejo Ag-EA, se forma en condiciones alcalinas en el intervalo de pH desde 8.43 hasta 14 bajo los potenciales anódicos tales como 0.48 a 0.23 V vs SHE. Así mismo, se puede observar que la EA desplaza las zonas de los sólidos de plata a potenciales más catódicos tal y como se pudo observar con la MEA, que pueden ser diferenciadas en la figura 2A.

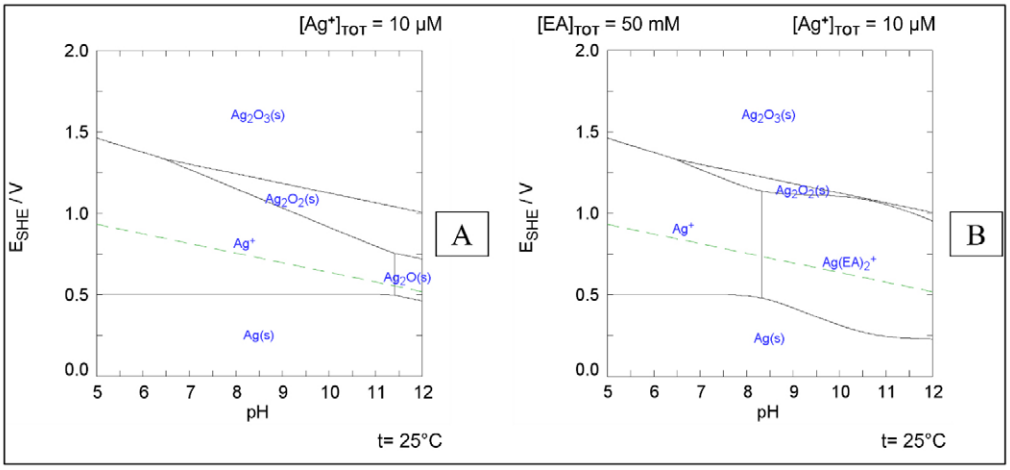


Figura 2. Diagrama de Pourbaix de los sistemas (A) Ag-H_2O y (B) Ag-EA-H_2O.

Estudio electroquímico de la oxidación de la plata

Sistema Ag-MEA-H_2O

Una vez determinadas las especies presentes en los sistemas, se procedió a realizar la experimentación electroquímica de cada una de las soluciones y sistemas para tener un conocimiento más amplio en cuanto al comportamiento redox de las soluciones con la superficie de la plata.

La figura 3 muestra el comportamiento electroquímico de la MEA con la plata en condiciones oxidantes. Se puede observar que, a pesar de llegar a potenciales límites a la descomposición de la solución, tales como 2.6 V vs SHE, la reacción que ocurre dentro del sistema es ininterrumpida y mantiene la misma tendencia. Es decir, la reacción no llega a ser un proceso controlado por difusión. Además, se observa que al incrementar la concentración de la MEA aumenta la densidad de corriente y, el OCP de la solución es recorrido a potenciales catódicos (ver tabla 4).

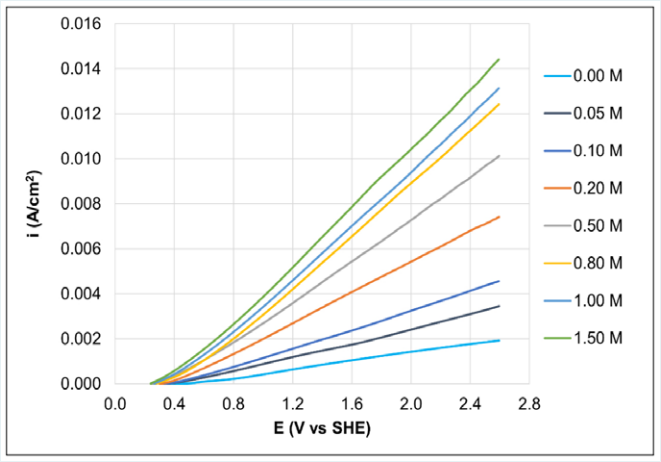


Figura 3. Polarización anódica de la plata variando la concentración de la MEA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

Tabla 3. Comportamiento del OCP de la plata al variar la concentración molar de la MEA durante dos minutos.

Concentración de MEA (M)	OCP (V vs SHE)	i (A/cm²)
0.00	0.40	0.002
0.05	0.36	0.004
0.10	0.30	0.005
0.20	0.27	0.007
0.50	0.17	0.010
0.80	0.14	0.012
1.00	0.14	0.013
1.50	0.11	0.014

Sistema Au-MEA-H_2O

La determinación termodinámica de las especies presentes en este sistema no es posible puesto que, en la bibliografía no hay constantes de equilibrio o valores de energía libre de Gibbs que puedan ser modeladas

termodinámicamente. Sin embargo, la discusión del comportamiento redox de las soluciones con la superficie del electrodo de oro, hasta el momento se realizará solamente desde una perspectiva electroquímica.

La figura 4 muestra el comportamiento electroquímico de la MEA con el oro en condiciones oxidantes, donde se puede observar tres aspectos: 1) al llegar a potenciales límites a la descomposición de la solución tales como 2.6 V vs SHE el incremento de la densidad de corriente es proporcional a la concentración como es el caso de los sistemas Ag-MEA-H_2O además, no hay indicios de ser un proceso controlado por difusión; 2) al incrementar la concentración de la MEA, el OCP de la solución es recorrido a potenciales catódicos (ver tabla 4) y 3) se manifiesta una caída de la densidad de corriente en un potencial aproximado a 0.8 V vs SHE empleando la concentración 1.5 M de MEA, por lo que cabe la posibilidad de que se presente más de un mecanismo de reacción con el sistema Au-MEA-H_2O. Esto podría ser interpretado que entre más cantidad de MEA se encuentre en el sistema, más oro interaccionará con éste para formar complejos del tipo Au-MEA. Sin embargo, la caída de la densidad de corriente notoria en la concentración de 1.5 M de MEA en un potencial aproximado de 0.8 V vs SHE nos permitió hacer un acercamiento en un rango de potencial de 0.2-1.2 V vs SHE (ver figura 5) para observar detenidamente la posibilidad de que ocurra más de un mecanismo de reacción en este sistema.

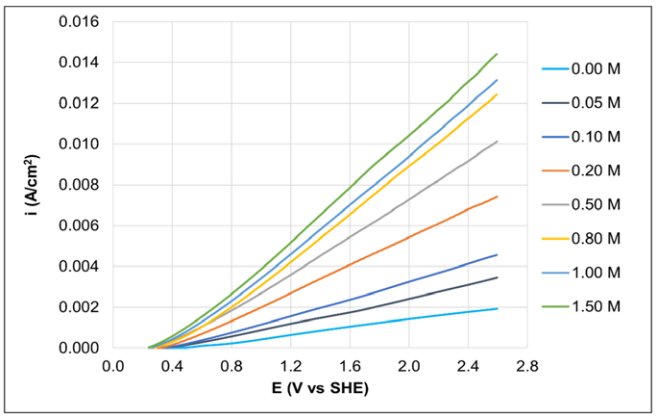


Figura 4. Polarización anódica del oro variando la concentración de la MEA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

Tabla 4. Comportamiento del OCP del oro al variar la concentración molar de la MEA durante dos minutos.

Concentración de MEA (M)	OCP (V vs SHE)	i (A/cm²)
0.00	0.21	0.002
0.05	0.12	0.004
0.10	0.09	0.005
0.20	0.08	0.006
0.50	0.10	0.008
0.80	0.04	0.011
1.00	0.04	0.012
1.50	0.05	0.013

Si se presta atención al blanco (0 M de MEA) a un pH de 11.2, es posible observar dos pequeñas mesetas que se forman durante el barrido de potencial anódico del oro. Esto posiblemente podría ser atribuido a que el primer mecanismo de reacción corresponda a la ecuación (1) y después prosiga a la ecuación (2). Sin embargo, esto es una suposición preliminar, la cual deberá ser estudiada a detalle empleando otras técnicas electroquímicas y de caracterización.

$$Au + 2H_2O \rightarrow 2H^+ + AuOH \qquad \log k = -4.07 \qquad (1)$$

$$Au + 2H_2O \rightarrow 2H^+ + Au(OH)_2^- \qquad \log k = 8.36 \qquad (2)$$

En bajos potenciales tales como 0.6 V vs SHE aproximadamente, la formación del complejo AuOH es más estable y al ir incrementando el potencial anódico se

verá reflejado una competencia entre el complejo $Au(OH)_2^-$ y AuOH en un potencial aproximado de 0.95 V vs SHE. No obstante, al ir introduciendo MEA en el sistema se puede observar que las mesetas se recorren e incluso solo da lugar a un solo mecanismo de reacción. Como se mencionó durante el estudio termodinámico del sistema Ag-MEA-H_2O, la MEA desplaza las áreas en donde se encontraban los sólidos de plata ($Ag(OH)_2$) al formar el complejo $Ag(MEA)_2^+$ (ver figura 1). Teniendo en cuenta esto, la MEA podría estar desplazando el segundo mecanismo de reacción mostrado en la ecuación (2) dando lugar solamente a la formación del complejo AuOH. Sin embargo, no se puede dejar de lado que exista la posibilidad de que el oro y la MEA interaccionen para crear complejos entre ellos y así, el segundo mecanismo propuesto en la ecuación (2) de lugar a la formación del complejo tipo Au-MEA. Al tener más MEA en la solución, ésta podría estar favoreciendo la formación del complejo Au-MEA dando lugar a la oxidación del oro, desplazando así el mecanismo de producción del complejo AuOH. Ya que, si se observa el comportamiento de la concentración de 1.5 M de MEA de la figura 5, la doble meseta que se apreciaba en las demás concentraciones (0.00-1.00 M de MEA) desaparece formando solo un pico que podría ser atribuido al complejo tipo Au-MEA.

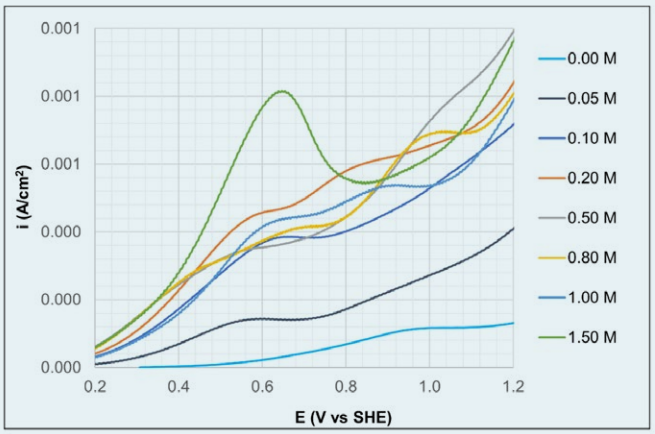


Figura 5. Polarización anódica del oro variando la concentración de la MEA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). Acercamiento del rango de potencial de 0.2-1.2 V vs. SHE del voltamperograma de la figura 4. El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

Sistema Ag-EA-H_2O

Teniendo en cuenta la especiación termodinámica (ver figura 2) y los resultados electroquímicos obtenidos del sistema Ag-MEA-H_2O (ver figura 3), se decidió completar el estudio de la oxidación de la plata en la etilamina, con el fin de comprender las diferencias cinéticas que se infirieron en los resultados previos [12] obtenidos para la lixiviación de la plata utilizando la MEA y la EA. La figura 6 muestra el comportamiento electroquímico de la plata con la EA en condiciones oxidantes. Se puede observar distintos comportamientos oxidativos de la plata mientras se incrementa la concentración de la etilamina. A pesar de llegar a potenciales límites a la descomposición de la solución, tal es 2.6 V vs SHE, las distintas reacciones que se están llevando a cabo no alcanzan a ser controladas por un proceso difusivo.

Sin embargo, al utilizar bajas concentraciones de EA, particularmente la concentración de 0.10 y 0.20 M, se puede observar que en el rango de potencial de 1 a 1.5 V vs SHE se presenta una pequeña disminución de la densidad de corriente. Esto podría ser indicio de un proceso controlado por difusión o, podría indicar que el mecanismo de reacción en la oxidación de la plata a bajas concentraciones de EA no es el mismo que se lleva a cabo al emplear altas concentraciones de la misma; es decir, la oxidación de la plata se podría llevar a cabo por medio de dos mecanismos.

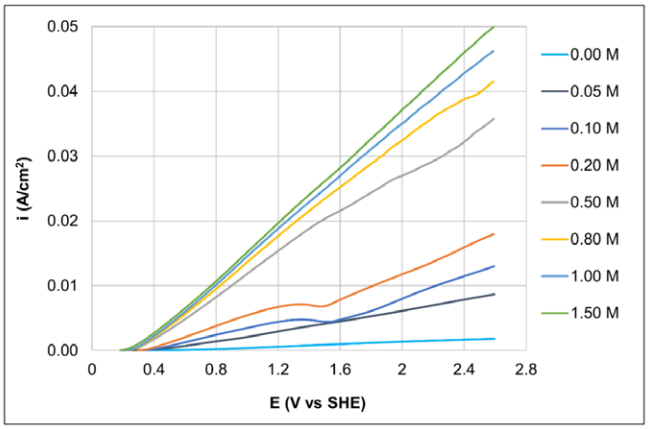


Figura 6. Polarización anódica de la plata variando la concentración de la EA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

Por otra parte, al incrementar la concentración de EA, la densidad de corriente incrementa y el potencial de reposo (OCP) se ve recorrido catódicamente desde 0.21 hasta 0.04 V vs SHE para una concentración de 0.00 y 1.50 M EA, respectivamente. Este comportamiento es similar al utilizar la MEA durante la polarización anódica de la plata. Entretanto, la densidad de corriente tiene un incremento abrupto al subir la concentración de EA de 0.20 a 0.50 M. Tal incremento es del 99%, por lo que se puede inferir que el mecanismo de reacción de oxidación de la plata que ocurre en altas concentraciones de EA es mucho más rápido que a bajas concentraciones de EA. Además, y como se mencionó anteriormente, se puede deducir que el incremento lento de la densidad de corriente empleando bajas concentraciones de EA se esté llevando a cabo por medio de dos mecanismos de oxidación de la plata.

Sistema Au-EA-H_2O

Al tener un mejor entendimiento del comportamiento tanto de la MEA como la EA al interaccionar con la plata, y observar que dichas aminas tienen un comportamiento similar. Ahora bien, queda preguntarse lo que la etilamina podría ofrecer al realizar los experimentos electroquímicos

con el oro. Ya que se obtuvieron resultados favorables al estudiar el comportamiento oxidativo del oro usando la monoetanolamina como medio lixiviante.

La figura 7 muestra el comportamiento electroquímico de la EA con el oro en condiciones oxidantes, donde se puede observar tres aspectos: 1) al llegar a potenciales límites a la descomposición de la solución tales como 2.6 V vs SHE el incremento de la densidad de corriente es proporcional a la concentración como es el caso de los sistemas Ag-EA-H_2O además, no hay indicios de ser un proceso controlado por difusión; 2) al incrementar la concentración de la EA, el OCP de la solución es recorrido a potenciales catódico, desde 0.21 hasta 0.05 V vs SHE para una concentración de 0.00 y 1.50 M de EA, respectivamente; y 3) se manifiesta una caída de la densidad de corriente en un potencial aproximado a 1.6 V vs. SHE empleando la concentración 0.2 M de EA, por lo que cabe la posibilidad de que se presente más de un mecanismo de reacción dentro del sistema Au-EA-H_2O. Esto podría ser interpretado que entre más cantidad de EA se encuentre en el sistema, más oro interaccionará con ésta para formar complejos del tipo Au-EA.

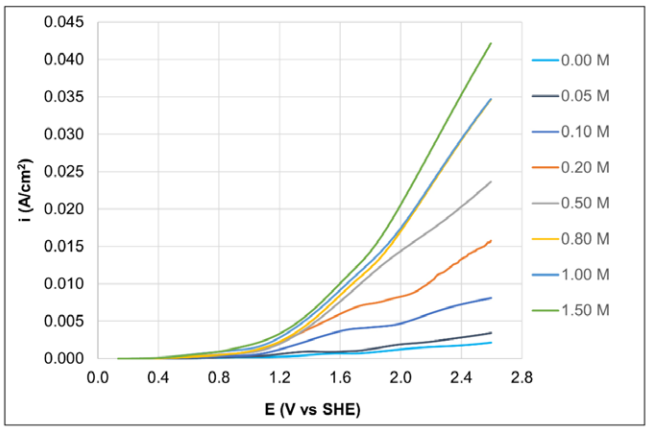


Figura 7. Polarización anódica del oro variando la concentración de la EA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

Asimismo, se puede observar el comportamiento anteriormente descrito en el sistema Au-MEA-H_2O. Es decir, en el experimento (blanco: 0.00 M de EA) a un pH de 11.2, es posible observar dos pequeñas mesetas que se forman durante el barrido de potencial anódico del oro las cuales podrían estar asociados a las ecuaciones (1) y (2). No obstante, al introducir EA en el sistema se puede observar que las mesetas se recorren e incluso solo da lugar a un solo mecanismo de reacción. De hecho, es más notorio que la reacción que ocurre dentro del sistema se vuelve ininterrumpida y mantiene la misma tendencia. Esto podría atribuirse a que, como se mencionaba durante el estudio termodinámico del sistema Ag-EA-H_2O, la EA desplaza las áreas en donde se encontraban los sólidos de plata ($Ag(OH)_2$) al formar el complejo $Ag(EA)_2^+$ (ver figura 2). Sin embargo, no se puede dejar de lado que exista la posibilidad de que el oro y la EA interaccionen y más empleando este sistema, dado a que la etilamina tiende a presentar una cinética mayor de oxidación de la Ag con respecto a la MEA. Por lo tanto, la etilamina puede llegar a crear complejos con el oro y así, el segundo mecanismo propuesto en la ecuación (2) de lugar a la formación del complejo tipo Au-EA. Puesto que, al tener más EA en la solución, ésta podría estar favoreciendo la formación del complejo Au-EA dando lugar a la oxidación del oro, desplazando así el mecanismo de producción del complejo AuOH. Ya que, si se observa el comportamiento de la oxidación del oro en el rango de potencial de 0.4 a 2.0 V vs SHE de la figura 5, la doble meseta se ve recorrida al emplear las concentraciones de 0.05 a 0.20 M y desaparece al incrementar la concentración de etilamina (0.50-1.50 M de EA). Este resultado ratifica que la oxidación del oro se puede deber a la formación del complejo tipo Au-EA.

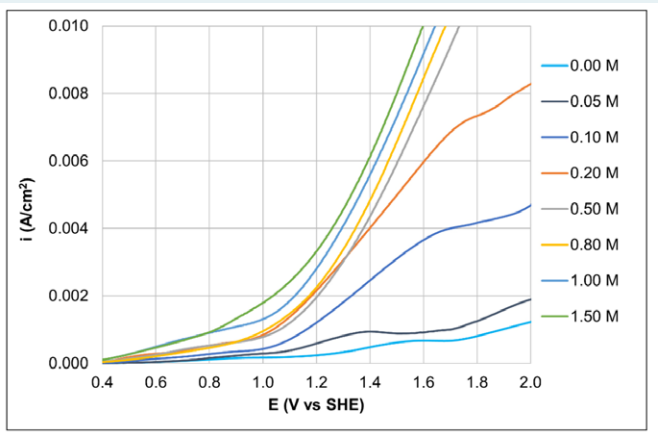


Figura 8. Polarización anódica del oro variando la concentración de la EA manteniendo el pH natural de cada una de las soluciones (ver tabla 3). Acercamiento del rango de potencial de 0.4-2.0 V vs. SHE del voltamperograma de la figura 7. El voltamperograma lineal se realizó barriendo el potencial desde el OCP hacia la dirección anódica a 35 mV/s y temperatura ambiente.

CONCLUSIÓN

El uso de las aminas para la extracción de los metales preciosos ha dado resultados sumamente prometedores e incluso enigmáticos. Por lo que, es necesario seguir estudiando el comportamiento oxidativo tanto del metal precioso como el de la descomposición de la solución orgánica, i.e., la MEA y la EA. Ya que, hay muy poca información sobre este último en la bibliografía.

Además, el comportamiento peculiar al oxidar la plata tanto en bajas como en altas concentraciones de EA sugiere un posible control mixto del tipo electroquímico-químico dentro del sistema Ag-EA-H_2O.

Finalmente, la oxidación del oro tanto en MEA como EA sugieren la posibilidad de disolver este metal precioso en estos sistemas lixiviantes. Comparando las densidades de corriente del Au y la Ag obtenidas con las concentraciones más bajas de ambas aminas (0.05 M); para la MEA 0.0004 y 0.006 A/cm^2 y la EA de 0.003 y 0.009 A/cm^2; son mayores a las densidades de corriente Au y Ag reportadas; de 0.0003 y 0.002 A/cm^2, empleando 0.01 M de cianuro [15], [16].

RECONOCIMIENTOS

Claudia Emilia Cos Castillo agradece al CONACyT (México) la beca de postgrado recibida. Asimismo, la colaboración de Ana Elena Muñiz, Miguel Angel Aguilar y Socorro García en esta investigación es debidamente reconocida.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. Holguin-Gonzalez, J. C. Fuentes-Aceituno, M. seuk Kim, and J. chun Lee, "A kinetic-mechanistic study of silver oxidation with the NaNO2–CuSO4 alternative novel system," Electrochim. Acta, vol. 337, no. 2, p. 135792, 2020, doi: 10.1016/j.electacta.2020.135792.

[2] D. M. Puente-Siller, J. C. Fuentes-Aceituno, and F. Nava-Alonso, "An analysis of the efficiency and sustainability of the thiosulfate-copper-ammonia-monoethanolamine system for the recovery of silver as an alternative to cyanidation," Hydrometallurgy, vol. 169, pp. 16–25, 2017, doi: 10.1016/j.hydromet.2016.12.003.

[3] W. D. Callister, Fundamentals of Materials Science and Engineering, Fifth Edit. 2001.

[4] J. Cui and L. Zhang, "Metallurgical recovery of metals from electronic waste : A review," vol. 158, pp. 228–256, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.02.001.

[5] C. Hagelüeken, "Recycling of Electronic Scrap At Umicore Precious Metals," Acta Metall. Slovaca, vol. 12, no. January, pp. 111–120, 2006.

[6] M. G. Aylmore and D. M. Muir, "Thiosulfate leaching of gold - a review," Miner. Eng., vol. 14, no. 2, pp. 135–174, 2001, doi: 10.1016/S0892-6875(00)00172-2.

[7] E. Reyes-Sandoval and J. C. Fuentes-Aceituno, "Maximization of the silver recovery with the 'monoethanolamine-copper-ammonium sulfate' novel system. A step towards the development of a less toxic leaching technology," Hydrometallurgy, vol. 173, no. June, pp. 22–31, 2017, doi: 10.1016/j.hydromet.2017.07.007.

[8] D. M. Puente-Siller, J. C. Fuentes-Aceituno, and F. Nava-Alonso, "Hydrometallurgy A kinetic – thermodynamic study of silver leaching in thiosulfate – copper – ammonia – EDTA solutions," Hydrometallurgy, vol. 134–135, pp. 124–131, 2013, doi: 10.1016/j.hydromet.2013.02.010.

[9] D. M. Puente-Siller, J. C. Fuentes-Aceituno, and F. Nava-Alonso, "Study of thiosulfate leaching of silver sulfide in the presence of EDTA and sodium citrate. Effect of NaOH and NH4OH," Hydrometallurgy, vol. 149, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.hydromet.2014.06.004.

[10] S. D. Sharma and M. Azzi, "A critical review of existing strategies for emission control in the monoethanolamine-based carbon capture process and some recommendations for improved strategies," Fuel, vol. 121, pp. 178–188, 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2013.12.023.

[11] M. A. Sutton, J. W. Erisman, F. Dentener, and D. Möller, "Ammonia in the environment: From ancient times to the present," Environ. Pollut., vol. 156, no. 3, pp. 583–604, 2008, doi: 10.1016/j.envpol.2008.03.013.

[12] C. E. Cos Castillo, "Estudio electroquímico del comportamiento redox de la plata en sistemas acuosos sin cianuro," Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 2020.

[13] C. E. Cos-Castillo and J. C. Fuentes-Aceituno, "A comprehensive mechanistic analysis of silver dissolution with the monoethanolamine-copper-ammonium system and the development of a novel leaching technology," Miner. Eng., vol. 186, p. 107753, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.MINENG.2022.107753.

[14] R. M. Smith and A. E. Martell, Critical Stability Constants Volumen 2: Amines, vol. 2. 1975.

[15] M. M. Aghamirian and W. T. Yen, "A study of gold anodic behavior in the presence of various ions and sulfide minerals in cyanide solution," Miner. Eng., vol. 18, no. 1, pp. 89–102, 2005, doi: 10.1016/j.mineng.2004.05.008.

[16] J. Li and M. E. Wadsworth, "Electrochemical Study of Silver Dissolution in Cyanide Solutions," J. Electrochem. Soc., vol. 140, no. 7, pp. 1921–1927, 1993, doi: 10.1149/1.2220740.

Cómo citar este artículo:

Cos Castillo, C. E., & Fuentes Aceituno, J. C. (2023). Análisis integral de la disolución de los metales preciosos con sistemas de lixiviación novedosos a base de aminas. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.267

Análisis voltamperométrico de la descomposición reductiva de la calcopirita en el sistema ácido acético-agua

Voltamperometric analysis of the reductive decomposition of chalcopyrite in the acetic acid-water system

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

L.D. Jasso Recio [1]
J.C. Fuentes-Aceituno [2]
R. Pérez-Garibay [3]

Recibido: 11 / 11 / 2022
Aceptado: 10 / 04 / 2023
Publicado: 09 / 05 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.261

Autor de Correspondencia:
Laura Denisse Jasso Recio
Correo : laura.jasso@cinvestav.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis electroquímico de la reducción de calcopirita empleando un medio acuoso en presencia de un ácido de carácter débil como el ácido acético. Lo anterior, con el fin de encontrar las condiciones energéticas más favorables para lograr disolver el hierro que está contenido en la calcopirita y con ello aminorar el fenómeno de pasivación. La investigación se realizó a nivel microelectrólisis, analizando diferentes variables como la concentración del electrolito, conductividad del electrolito y potencial sobre la cinética de reducción de la calcopirita. Este estudio se complementó con una caracterización de la superficie de la calcopirita reducida mediante la técnica de FESEM y con una cuantificación del hierro que se libera en la solución de las polarizaciones catódicas más importantes.

Palabras clave: calcopirita; ácido acético; reducción; cinética; caracterización.

Abstract

In this work, an electrochemical analysis of the reduction of chalcopyrite is presented using an aqueous medium in the presence of a weak acid such as acetic acid. The purpose of the foregoing is to find the most favorable energetic conditions to dissolve the iron contained in the chalcopyrite and thereby reduce the passivation phenomenon. The investigation was carried out at the microelectrolysis level, analyzing different variables such as electrolyte concentration, electrolyte conductivity and applied potential on the chalcopyrite reduction kinetics. This study was complemented with a characterization of the surface of the reduced chalcopyrite using the FESEM technique and with a quantification of the iron that is released in the solution of the most important cathodic polarizations.

Keywords: *chalcopyrite; acetic acid; reduction; kinetics; characterization.*

1 M. en C. en Ingeniería Metalúrgica del Centro de Investigación y estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México. laura.jasso@cinvestav.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-7686-7001
2 D. en C. en Ingeniería Química, Centro de Investigación y estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México. juan. fuentes@cinvestav.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-3566-2835
3 D. en C. en Ingeniería Metalúrgica, Centro de Investigación y estudios Avanzados del IPN, Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica #1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, Ramos Arizpe, Coahuila, 25900, México. roberto.perez@cinvestav.edu.mx, https://orcid.org/0000-0002-3746-1594

INTRODUCCIÓN.

La calcopirita ($CuFeS_2$) representa el 70% de las reservas mundiales del cobre [1]. Este mineral es muy refractario y por ello se procesa principalmente por métodos pirometalúrgicos, los cuales tienen desventajas importantes como: altos costos de producción y generación de gases tóxicos.

Una alternativa a los procesos pirometalúrgicos son los hidrometalúrgicos, ya que éstos, presentan algunas ventajas importantes; tales como, su capacidad para el tratamiento de menas pobres (cada vez más comunes en el caso del cobre) y un control más fácil de los subproductos, lo cual permite disminuir los efectos medioambientales de la obtención del metal.

Alrededor del 80% de los minerales de cobre son procesados mediante fundición y refinación. El otro 20% es obtenido hidrometalúrgicamente. De manera general los procesos hidrometalúrgicos presentan las siguientes etapas [2]:

a) Lixiviación en medio ácido, para romper la red cristalina, produciéndose una solución impura de cobre.
b) Extracción por solventes para transferir el cobre a una solución pura (un electrolito altamente concentrado en cobre puro).
c) Electrodeposición del cobre en un cátodo de cobre a partir del electrolito puro.

Básicamente existen dos tipos de procesos hidrometalúrgicos: los oxidativos y los reductivos. Una de las principales limitantes de los procesos hidrometalúrgicos oxidativos es la pasivación.

Para eliminar esta desventaja se han probado, con limitado éxito, diferentes agentes oxidantes como el ion férrico, peróxido de hidrógeno y oxígeno a elevada presión [3, 4].

Como alternativa, también se han empleado microorganismos como la Acidithiobacilus ferroxidans, para disminuir la pasivación superficial; sin embargo, hasta el momento los procesos biológicos por su lentitud sólo resultan exitosos para minerales con baja concentración de cobre [5].

En 1969 se estableció que la película que rodea la calcopirita durante la lixiviación con Fe^{3+}, forma un sulfuro bimetálico con estructura y propiedades químicas distintas a la materia prima original, pero con las mismas propiedades semiconductoras [6]. Estos productos intermedios son el resultado de las transformaciones del estado sólido que favorecen la solubilización de cationes en los vértices del cristal. Por lo tanto, el modelo implica que la reacción se lleva a cabo preferentemente en la interfaz de la estructura cristalina [7].

Para poder inhibir la pasivación que se presenta al oxidar la calcopirita, la reducción electro-asistida representa una alternativa razonable. Un método alternativo para transformar la calcopirita es la electro-lixiviación, que consiste en reducir la calcopirita ($CuFeS_2$) a calcocita (Cu_2S) u otro sulfuro de cobre de fácil extracción o incluso cobre metálico, esto mediante la aplicación de corriente eléctrica.

La reducción electro-asistida de la calcopirita ha sido estudiada en presencia de ácidos fuertes como el HCl, H_2SO_4 [8, 9], al utilizar el ácido sulfúrico como medio lixiviante la cinética de reducción disminuye debido a la formación de una capa pasiva que limita la reacción de reducción. Sin embargo, al utilizar HCl no es posible la formación de azufre elemental, ya que los estudios termodinámicos muestran que la reacción del Cl^- con el H_2S es poco probable, de esta forma el Cl^- no se puede reducir y por lo tanto no promueve la oxidación del H_2S a S. El gas cloro (Cl_2) o clorato (ClO_3^-) son las únicas especies que pudieran promover la oxidación del H_2S y no se presentan en el compartimento catódico del reactor de lixiviación reductiva electro-asistida y por ende la pasivación no se presenta en este sistema, pero, el costo de operación se ve incrementado al tratarse de un ácido muy corrosivo.

En esta investigación se estudia la reducción electro-asistida de la calcopirita utilizando ácido acético como medio lixiviante con el fin de buscar una alternativa para

reducir la calcopirita en un medio mucho menos agresivo (comparado con el HCl) y menos oxidante (comprado con el H_2SO_4) para poder ofrecer una alternativa a los problemas antes mencionados. Al ser un ácido de carácter débil se espera que el ácido acético no oxide al ácido sulfhídrico generado durante la reducción y de esta manera inhibir la pasivación.

Procedimiento experimental

El programa experimental se divide en tres etapas. En la primera etapa se llevó a cabo un estudio termodinámico para conocer los complejos que pueden formarse con el cobre, hierro y el ácido acético.

En la segunda etapa se preparó el mineral de calcopirita, el cual fue maquinado y montado en tubos de teflón para obtener electrodos de disco rotatorio y llevar a cabo el estudio electroquímico. Es importante mencionar que la superficie del electrodo de calcopirita fue preparada adecuadamente y renovada para cada uno de los experimentos realizados. Para determinar las mejores condiciones energéticas para reducir la calcopirita en el ácido acético, se utilizó una celda electroquímica convencional de tres electrodos de 100 mL de capacidad, la cual estaba constituida por: el electrodo de trabajo de calcopirita con un área superficial de 30 mm^2; el electrodo de referencia de Ag/AgCl, el cual se sumergió en un capilar de Luggin que contiene una solución saturada de KCl y una punta de platino y finalmente una barra de grafito como contraelectrodo. Estos electrodos se conectaron al potenciostato. Las técnicas electroquímicas que se llevaron a cabo fueron: potencial de circuito abierto (OCP) para todas las concentraciones de ácido acético estudiadas (0.5 a 6 M) y voltametrías lineales partiendo del OCP aplicando diferentes potenciales catódicos (-0.8 y -2.2 V vs SHE) a temperatura ambiente y con una velocidad de barrido de 0.02 V/s. El OCP indica el potencial de reposo, éste fue el punto inicial al llevar a cabo las voltametrías lineales catódicas que permiten estudiar los procesos de reducción a diferentes potenciales.

En la tercera etapa mediante la técnica de Microscopia Electrónica de Barrido de Emisión de Campo (FESEM) se caracterizaron las superficies más relevantes de los electrodos de calcopirita sometidos a los experimentos de voltametría lineal, esto con el fin de realizar un análisis microestructural y con ayuda de Espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDS) poder conocer la composición química de los productos de reducción formados en la superficie de los electrodos en diferentes condiciones de potencial catódico. Es importante mencionar que la disolución de hierro es una medida la conversión de la calcopirita y por ello, mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica (AAS) se analizó la cantidad de Fe presente en las soluciones de los experimentos más relevantes con el fin de corroborar que la reducción de la calcopirita es posible al utilizar el ácido acético como medio lixiviante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio termodinámico

Los diagramas Pourbaix presentados en la figura 1a y 1b (se muestran las zonas de predominio de los diferentes especies sólidas y solubles de Cu y Fe, respectivamente para el sistema $CuFeS_2$-CH_3COO^-- H_2O. La construcción de los diagramas termodinámicos se llevó a cabo empleando el software Medusa.

En la figura 1a se observa que, la calcopirita puede ser reducida en este medio electrolítico a bornita (Cu_5FeS_4) y posteriormente a calcocita (Cu_2S) u otras especies similares ($Cu_{1.75}S$ o $Cu_{1.934}S$) y, en potenciales aún más catódicos puede llegar a cobre metálico (Cu^0).

En cuanto al hierro contenido en la calcopirita, la figura 1b revela que éste se libera como Fe^{2+}, lo que sugiere que

inicialmente el hierro contenido en la calcopirita se encuentra en un estado de oxidación +3, además puede formar complejos con el acetato $Fe(CH_3COO)^+$ (esto depende del pH de operación). Asimismo, si el potencial es muy reductor, al igual que el cobre, el hierro puede reducirse hasta su estado elemental (ver figura 1b). Con respecto al azufre proveniente de la calcopirita, se sabe que éste es liberado como ácido sulfhídrico (H_2S).

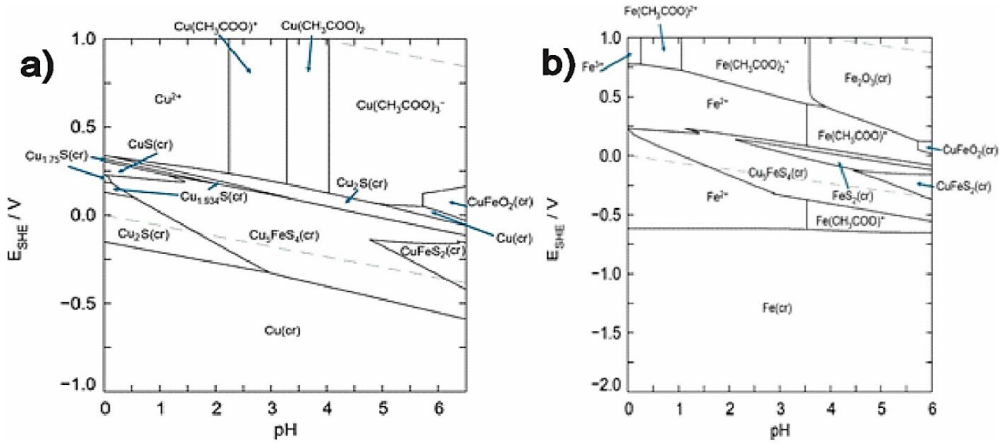


Figura 1. Diagrama de Pourbaix del sistema $CuFeS_2$-CH_3COO^-- H_2O que muestra las zonas de estabilidad de las especies de a) Cu y b) Fe a una temperatura de 25°C. Las concentraciones usadas para la construcción del diagrama fueron 0.1, 0.1 y 0.2*10^{-5} M de Cu, Fe y S respectivamente y 2 M de CH_3COO^-.

Composición del mineral

Una muestra del concentrado de calcopirita recolectado en Concepción del Oro, Zacatecas fue analizado químicamente mediante la técnica de difracción de rayos X. En la figura 2 se muestra el patrón de difracción de rayos X correspondiente a este mineral, en donde se puede apreciar la calcopirita ($CuFeS_2$) y otras fases secundarias presentes como lo son el SiO_2 (cuarzo) y el ZnS (esfalerita).

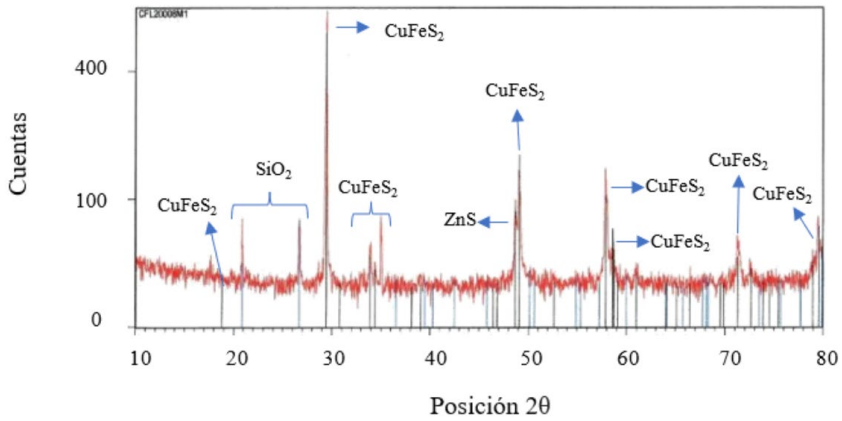


Figura 2. Patrón de difracción de rayos X del mineral concentrado de calcopirita obtenido en Concepción del Oro, Zacatecas.

Estudio electroquímico de la calcopirita en CH_3COOH

El mineral de calcopirita caracterizado en la sección anterior se usó como electrodo de trabajo. En esta sección se discuten los resultados referentes al estudio electroquímico realizado empleando una celda electrolítica de tres electrodos que contenía como electrodo de trabajo al mineral de calcopirita inmerso en distintas soluciones de ácido acético.

Efecto de la concentración de ácido acético en la reducción electro-asistida de la calcopirita

En primera instancia, se realizó la técnica de Potencial de Circuito Abierto (OCP) a temperatura ambiente y para cada concentración de ácido acético utilizada (0.5, 1, 2, 3, 4 y 6 M). El OCP en tiempos iniciales tiende a variar, pero después de 30 segundos (aproximadamente) alcanza un estado pseudo-estacionario. Este potencial se utilizó como inicio para todos los experimentos electroquímicos realizados. Es importante mencionar que el OCP depende en gran medida de la concentración de ácido acético utilizado y por ello, este es distinto al variar la concentración de la solución. A su vez, este parámetro puede variar al realizar esta técnica en otra superficie de calcopirita (en una misma concentración de ácido acético), aun cuando esta superficie sea de la misma roca. Lo mencionado anteriormente se debe a la heterogeneidad en cuanto a fases secundarias presentes (galena, esfalerita, cuarzo, etc.) y su cantidad. Esta es una característica que no se puede controlar en los minerales y por ello, para esta investigación se utilizaron electrodos de calcopirita que presentan valores de OCP similares.

Para evaluar el efecto de la concentración del ácido acético sobre la reducción de la calcopirita, se realizaron voltametrías lineales llevadas a cabo a partir del OCP hacia la dirección catódica (-0.8 y -2.2 V vs SHE), utilizando una velocidad de barrido de 0.02 V/s y variando la concentración de ácido acético en 0.5, 1, 2, 3, 4 y 6 M a temperatura ambiente.

En la tabla 1 se puede observar que, al llevar a cabo las voltametrías lineales partiendo del OCP hacia -0.8 V vs SHE, la corriente de reducción se favorece cuando la concentración de ácido aumenta de 0.5 hasta 4 M. Sin embargo, en términos de la capa de producto formada en la superficie de la calcopirita a este potencial, se puede observar en la figura 3 que al utilizar una solución de ácido acético 0.5 M no se logra distinguir algún cambio en la superficie, caso contrario al aumentar la concentración de ácido acético a 1, 2 y 3 M, en donde es posible observar tonalidades cada vez más intensas en algunas zonas del electrodo de calcopirita (figura 3 b, c y d). Es importante mencionar que estos cambios de color son característicos de la formación de bornita (Cu_5FeS_4); sin embargo, la caracterización de los productos de reacción se muestra en las secciones posteriores. Al utilizar una solución con 4 o 6 M, la superficie luce muy similar que al usar una solución 3 M. Adicionalmente, es interesante resaltar que, a este potencial, es posible encontrar zonas de calcopirita sin reaccionar, lo que revela que se requeriría más energía para poder reducir una cantidad mayor de calcopirita en el mismo intervalo de tiempo.

Tabla 1. Relación de la concentración de la solución de ácido acético con la densidad de corriente alcanzada para las voltametrías lineales realizadas a un potencial de -0.8 V vs SHE

Concentración (M)	Densidad de corriente $*10^{-5}$(A/mm^2)
0.5	-1.32
1	-1.76
2	-1.86
3	-1.93
4	-2.47
6	-2.23

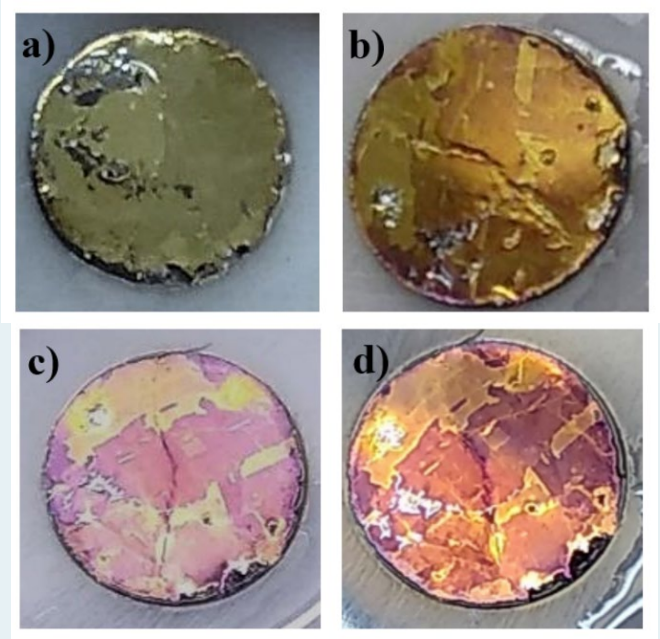
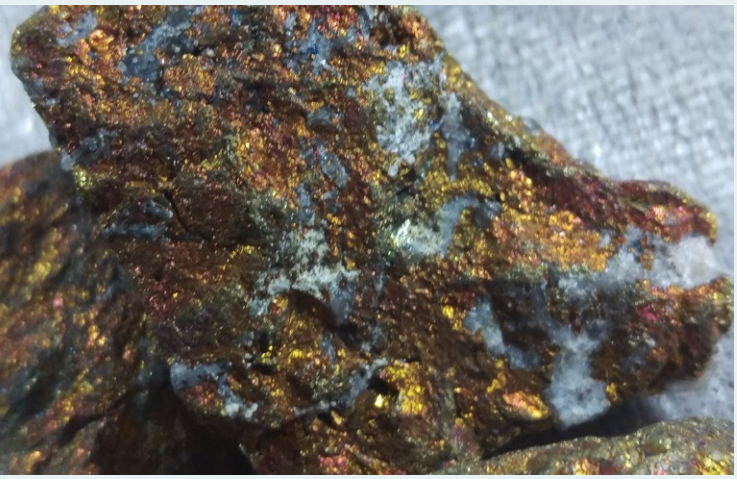


Figura 3. Comparación de la capa de producto formada durante la reducción de la calcopirita en las voltametrías lineales partiendo del OCP a -0.8 V vs SHE con diferente concentración de ácido acético a) 0.5 M, b) 1 M, c) 2 M y d)3 M

Con el propósito de observar si es posible electro-reducir aún más la calcopirita, se decidió intentar con un potencial más catódico i.e., -2.2 V vs SHE. En la tabla 2 se muestra la corriente alcanzada al llevar a cabo las voltametrías lineales partiendo del OCP hacia -2.2 V vs SHE con las diferentes concentraciones de ácido acético. De manera análoga al caso anterior, la corriente de reducción se favorece conforme se incrementa la concentración de ácido acético desde 0.5 hasta 4 M. Mientras que, a concentraciones mayores a 4 M, la corriente de reducción no presenta cambios significativos, lo cual coincide con el comportamiento mostrado con anterioridad al aplicar un potencial de -0.8 V vs SHE.



Desde el punto de vista cinético, es interesante resaltar que la densidad de corriente registrada en estos experimentos fue mayor a la obtenida a otros potenciales catódicos menores a -2 V vs SHE (ver tabla 2). Es importante recordar que entre más grande sea la corriente, implica que la reducción de la calcopirita es más rápida. A pesar de esto, en la figura 4 se puede observar que al llevar a cabo las polarizaciones al potencial catódico de -2.2 V vs SHE, con todas las concentraciones de ácido acético estudiadas (0.5-6 M) no se obtienen otras tonalidades diferentes en la superficie de la calcopirita, es decir la bornita continúa predominando como el producto principal de la reducción de la calcopirita.

Tabla 2. Relación de la concentración de la solución de ácido acético con la densidad de corriente alcanzada para las voltametrías lineales realizadas a un potencial de -2.2 V vs SHE.

Concentración (M)	Densidad de corriente $*10^{-5}$(A/mm^2)
0.5	-6.77
1	-8.22
2	-9.76
3	-10.00
4	-10.80
6	-9.42

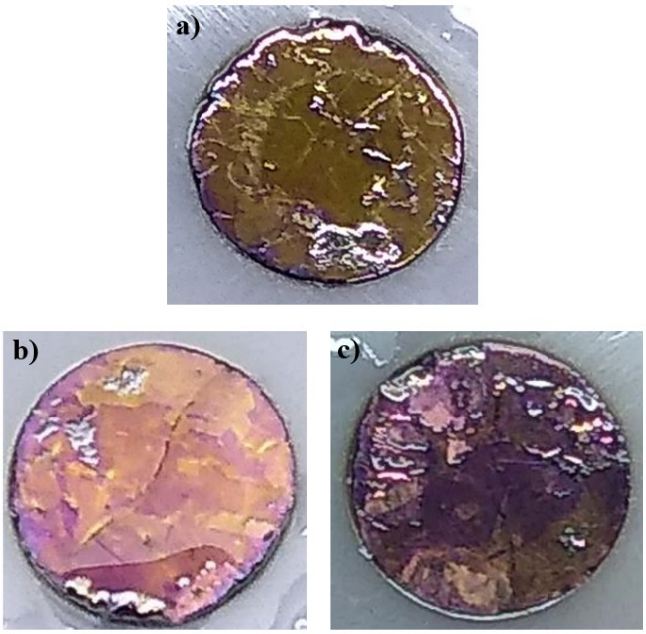


Figura 4. Comparación de la capa de producto formada durante la reducción de la calcopirita en las voltametrías lineales partiendo del OCP a -2.2 V vs SHE con diferente concentración de ácido acético a) 0.5 M, b) 1 M y c) 2 M.

Caracterización de la capa obtenida en la superficie de la calcopirita mediante Microscopía Electrónica de Barrido de Emisión de Campo

Es importante mencionar que hasta el momento la capa obtenida en la superficie de la calcopirita con la aplicación de los diferentes potenciales catódicos y diferentes concentraciones de ácido acético tiene principalmente tres tonalidades: azul, rosa y morado. Estos colores son característicos de la bornita, la cual, al igual que la calcopirita, está compuesta por Cu, Fe y S, la diferencia radica en la estequiometría distinta, la cual es Cu_5FeS_4.

En la figura 5 se observa la micrografía de la superficie del electrodo de calcopirita que fue obtenida al llevar a cabo una polarización catódica a -2.2 V vs SHE utilizando una solución 2 M de ácido acético.

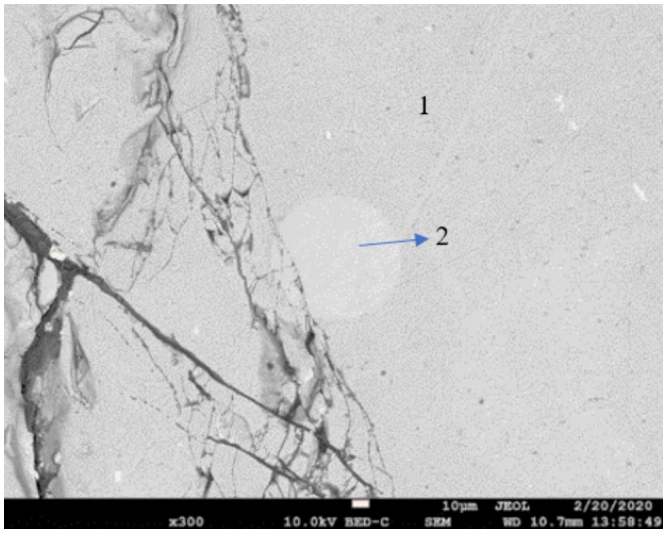


Figura 5. Micrografía a 300x tomada en FESEM del electrodo de calcopirita resultante al llevar a cabo una polarización catódica a -2.2 V vs SHE con una solución de ácido acético 3 M en donde se muestran dos zonas con diferente tonalidad.

La micrografía mostrada en la figura 5 fue tomada con electrones retrodispersados, por lo cual, las dos tonalidades mostradas pueden atribuirse a diferentes composiciones. La zona marcada con el número uno corresponde a la capa que se formó durante la polarización catódica, es decir, en donde están presentes las tonalidades rosas, moradas y azules, mientras que la zona 2 corresponde a una zona sin reaccionar de calcopirita.

De acuerdo con los EDS realizados en las zonas marcadas en la figura 5, ambas están compuestas por Cu, Fe y S. La principal diferencia radica en que la zona 2 tiene una mayor cantidad de hierro y azufre comparado con la zona 1 y por las tonalidades se infiere que la zona 1 corresponde a la bornita y la zona 2 a la calcopirita sin reaccionar.

Con base en la caracterización, se infiere que la reducción de la calcopirita a bornita involucra una disminución en la cantidad de Fe contenida en la estructura de la calcopirita (además mediante absorción atómica se comprobó que para una solución 2 M de ácido acético posterior a la polarización catódica a -2.2 V vs SHE se tiene la presencia de 0.032 mg/L) y en la cantidad de azufre, el cual podemos identificar por un ligero olor al H_2S al llevar a cabo la reducción.

Efecto de la variación del pH de la solución de ácido acético durante el proceso de reducción

Se evalúo el efecto del pH en una de las soluciones de ácido acético más eficientes (3 M) la cual tiene un pH natural de 2.3 y se utilizó hidróxido de sodio para subir el pH hasta 5.1. Se realizaron voltametrías lineales partiendo del OCP hacia la dirección catódica (-2.2 V vs SHE) utilizando una velocidad de barrido de 0.02 V/s y a temperatura ambiente. La densidad de corriente alcanzada al llevar a cabo la reducción electro-asistida de la calcopirita en la solución de ácido acético con pH de 5.10 fue de $1.5*10^{-3}$ A/$mm^{2,}$ lo cual es un incremento significativo a la solución de ácido acético con pH natural que alcanza una corriente de $1*10^{-4}$ A/mm^2. Si bien es cierto que con el aumento del pH se logra un aumento significativo en la corriente, la capa resultante que se forma en la superficie de la calcopirita corresponde a la bornita, la única diferencia es que los colores son más intensos y se obtiene mayor cantidad de tonalidades azuladas (figura 6) que las obtenidas con una solución 3 M con pH natural.

Figura 6. Capa formada en la superficie de la calcopirita durante la polarización catódica partiendo del OCP a - 2.2 V vs SHE con una solución de ácido acético 3 M con pH de 5.10.

CONCLUSIONES

El Potencial de Circuito Abierto (OCP) puede presentar variaciones al utilizar una misma concentración de ácido acético si se realiza en distinta superficie (aun si esta superficie pertenece a la misma roca) debido a la heterogeneidad de la superficie, así como a la cantidad y presencia

de fases secundarias en la matriz de la calcopirita la cual es una característica natural de los minerales.

Se comprobó mediante técnicas electroquímicas que la calcopirita reacciona al utilizar ácido acético como medio lixiviante; esto debido a los colores de la capa formada (rosa, azul y morado) al llevar a cabo las polarizaciones a diferentes potenciales catódicos y a su vez por los picos de reducción encontrados mediante la técnica de voltametría lineal. Estudios de caracterización por FESEM y EDS permiten inferir que la especie mineral que se forma es la bornita.

Al utilizar concentraciones bajas de ácido acético (0.5 M) se requiere de un potencial catódico mayor (~-2.2 V) para formar la bornita en comparación con el sistema 3 M en donde se requiere un potencial catódico menor. La concentración de ácido acético más eficiente corresponde a 2 o 3 M, en ambos sistemas se presentan las velocidades de reducción más altas obtenidas hasta el momento.

Al aumentar el pH de una solución de ácido acético 3 M de 2.3 a 5.1, la densidad de corriente aumenta significativamente, lo cual indica que la cinética de reducción se aumenta. Lo anterior revela que, al incrementar el pH se favorece la reducción de la calcopirita.

RECONOCIMIENTOS

Laura Denisse Jasso Recio agradece a CONACyT (México) por la beca de posgrado recibida, así mismo se reconoce la colaboración de Martha Rivas, Socorro García y Aldo Enríquez en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. C. Fuentes-Aceituno, G. T. Lapidus, and F. M. Doyle, "A kinetic study of the electro-assisted reduction of chalcopyrite," Hydrometallurgy, vol. 92, no. 1–2, pp. 26–33, May 2008. DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.02.002.

[2] W. G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, and A. K. Biswas, Extractive metallurgy of copper, Fourth Edition. 2002.

[3] F. Habashi and T. Toor, "Aqueous Oxidation of Chalcopyrite in Hydrochloric Acid," Metallurgical Transactions B, pp. 49–56, Mar. 1979. DOI: 10.1007/BF02653971.

[4] Antonijevic, M.M., Jankovic, Z.D. and Dimitrijevic, M.D., Kinetics of Chalcopyrite Dissolution by Hydrogen Peroxide in Sulphuric Acid. Hydrometallurgy, vol 71, pp. 329-334, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00082-3

[5] D. Dreisinger, "Copper leaching from primary sulfides: Options for biological and chemical extraction of copper," Hydrometallurgy, vol. 83, no. 1–4, pp. 10–20, Sep. 2006. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.03.032.

[6] A. R. Burkin, Solid-state transformations during leaching. Min Sci. Eng. 1. 1969.

[7] E. M. Córdoba, J. A. Muñoz, M. L. Blázquez, F. González, and A. Ballester, "Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects," Hydrometallurgy, vol. 93, no. 3–4, pp. 81–87, Aug. 2008. DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.04.015.

[8] V. J. Martínez-Gómez, J. C. Fuentes-Aceituno, R. Pérez-Garibay, and J. C. Lee, "A phenomenological study of the electro-assisted reductive leaching of chalcopyrite," Hydrometallurgy, vol. 164, pp. 54–63, Sep. 2016. DOI: 10.1016/j.hydromet.2016.05.008.

[9] V. J. Martínez-Gómez, J. C. Fuentes-Aceituno, R. Pérez-Garibay, and J. chun Lee, "A study of the electro-assisted reductive leaching of a chalcopyrite concentrate in HCl solutions. Part I: Kinetic behavior and nature of the chalcopyrite reduction," Hydrometallurgy, vol. 181, pp. 195–205, Nov. 2018. DOI: 10.1016/j.hydromet.2018.09.012.

[10] P. B. Munoz, J. D. Miller, and M. E. Wadsworth, "Reaction Mechanism for the Acid Ferric Sulfate Leaching of Chalcopyrite," Metallurgical Transactions B, pp. 149–158, 1979. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02652458.

[11] D. Dreisinger and N. Abed, "A fundamental study of the reductive leaching of chalcopyrite using metallic iron part I: kinetic analysis," Hydrometallurgy, pp. 37–57, 2002. DOI:10.1016/S0304-386X(02)00079-8.

[12] F. Doyle and G. Lapidus, "Reductive Leaching of Chalcopyrite by Aluminum," ECS Trans, vol. 2, no. 3, pp. 189–196, Apr. 2006. DOI: 10.1149/1.2196009.

Cómo citar este artículo:

Jasso Recio, L. D., Fuentes-Aceituno, J. C., & Pérez-Garibay, R. (2023). Análisis voltamperométrico de la descomposición reductiva de la calcopirita en el sistema ácido acético-agua. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.261

La miel de abejas sin aguijón: una medicina diferente

Honey from Stingless Bees: A Different Medicine

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

María Gabriela Guaita Gavilanes [1]
Macario Martinez Castillo [2]
Araceli Hernandez Zavala [3]

Recibido: 15 / 08 / 2022
Aceptado: 22 / 01 / 2023
Publicado: 08 / 02 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.242

Autor de Correspondencia:
Araceli Hernández Zavala
Correo : ahernandezza@ipn.mx

Resumen

Los principales polinizadores de la flora silvestre son las abejas sin aguijón y los productos del nido como el polen recolectado, el propóleo y principalmente la miel; estos han sido empleados en la dieta diaria y aún mejor en la medicina tradicional. Empleando palabras clave como: actividad antimicrobiana, antioxidante, antibacteriana y anticancerígena se realizó una búsqueda bibliográfica en libros y artículos de investigación de los buscadores científicos PubMed, World Wide Science, Google Scholar y Springer Link; para describir aspectos generales y ejemplos de los beneficios en la salud de la miel. Estudios in vitro e in vivo han demostrado una relación positiva entre las características fisicoquímicas y la composición fitoquímica de la miel con el efecto benéfico en el tratamiento de afecciones leves como cicatrización de heridas, hasta procesos complejos de inflamación, estrés oxidativo o infecciones microbianas. Así, la miel de abejas sin aguijón representa un producto con potencial terapéutico.

Palabras clave: abejas sin aguijón, Miel, Enfermedades.

Abstract

The main pollinators of the wild flora are stingless bees and nest products such as collected pollen, propolis and mainly honey; these have been used in the daily diet and even better in traditional medicine. Using keywords such as: antimicrobial, antioxidant, antibacterial and anticancer activity, a literature review was carried out in books and research articles from the scientific search engines PubMed, World Wide Science, Google Scholar and Springer Link to describe general aspects and examples of the benefits in the health of honey. In vitro and in vivo studies have shown a positive relationship between the physicochemical characteristics and the phytochemical composition of honey with the beneficial effect in the treatment of mild conditions such as wound healing, even complex inflammation processes, oxidative stress, or microbial infections. Thus, stingless bee honey represents a potentially therapeutic product.

Keywords: *stingless bees, Honey, Diseases.*

1 Ingeniera en biotecnología, Sección de Investigación y Posgrado, Escuela superior de medicina, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, gabyrusita2@gmail.com, Orcid: 0000-0002-4407-5616
2 Doctor en Biomedicina, Sección de Investigación y Posgrado, Escuela superior de medicina, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, macariomc12@gmail.com, Orcid: 0000-0002-8721-409X
3 Doctora en Toxicología, Sección de Investigación y Posgrado, Escuela superior de medicina, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, ahernandezza@ipn.mx, Orcid: 0000-0002-0848-2927

INTRODUCCIÓN

Las abejas sin aguijón son miembros de la Tribu *Meliponini* reconocidas como los principales polinizadores de la flora silvestre y de cultivos de relevancia económica. Los productos del nido como el polen recolectado, el propóleo y la miel han sido empleados con fines alimenticios, pero su principal utilidad es en la medicina tradicional, puesto que han demostrado los beneficios terapéuticos en diferentes afecciones a la salud. Hoy en día, las actividades biológicas de la miel de las abejas sin aguijón han evidenciado una relación benéfica en el tratamiento de enfermedades.

Desarrollo

¿QUÉ SON LAS ABEJAS SIN AGUIJÓN?

Las abejas sin aguijón, nativas o meliponas son insectos sociales que viven en colonias y en cada colonia existen "castas" que se definen como grupos de abejas con trabajos específicos; por ejemplo la abeja reina, las abejas obreras y los zánganos (abejas macho) [1], [2]. La característica que las hace únicas es la falta de un aguijón; para defenderse estas emplean otras estrategias que las hace diferentes al resto de las abejas [3].

Al igual que los abejorros (Tribu *Bombini*), las abejas de la orquídea (Tribu *Euglossini*) y las abejas melíferas (Tribu *Apini*), las abejas sin aguijón (Tribu *Meliponini*) son abejas corbiculadas; es decir, presentan una cesta o corbícula en la pata trasera que contiene el polen recolectado [4].

Hoy en día, las abejas sin aguijón se encuentran distribuidas en las zonas tropicales y neotropicales de los continentes de África, Asia y América, en este último se ha visto una distribución desde México hasta Argentina (Figura 1) [2].

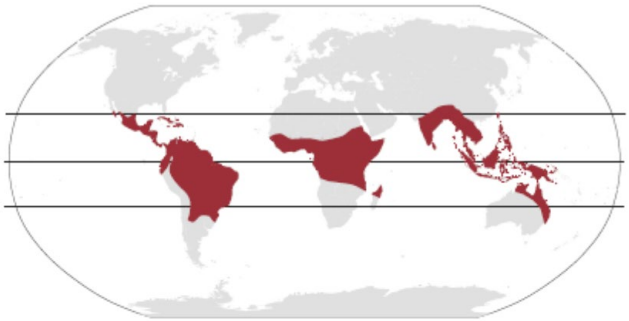


Figura 1. Zonas de distribución global de las abejas sin aguijón. Fuente: [2].

En el 2007, la Sociedad Brasilera de Entomología generó un catalogó que abarca cerca de 500 especies diferentes [5], considerando a la Tribu *Meliponini* como el grupo de abejas más grande. Solo a nivel de América Central y del Sur se han descrito más de 400 especies [6], [7], concentrando su diversidad en la cuenca del río Amazonas [1]. De hecho, se ha visto que su hábitat principalmente es de clima cálido [1].

¿CÓMO ES SU HOGAR?

Estos insectos viven en nidos peculiares ubicados en cualquier cavidad disponible, por ejemplo, en árboles, troncos, paredes de viviendas, cajas, recipientes huecos o a nivel subterráneo (figura 2) [2], [8], [9].

Figura 2. Diferentes nidos de las abejas sin aguijón. Fuente: [10], [11].

La arquitectura del nido difiere entre cada tipo de abeja, incluso entre la misma especie; por ejemplo, la entrada al nido puede presentar diferentes formas, como: estrella, trompeta, pico, tubo, entre otras (Figura 3) [12].

Figura 3. Características de los nidos de las abejas sin aguijón. Tipos de entradas (imagen superior), Interior del nido (imagen inferior). Fuente: [10], [11].

El interior del nido está compuesto por: unos potes conocidos también como ánforas que contienen miel y polen, una cámara de cría en forma de discos apilados rodeados de un involucro y finalmente un basurero, este lugar es en el cual depositan los desechos del nido [2].

¿DE QUÉ SE ALIMENTAN?

Las abejas consumen el polen y el néctar recolectado de la flora de su hábitat, al hacer este proceso llevan a cabo la polinización de la flora silvestre [4] y de cultivos de relevancia económica [13]–[15]. Para ello, las abejas seleccionan el alimento en función de su sabor, aroma, color [16], [17] o incluso por las necesidades nutricionales; pues se sabe que el polen es una fuente rica en proteínas y es almacenado en los potes como reserva de alimento [2], [3]. En cambio, el néctar tiene un elevado contenido de carbohidratos y su ingesta les proporciona energía [2].

LOS ENEMIGOS NATURALES

Desde la antigüedad casi nada se sabía sobre las plagas que afectaban a las abejas sin aguijón [18]. Eventualmente, comenzaron a describir ciertos insectos que atacan a los nidos de las abejas, por ejemplo, los fóridos que son moscas pequeñas que ingresan al nido y colocan sus huevos en los potes abiertos o en las celdas de cría [9], [19]. Otro enemigo

descrito es la abeja ladrona, abeja limón o *Lestrimelitta* sp., llamada así por el fuerte olor que emanan las abejas obreras al momento del ataque y la colonización del nido [9]. Pero no hace mucho, en el 2017 evidenciaron la presencia de un hongo microsporidio del género *Nosema* en las abejas sin aguijón [20], [21].

El comportamiento de las meliponas difiere frente a una amenza [8], aquellas abejas tímidas buscan un refugio rápidamente en el interior del nido [22], pero las abejas agresivas pueden lanzar secreciones ácidas glandulares y producir quemaduras en la piel [2] o incluso pueden dirigirse al cabello, orejas, ojos o boca y provocar mordeduras con sus fuertes mandíbulas [8].

¿CUÁLES SON LOS PRODUCTOS DEL NIDO DE LAS ABEJAS?

La crianza de las abejas sin aguijón conocida como Meliponicultura da productos como el cerumen, el propóleo, el polen y la miel [23], [24]. El propóleo es una mezcla de resinas vegetales, en cambio el cerumen además de resinas vegetales contiene cera [25], [26]. Estos productos tienen fines estructurales pues se emplean para la fabricación de los potes, para cubrir los orificios del nido y así mantener la temperatura y humedad estable [26].

LA MIEL DE LAS ABEJAS SIN AGUIJÓN

La miel es una sustancia dulce y es obtenida de la descomposición enzimática de los azúcares del néctar de las flores [2]. La miel de las abejas sin aguijón difiere de la miel de las abejas melíferas en las características fisicoquímicas, la composición nutricional y el método de cosecha tradicional de este producto (Figura 4) [24], [27]–[29].

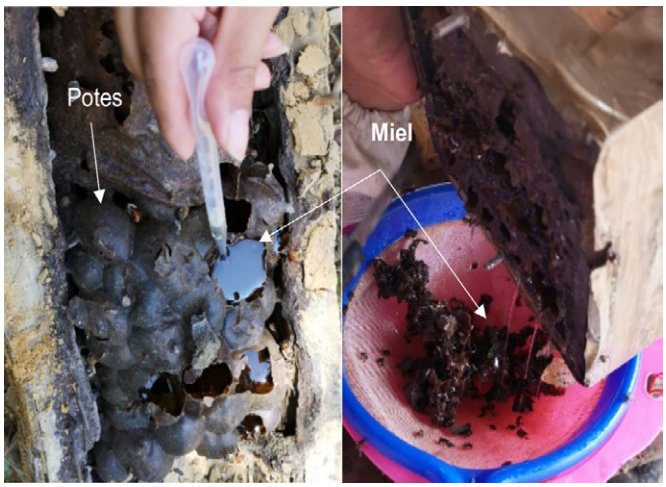


Figura 4. Cosecha artesanal de la miel de abejas sin aguijón. Fuente: [10], [11].

La caracterización fisicoquímica de la miel de las meliponas ha demostrado que este tipo de miel presenta una menor viscosidad, una mayor acidez, un color variado según el origen botánico del polen o néctar y sobre todo un sabor distinto [27], [30], [31]. Un factor importante es el porcentaje de humedad el cual determina la calidad de la miel [32]. En cambio, el pH bajo es un indicativo de la fermentación de los azúcares presentes y el color está relacionado con la cantidad de compuestos fenólicos [32].

Por otro lado, la composición nutricional de la miel de las meliponas está influenciada por la flora de la zona en donde habitan [29], [33]–[35]. En general, la miel presenta

una elevada cantidad de agua y azúcares de tipo monosacáridos como glucosa y fructosa, contiene alrededor de 200 compuestos que abarcan varios elementos traza, polifenoles como: ácidos fenólicos, flavonoides y tocoferoles, proteínas como glutatión y enzimas como superóxido dismutasa y catalasa [28], [31], [33], [36]–[38]. Además, la miel contiene ciertos minerales como: potasio, zinc, fosforo, calcio, manganeso, hierro, azufre y cobre, asímismo, entre las vitaminas presentes en la miel está la tiamina, riboflavina, niacina, ácido pantoténico y ácido ascóribico [24]. Cada componente de la miel le confiere diferentes propiedades nutricionales y medicinales; de hecho, la miel de las meliponas es cotizada en el mercado por su gama de beneficios en la salud [29]–[31], [38].

LOS BENEFICIOS DE LA MIEL EN LA SALUD

La miel de las abejas sin aguijón se ha empleado de manera tradicional en el alivio de diferentes afecciones [2], [39], [40]. En épocas antiguas, la miel se usaba para tratar problemas respiratorios, digestivos, musculares, procesos febriles, quemaduras, así como picaduras [41]–[45]. Con el tiempo, mediante estudios preclínicos han demostrado que la miel puede contrarrestar procesos de estrés oxidativo y mejorar problemas de diabetes, hipertensión y enfermedades neurodegenerativas [40], [46], [47]. Incluso, a nivel *in vitro* han evidenciado un efecto antiproliferativo de la miel en líneas celulares derivadas de diferentes tipos de cáncer [48], [49]. El efecto benéfico de la miel en las varias enfermedades se ha relacionado con sus actividades biológicas, entre ellas una actividad antiinflamatoria, antioxidante y antimicrobiana [30], [31], [37], [38], [50], [51].

Actividad antiinflamatoria

La inflamación es un mecanismo biológico de defensa y se define como la respuesta del sistema inmune desencadenada por varios factores, entre ellos un daño o lesión tisular, la presencia de patógenos o la exposición a compuestos tóxicos [52], [53]. Las células producen agentes que contrarestan un proceso inflamatorio, de esta manera se observa que un área afectada al estar enrojecida, hinchada, caliente, con dolor o incluso laserada se va recuperando con el tiempo [52].

A nivel *in vitro*, estudios con modelos celulares han demostrado que la miel de las abejas sin aguijón interfiere en un proceso inflamatorio; por ejemplo, al exponer un modelo celular de macrófagos de ratón a diferentes concentraciones de miel por 24 horas observaron dos efectos: una disminución en la producción celular de agentes pro-inflamatorios y un incremento de agentes antiinflamatorios. Estos resultados en conjunto apoyan el papel benéfico de la miel en la inflamación [54]. De la misma forma, han evidenciado que en células especializadas en la reparación de tejidos y cicatrización de heridas, la miel influye en la recuperación de sus funciones biológicas que fueron afectadas por un proceso inflamatorio, este caso se ha visto en cultivos celulares de monocitos humanos cultivados con miel durante 24 horas [41]. Así mismo, en fibroblastos humanos cultivados con bajas concentraciones de miel durante 24 y 72 horas lo que resultó en una mayor viabilidad de las células, estos hallazgos sugieren que mediante la disminución de la inflamación mejora el proceso de cicatrización [55], [56].

En el mismo tenor, a nivel *in vivo* empleando modelos animales con diferentes lesiones evidenciaron un efecto antiinflamatorio al exponerlos a la miel de las abejas sin aguijón, por ejemplo, en un grupo de conejos con una lesión ocular les aplicaron tópicamente una gota de miel estéril en los ojos cuatro veces al día por una semana y junto a la administración oral de 1 g/kg/día observaron que la inflamación ocular disminuyó [57]. En un modelo de rata con problema de cataratas demostraron con la administración tópica de gotas de miel estéril en los ojos por dos semanas se atenuó ligeramente la progresión de las cataratas [58]. De manera similar, en un grupo de cobayos con conjuntivitis bacteriana realizaron la aplicación de una gota de miel estéril en los ojos cada 12 horas durante dos semanas y observaron que los signos de inflamación ocular se redujeron [59]. Además, en un modelo de ratón con edema de oreja realizaron la aplicación tópica de un extracto a base 1 mg de miel en la oreja inflamada y evidenciaron la reducción del tamaño del edema [60].

Por otro lado, la progresión de un proceso inflamatorio es apoyado por la elevada producción de metabolitos de oxígeno químicamente reactivos conocidos como especies reactivas de oxígeno (ROS del inglés *Reactive Oxygen Species*) [61], [62]. Dentro de los componentes de la miel de las abejas sin aguijón se han descrito varios agentes antiinflamatorios de origen vegetal, los polifenoles como el ácido *p*-cumárico, ácido cafeico y ácido salicílico disminuyen la producción de ROS y con ello la inflamación celular [32], [60]. Por último, algo interesante del efecto antiinflamatorio de la miel es su complementariedad con el resto de actividades biológicas descritas.

Actividad antioxidante

El estrés oxidativo es un proceso causado por el incremento de ROS en las células, el resultado son daños a biomoléculas interfiriendo con funciones biológicas [63]. La célula contrarresta a las ROS con ayuda de las moléculas antioxidantes [50], [64], [65], la capacidad de neutralización de los antioxidantes radica en su estructura; es decir, la presencia del anillo aromático les confiere la habilidad de deslocalización y estabilización de un electrón [66]. Los antioxidantes de origen natural más conocidos son: vitaminas, carotenonides, flavonoides y ácidos fenólicos. Estos compuestos están presentes en una gran variedad de plantas, incluso en productos como la miel, de hecho varios estudios han demostrado una relación entre la cantidad de moléculas antioxidantes y la capacidad antioxidante de la miel [30], [31], [46], [51], [64], [66]–[68].

Por ejemplo, dentro de la composición de la miel de *Melipona* han encontrado: ácido gálico, ácido vainílico, quercetina, ácidos *o* y *p* cumárico [69]. En cambio, en la miel de *Trigona* han observado: epicatequina, catequina, ácido protocatequico, ácido clorogénico, ácido *p*-cumárico y rutina [70]. En otro estudio, evaluaron en las mieles de 9 especies diferentes de abejas sin aguijón y hallaron alrededor de 26 fitoquímicos; entre ellos, compuestos fenólicos, algunos flavonoides como: la naringina y taxifolina, ácido mandélico, ácido caféico y vainillina [71]. En conjunto, todos los fitoquímicos descritos por diferentes métodos han demostrado ser responsables de la capacidad antioxidante de la miel según la especie [30].

Un estudio en células inmortalizadas evaluó la capacidad antioxidante de la miel, con la exposición de 50 µL de miel de *Trigona* durante 24 horas; encontraron un incremento en la viabilidad celular, este resultado proporcionó información de una relación existente del contenido de fenoles y flavonoides con la capacidad antioxidante [72].

En cambio, en un modelo de rata con diabetes evaluaron el papel preventivo de la miel en un daño testicular; luego de la administración por sonda de 2 g de miel al día por kg de peso del animal durante cuatro semanas, se encontró que el nivel de enzimas antioxidantes incrementó y diminuyó el nivel de moléculas oxidantes, esto mejoró la calidad del esperma del animal favorecido por un proceso oxidativo contrarrestado [73]. Así mismo, en un modelo de rata con diabetes analizaron un efecto protector de la miel en un daño pancreático, durante cuatro semanas se alimentaron con 1 y 2 g de miel por kg de peso de la rata al día; como respuesta observaron que el nivel de expresión de moléculas oxidativas e inflamatorias disminuyó y mejoraron los parámetros metabólicos. Lo anterior, sugirió que la miel contrarresta el daño del páncreas y favorece la producción de insulina en una condición de diabetes mejorando la calidad de vida del animal [74].

Por otro lado, han investigado el efecto de la miel en ratas con problemas metabólicos, luego de la suplementación del alimento con miel durante 16 semanas observaron un comportamiento con menos ansiedad y mayor retención de memoria; en otras palabras, la miel estaría apoyando un mejor rendimiendo congnitivo al reducir el estrés oxidativo por su contenido de compuestos antioxidantes [75]. En cambio, en un modelo de rata con dislipidemia o niveles elevados de lípidos evaluaron el efecto de la miel, el alimento de los animales fue suplementado con 1 g de miel por kg de peso durante 5 semanas y evidenciaron una disminución de lípidos en sangre e incremento de marcadores antioxidantes, estos hechos favorecieron a la protección de órganos como el cólon e higado; quienes están implicados en el metabolismo de los lípidos [76].

Además, han relacionado el papel inmunomodulador con la capacidad antioxidante de la miel en un modelo de rata con desnutrición. Para ello, administraron por vía oral 1.8 g de miel al día por kg de peso del animal durante 7 semanas y observaron un incremento en la producción de células del sistema inmune, una disminución de marcadores pro-inflamatorios y una elevada capacidad antioxidante de la miel, sugieriendo estos hallazgos un papel benéfico de la miel en animales con defensas inmunitarias bajas [77].

Con todos estos antecedentes descritos, la clase de compuesto antioxidante y su concentración presente en la miel son un factor clave para la capacidad antioxidante de este producto [40], [56], [66], [68], [72], [73].

Actividad antimicrobiana

Con el tiempo, la poca o nula respuesta de los patógenos a los antimicrobianos comerciales han creado la necesidad de buscar productos de origen natural con capacidad antimicrobiana; se propone como un excelente candidato a la miel [43].

La actividad antimicrobiana de la miel podría estar mediada por varios aspectos, entre ellos por un efecto combinado de los componentes orgánicos e inorgánicos derivados del néctar de las flores [78]. También, por características fisicoquímicas propias de la miel como: una mayor ácidez y osmolaridad [31], [40]. Otro factor que apoya esta actividad es la presencia de peróxido de hidrógeno; el cual es un producto de la descomposición enzimática del néctar [79].

Estudios a nivel *in vitro* han demostrado que la miel de diferentes especies de abejas sin aguijón puede ejercer un efecto antimicrobiano, por ejemplo, un estudio demostró el efecto de la miel de las abejas sin aguijón en el crecimiento de bacterias y hongos. Tras la exposición a diferentes concentraciones de miel por 12 y 24 horas observaron la inhibición del crecimiento de bacterias gram positivas como: *Staphylococcus aureus*, gram negativas como: *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli* y el hongo *Candida albicans* [80], [81]. De igual modo, han observado un efecto inhibitorio de la miel frente a bacterias gram positivas, después de 24 horas de cultivo, la miel inhibió el crecimiento de *B. subtilis, B. megaterium, B. brevis* y *Micrococcus luteus* [82], así también de *Staphylococcus aureus* y *Klebsiella pneumoniae* [83].

Actividad anticancerígena

El cáncer es un grupo de enfermedades que afectan a la población mundial sin distinción de edad, raza o género. Los tratamientos convencionales como quimioterapia y radioterapia tienen un éxito limitado pero la mayor preocupación son los efectos secundarios en el paciente; por ello se han investigado productos de origen natural como posibles candidatos para el tratamiento del cáncer [84].

La miel de abejas sin aguijón ha demostrado un efecto celular antiproliferativo en diferentes tipos de cáncer; por ejemplo, en estudios *in vitro* evaluaron el efecto de la miel en la viabilidad de líneas celulares derivadas de cáncer de pulmón e hígado, carcinoma gástrico y adenocarcinoma de cólon. Después de 48 horas de exposición a la miel observaron una inhibición del crecimiento de las células tumorales; apoyando el papel anticancerígeno de la miel [85]. También, en una línea celular derivada de cáncer de mama [86], cáncer cervical [87], adenocarcinoma cervical [88], glioblastoma [89] observaron un efecto antiproliferativo de la miel, puesto que luego de 24 a 72 horas de incubación con la miel disminuyó el número de células cancerosas.

Además, en un modelo animal de rata con cáncer de colon han demostrado el efecto quimiopreventor de la miel, a las ratas le administraron por vía oral 1.1 g de miel por kg de peso durante 2 meses y encontraron que la miel interfirió en la progresión del cáncer, puesto que los daños en el epitelio intestinal disminuyeron [90].

PROBLEMÁTICA ACTUAL

Finalmente, estudios indican un declive de la población de polinizadores como las abejas melíferas [91], los abejorros [92] y las abejas sin aguijón [93]. Los procesos de degradación ambiental provocan no solo una vulnerabilidad de las poblaciones de abejas, sino de la biodiversidad en general [92], [94], [95]. La pérdida de bosques, es una de las mayores amenazas para las abejas sin aguijón, pues sus nidos se encuentran en las cavidades de troncos de árboles [94]. La introducción de especies invasoras como la abeja melífera es otra amenaza, debido a la competencia por los recursos e introducción de patógenos [4]. También, la exposición a químicos incrementa la vulnerabilidad del grupo de abejas a la infección de patógenos [96], [97].

CONCLUSIÓN

Las abejas sin aguijón son reconocidos polinizadores y el consumo de su miel beneficia a la salud humana, sin dejar de lado el excelente componente nutricional. Varios estudios han demostrado que la miel de las abejas sin aguijón es distinta a otras mieles, por la composición fitoquímica, las características fisicoquímicas e incluso la región geográfica en donde habitan. Estos factores influyen en las actividades biológicas ejercidas por la miel, entre ellas: antiinflamatoria, antioxidante, antimicrobiana y anticancerígena, cada una de estas actividades ejerce un papel positivo contra diferentes afecciones en la salud. Tanto que la miel se está convirtiendo en un posible candidato para su evaluación y futuro empleo en el tratamiento de diferentes enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. R. Ramírez, J. C. Nieh, T. B. Quental, D. W. Roubik, V. L. Imperatriz-Fonseca, and N. E. Pierce, "A molecular phylogeny of the stingless bee genus Melipona (Hymenoptera: Apidae)," Molecular Phylogenetics and Evolution, vol. 56, no. 2, pp. 519–525, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.YMPEV.2010.04.026.

[2] N. Arnold, R. Zepeda, M. A. Vásquez, and E. M. Aldasoro, Las abejas sin aguijón y su cultivo en Oaxaca, México: con catálogo de especies, 1st ed., vol. 1. San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México: ECOSUR, CONABIO, Rémy Benoit Marie Vandame, 2018.

[3] A. C. INANA, "Abejas Nativas | Inana A.C.," 2020. https://www.inana-ac.org/abejas-nativas

[4] M. Hurtado-Burillo, P. de la Rúa Tarín, and C. Ruíz, "Caracterización molecular y morfométrica del género scaptotrigona (apidae: meliponini) en mesoamérica," Universidad de Murcia, Murcia, 2015.

[5] K. Hartfelder, "Catalogue of the bees (Hymenoptera, Apoidea) in the Neotropical Region," Apidologie, vol. 39, no. 4, pp. 387–387, Jul. 2008, doi: 10.1051/APIDO:2008033.

[6] K. Amano, T. Nemoto, and T. A. Heard, "What are Stingless Bees, and Why and How to Use Them as Crop Pollinators? —a Review –," Japan Agriculture Research Quartly, vol. 34, no. 3, pp. 183–190, 2000.

[7] D. C. Fernández, G. Zambrano, and V. Gonzalez, "Comportamiento de nidificación, notas taxonómicas y distribución potencial de Paratrigona eutaeniata (Hymenoptera: Apidae, Meliponini)," Revista Colombiana de Entomología, vol. 36, no. 2, 2010, Available: https://journaldatabase.info/articles/comportamiento_nidificacion_notas.html

[8] D. W. Roubik, "Stingless bee nesting biology," Apidologie, vol. 37, no. 2, pp. 124–143, 2006.

[9] L. Baquero and G. Stamatti, Cría y Manejo de Abejas sin Aguijón. Tucumán, Argentina: Ediciones Del Subtrópico, ProYungas, 2007.

[10] M. G. Guaita-Gavilanes, S. Martin-Solano, and J. W. Ron Román, "Determinación de la presencia y caracterización molecular de Nosema sp. mediante PCR dúplex en abejas sin aguijón (Hymenoptera: Meliponini) de las provincias de Orellana y Loja – Ecuador," ESPE, Sangolquí, 2019. Accessed: Available: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/21219

[11] P. L. Ruiz-Calderón, A. Koch, and J. W. Ron-Román, "Caracterización fisicoquímica y microbiológica de miel de la tribu Meliponini en la provincia de Orellana-Ecuador," ESPE, Sangolquí, 2019. Accessed: Available: http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/20824

[12] P. Franck, E. Cameron, G. Good, J. Y. Rasplus, and B. P. Oldroyd, "Nest architecture and genetic differentiation in a species complex of Australian stingless bees," Molecular Ecology, vol. 13, no. 8, pp. 2317–2331, Aug. 2004, doi: 10.1111/J.1365-294X.2004.02236.X.

[13] T. A. Heard, "The role of stingless bees in crop pollination," Annual Review Entomology, vol. 44, pp. 183–206, Nov. 2003, doi: 10.1146/ANNUREV.ENTO.44.1.183.

[14] B. J. Brosi, "The complex responses of social stingless bees (Apidae: Meliponini) to tropical deforestation," For Ecology Manage, vol. 258, no. 9, pp. 1830–1837, Oct. 2009, doi: 10.1016/J.FORECO.2009.02.025.

[15] G. A. Asiko, "Pollination of strawberry in Kenya, by stingless bees (Hymenoptera: meliponini) and honey bee (hymenoptera: apini) for improved fruit quality," University of Nairobi, Netherlands, 2012. Available: http://erepository.uonbi.ac.ke/handle/11295/6859

[16] A. G. Dyer et al., "Innate colour preferences of the Australian native stingless bee Tetragonula carbonaria Sm.," Journal of Comparative Physiology A 2016 202:9, vol. 202, no. 9, pp. 603–613, Jun. 2016, doi: 10.1007/S00359-016-1101-4.

[17] T. Eltz, "Tracing Pollinator Footprints on Natural Flowers," Journal of Chemical Ecology 2006 32:5, vol. 32, no. 5, pp. 907–915, May 2006, doi: 10.1007/S10886-006-9055-6.

[18] H. F. Schwarz, "Stingless Bees (Meliponidae) of the Western Hemisphere. Lestrimelitta and the Following Subgenera of Trigona, Paratrigona, Swarziana, Parapartamona, Cephalotrigona, Oxytrigona, Scaura, and Mourella. Abejas Jicotes (Meliponidae) Del Hemisferio Occidental.," Bulletin of the American Museum of Natural History, vol. 90, pp. 1–536, 1948.

[19] Paulo. Nogueira Neto, Vida e criação de abelhas indígenas sem ferrão. Republica Federativa do Brasil: Edição Nogueirapis, 1997.

[20] M. P. Porrini et al., "Nosema ceranae in South American Native Stingless Bees and Social Wasp," Microbiology Ecology, vol. 74, no. 4, pp. 761–764, Nov. 2017, doi: 10.1007/S00248-017-0975-1.

[21] J. O. Macías-Macías et al., "Nosema ceranae causes cellular immunosuppression and interacts with thiamethoxam to increase mortality in the stingless bee Melipona colimana," Scientific Reports 2020 10:1, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, Oct. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-74209-3.

[22] D. W. Roubik and F. J. Peralta, "Thermodynamics in nests of two Melipona species in Brasil," Acta Amazonic, vol. 13, no. 2, pp. 453–466, Apr. 1983.

[23] A. Syafrizal, D. Sila, and M. Bratawinata, "Diversity of kelulut bee (Trigona spp.) in Lempake education forest," Mulawarman Scientifie, vol. 11, 2012,. Available: https://www.researchgate.net/publication/285320739

[24] P. V. Rao, K. T. Krishnan, N. Salleh, and S. H. Gan, "Biological and therapeutic effects of honey produced by honey bees and stingless bees: a comparative review," Revista Brasileira de Farmacognosia, vol. 26, no. 5, pp. 657–664, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.BJP.2016.01.012.

[25] M. L. F. Bittencourt, P. R. Ribeiro, R. L. P. Franco, H. W. M. Hilhorst, R. D. de Castro, and L. G. Fernandez, "Metabolite profiling, antioxidant and antibacterial activities of Brazilian propolis: Use of correlation and multivariate analyses to identify potential bioactive compounds," Food Research International, vol. 76, pp. 449–457, Oct. 2015, doi: 10.1016/J.FOODRES.2015.07.008.

[26] F. C. Lavinas et al., "Brazilian stingless bee propolis and geopropolis: promising sources of biologically active compounds," Revista Brasileira de Farmacognosia, vol. 29, no. 3, pp. 389–399, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.BJP.2018.11.007.

[27]A. Gela, Z. A. Hora, D. Kebebe, and A. Gebresilassie, "Physico-chemical characteristics of honey produced by stingless bees (Meliponula beccarii) from West Showa zone of Oromia Region, Ethiopia," Heliyon, vol. 7, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.HELIYON.2020.E05875.
[28]M. Pellerano, R. Marchevsky, E. Camiña, de la Pampa Av Uruguay, and S. Rosa La Pampa Argentina, "Quality of honey from Argentina: Study of chemical compositttion and trace elements," The Journal of the Argentine Chemical Society, vol. 96, no. 2, pp. 33–41, 2008.
[29]J. M. B. de Sousa et al., "Sugar profile, physicochemical and sensory aspects of monofloral honeys produced by different stingless bee species in Brazilian semi-arid region," LWT - Food Science and Technology, vol. 65, pp. 645–651, 2016, doi: 10.1016/J.LWT.2015.08.058.
[30]T. M. S. Silva et al., "Phenolic compounds, melissopalynological, physicochemical analysis and antioxidant activity of jandaíra (Melipona subnitida) honey," Journal of Food Composition and Analysis, vol. 29, no. 1, pp. 10–18, Feb. 2013, doi: 10.1016/J.JFCA.2012.08.010.
[31]M. Jimenez, C. I. Beristain, E. Azuara, M. R. Mendoza, and L. A. Pascual, "Physicochemical and antioxidant properties of honey from Scaptotrigona mexicana bee," Journal Apiculture Research, vol. 55, no. 2, pp. 151–160, Sep. 2016, doi: 10.1080/00218839.2016.1205294.
[32]N. E. F. Esa et al., "A Review on Recent Progress of Stingless Bee Honey and Its Hydrogel-Based Compound for Wound Care Management," Molecules, vol. 27, no. 10, May 2022, doi: 10.3390/MOLECULES27103080.
[33]A. Shugaba, "Analysis of Biochemical Composition of Honey Samples from North-East Nigeria," Biochemistry & Analytical Biochemistry, vol. 2, no. 3, 2012, doi: 10.4172/2161-1009.1000139.
[34]A. C. V. da Costa, J. M. B. Sousa, M. A. A. P. da Silva, D. dos S. Garruti, and M. S. Madruga, "Sensory and volatile profiles of monofloral honeys produced by native stingless bees of the brazilian semiarid region," Food Research International, vol. 105, pp. 110–120, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.FOODRES.2017.10.043.
[35]Z. Can, O. Yildiz, H. Sahin, E. Akyuz Turumtay, S. Silici, and S. Kolayli, "An investigation of Turkish honeys: Their physico-chemical properties, antioxidant capacities and phenolic profiles," Food Chemistry, vol. 180, pp. 133–141, Aug. 2015, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2015.02.024.
[36]K. Ramanauskiene, A. Stelmakiene, V. Briedis, L. Ivanauskas, and V. Jakštas, "The quantitative analysis of biologically active compounds in Lithuanian honey," Food Chemistry, vol. 132, no. 3, pp. 1544–1548, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2011.12.007.
[37]Y. Cardona, A. Torres, and W. Hoffmann, "Colombian stingless bee honeys characterized by multivariate analysis of physicochemical properties," Apidologie, vol. 50, no. 6, pp. 881–892, Dec. 2019, doi: 10.1007/S13592-019-00698-5/FIGURES/1.
[38]F. C. Biluca et al., "Phenolic compounds, antioxidant capacity and bioaccessibility of minerals of stingless bee honey (Meliponinae)," Journal of Food Composition and Analysis, vol. 63, pp. 89–97, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JFCA.2017.07.039.
[39]S. Shamsudin, J. Selamat, M. Abdul Shomad, M. F. Ab Aziz, and M. J. Haque Akanda, "Antioxidant Properties and Characterization of Heterotrigona itama Honey from Various Botanical Origins according to Their Polyphenol Compounds," Journal Food Quality, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/2893401.
[40]A. Zumla and A. Lulat, "Honey--a remedy rediscovered.," Journal of the Royal Society of Medicine, vol. 82, no. 7, p. 384, 1989, doi: 10.1177/014107688908200704.
[41]A. J. Tonks, R. A. Cooper, K. P. Jones, S. Blair, J. Parton, and A. Tonks, "Honey stimulates inflammatory cytokine production from monocytes," Cytokine, vol. 21, no. 5, pp. 242–247, Mar. 2003, doi: 10.1016/S1043-4666(03)00092-9.
[42]B. Medhi, A. Puri, S. Upadhyay, and L. Kaman, "Topical Application of Honey in The Treatment of Wound Healing: A Metaanalysis," JK SCIENCE, vol. 10, no. 4, pp. 166–169, 2008.
[43]N. S. Al-Waili, K. Salom, and A. A. Al-Ghamdi, "Honey for Wound Healing, Ulcers, and Burns; Data Supporting Its Use in Clinical Practice," The Scientific World Journal, vol. 11, p. 766, Apr. 2011, doi: 10.1100/TSW.2011.78.
[44]M. Yaacob, N. F. Rajab, S. Shahar, and R. Sharif, "Stingless bee honey and its potential value: A systematic review," Food Research, vol. 2, no. 2, pp. 124–133, Apr. 2018, doi: 10.26656/FR.2017.2(2).212.
[45]G. R. O. Rosales, "Medicinal uses of melipona beecheii honey, by the ancient maya," in Pot-Honey: A Legacy of Stingless Bees, vol. 9781461449607, P. Vit, S. Pedro, and D. Roubik, Eds. New York: Springer New York, 2013, pp. 229–240. doi: 10.1007/978-1-4614-4960-7_15/COVER.
[46]O. O. Erejuwa, S. A. Sulaiman, and M. S. Ab Wahab, "Honey: A Novel Antioxidant," Molecules, vol. 17, no. 4, p. 4400, Apr. 2012, doi: 10.3390/MOLECULES17044400.
[47]I. E. Haffejee and A. Moosa, "Honey in the treatment of infantile gastroenteritis," British Medical Journal (Clinical research ed), vol. 290, no. 6485, p. 1866, Jun. 1985, doi: 10.1136/BMJ.290.6485.1866.
[48]S. Samarghandian, J. T. Afshari, and S. Davoodi, "Chrysin reduces proliferation and induces apoptosis in the human prostate cancer cell line pc-3," Clinics, vol. 66, no. 6, pp. 1073–1079, Jun. 2011, doi: 10.1590/S1807-59322011000600026.
[49]A. A. Ghashm, N. H. Othman, M. N. Khattak, N. M. Ismail, and R. Saini, "Antiproliferative effect of Tualang honey on oral squamous cell carcinoma and osteosarcoma cell lines," BMC Complementary Alternative Medicine, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, Sep. 2010, doi: 10.1186/1472-6882-10-49/FIGURES/5.
[50]O. O. Erejuwa, S. A. Sulaiman, and M. S. Ab Wahab, "Honey: A Novel Antioxidant," Molecules 2012, Vol. 17, Pages 4400-4423, vol. 17, no. 4, pp. 4400–4423, Apr. 2012, doi: 10.3390/MOLECULES17044400.
[51]T. C. Pimentel et al., "Stingless bee honey: An overview of health benefits and main market challenges," Journal Food Biochemistry, vol. 46, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.1111/JFBC.13883.
[52]L. Chen et al., "Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs," Oncotarget, vol. 9, no. 6, p. 7204, Jan. 2018, doi: 10.18632/ONCOTARGET.23208.
[53]J. M. Bennett, G. Reeves, G. E. Billman, and J. P. Sturmberg, "Inflammation-nature's way to efficiently respond to all types of challenges: Implications for understanding and managing 'the epidemic' of chronic diseases," Frontiers in medicine, vol. 5, no. NOV, p. 316, 2018, doi: 10.3389/FMED.2018.00316/BIBTEX.
[54]F. C. Biluca et al., "Investigation of phenolic compounds, antioxidant and anti-inflammatory activities in stingless bee honey (Meliponinae)," Food Research International, vol. 129, p. 108756, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.FOODRES.2019.108756.
[55]N. Abdul Malik, M. Mohamed, M. Z. Mustafa, and A. Zainuddin, "In vitro modulation of extracellular matrix genes by stingless bee honey in cellular aging of human dermal fibroblast cells," Journal Food Biochemistry, vol. 44, no. 1, p. e13098, Jan. 2020, doi: 10.1111/JFBC.13098.
[56]A. Nordin et al., "Low dose stingless bee honey increases viability of human dermal fibroblasts that could potentially promote wound healing," Wound Medicine, vol. 23, pp. 22–27, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.WNDM.2018.09.005.
[57]K. Bashkaran, E. Zunaina, S. Bakiah, S. A. Sulaiman, K. Sirajudeen, and V. Naik, "Anti-inflammatory and antioxidant effects of Tualang honey in alkali injury on the eyes of

rabbits: experimental animal study.," BMC Complementary Alternative Medicine, vol. 11, no. 1, p. 90, Oct. 2011, doi: 10.1186/1472-6882-11-90/COMMENTS.
[58]P. Vit, "Effect of Stingless bee honey in selenite induced cataracts," Apiacta, vol. 3, 2002.
[59]A. A. Ilechie, P. K. Kwapong, E. Mate-Kole, S. Kyei, and C. Darko-Takyi, "The efficacy of stingless bee honey for the treatment of bacteria-induced conjunctivitis in guinea pigs," Journal Experimental Pharmacology, vol. 4, p. 63, May 2012, doi: 10.2147/JEP.S28415.
[60]D. M. Borsato et al., "Topical anti-inflammatory activity of a monofloral honey of Mimosa scabrella provided by Melipona marginata during winter in southern Brazil," Journal Medicnie Food, vol. 17, no. 7, pp. 817–825, Jul. 2014, doi: 10.1089/JMF.2013.0024.
[61]M. Mittal, M. R. Siddiqui, K. Tran, S. P. Reddy, and A. B. Malik, "Reactive Oxygen Species in Inflammation and Tissue Injury," Antioxid Redox Signal, vol. 20, no. 7, p. 1126, Mar. 2014, doi: 10.1089/ARS.2012.5149.
[62]K. H. Cheeseman and T. F. Slater, "An introduction to free radical biochemistry," British Medical Bulletin, vol. 49, no. 3, pp. 481–493, Jan. 1993, doi: 10.1093/OXFORDJOURNALS.BMB.A072625.
[63]G. Pizzino et al., "Oxidative Stress: Harms and Benefits for Human Health," Oxidative Medicine and Cellular Longevity, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/8416763.
[64]F. Shahidi and P. D. Wanasundara, "Phenolic antioxidants," Critical Reviews in Food Science and Nutrition, vol. 32, no. 1, pp. 67–103, Jan. 1992, doi: 10.1080/10408399209527581.
[65]M. A. I. Al-Hatamleh, J. C. Boer, K. L. Wilson, M. Plebanski, R. Mohamud, and M. Z. Mustafa, "Antioxidant-Based Medicinal Properties of Stingless Bee Products: Recent Progress and Future Directions," Biomolecules, vol. 10, no. 6, pp. 1–28, Jun. 2020, doi: 10.3390/BIOM10060923.
[66]C. A. Rice-Evans, N. J. Miller, and G. Paganga, "Antioxidant properties of phenolic compounds," Trends in Plant Science, vol. 2, no. 4, pp. 152–159, Apr. 1997, doi: 10.1016/S1360-1385(97)01018-2.
[67]S. P. Kek, N. L. Chin, Y. A. Yusof, S. W. Tan, and L. S. Chua, "Total Phenolic Contents and Colour Intensity of Malaysian Honeys from the Apis spp. and Trigona spp. Bees," Agriculture and Agricultural Science Procedia, vol. 2, pp. 150–155, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.AASPRO.2014.11.022.
[68]F. C. Biluca et al., "Phenolic compounds, antioxidant capacity and bioaccessibility of minerals of stingless bee honey (Meliponinae)," Journal of Food Composition and Analysis, vol. 63, pp. 89–97, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JFCA.2017.07.039.

[69]P. S. Oliveira, R. C. S. Müller, K. das Graças Fernandes Dantas, C. N. Alves, M. A. M. de Vasconcelos, and G. C. Venturieri, "Ácidos fenólicos, flavonoides e atividade antioxidante em méis de Melipona fasciculata, M. flavolineata (Apidae, Meliponini) E Apis mellifera (Apidae, Apini) da Amazônia," Quimica Nova, vol. 35, no. 9, pp. 1728–1732, 2012, doi: 10.1590/S0100-40422012000900005.
[70]M. Majid, M. S. Ellulu, and M. F. Abu Bakar, "Melissopalynological Study, Phenolic Compounds, and Antioxidant Properties of Heterotrigona itama Honey from Johor, Malaysia," Scientifica (Cairo), 2020, doi: 10.1155/2020/2529592.
[71]F. C. Biluca et al., "Phenolic compounds, antioxidant capacity and bioaccessibility of minerals of stingless bee honey (Meliponinae)," Journal of Food Composition and Analysis, vol. 63, pp. 89–97, Oct. 2017, doi: 10.1016/J.JFCA.2017.07.039.
[72]H. Hazirah, M. Yasmin-Anum, and A. Norwahidah, "Antioxidant Properties of Stingless Bee Honey and Its Effect on the Viability of Lymphoblastoid Cell Line," Medicine Health, vol. 14, no. 1, pp. 91–105, Jun. 2019, doi: 10.17576/MH.2019.1401.08.
[73]S. B. Budin et al., "Kelulut honey supplementation prevents sperm and testicular oxidative damage in streptozotocin-induced diabetic rats," Journal Teknolology, vol. 79, no. 3, pp. 89–95, Feb. 2017, doi: 10.11113/JT.V79.9674.
[74]M. S. A. Aziz, N. Giribabu, P. V. Rao, and N. Salleh, "Pancreatoprotective effects of Geniotrigona thoracica stingless bee honey in streptozotocin-nicotinamide-induced male diabetic rats," Biomedicine & Pharmacotherapy, vol. 89, pp. 135–145, May 2017, doi: 10.1016/J.BIOPHA.2017.02.026.
[75]N. 'Ain Arshad, T. S. Lin, and M. F. Yahaya, "Stingless Bee Honey Reduces Anxiety and Improves Memory of the Metabolic Disease-induced Rats," CNS Neurology Disorders Drug Targets, vol. 19, no. 2, pp. 115–126, Jan. 2020, doi: 10.2174/1871527319666200117105133.
[76]M. L. R. Bezerra et al., "Effects of honey from Mimosa quadrivalvis L. (malícia) produced by the Melipona subnitida D. (jandaíra) stingless bee on dyslipidaemic rats," Food Functional, vol. 9, no. 8, pp. 4480–4492, Aug. 2018, doi: 10.1039/C8FO01044G.
[77]Agussalim, N. Umami, Nurliyani, and A. Agus, "Stingless bee honey (Tetragonula laeviceps): Chemical composition and their potential roles as an immunomodulator in malnourished rats," Saudi Journal Biology Science, vol. 29, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SJBS.2022.103404.
[78]P. C. Molan, "The Antibacterial Activity of Honey," Saudi Journal Biology Science, vol. 73, no. 1, pp. 5–28, 2015, doi: 10.1080/0005772X.1992.11099109.
[79]J. W. White, M. H. Subers, and A. I. Schepartz, "The identification of inhibine, the antibacterial factor in honey, as hydrogen peroxide and its origin in a honey glucose-oxidase system," Biochimistry Biophysics Acta, vol. 73, no. 1, pp. 57–70, May 1963, doi: 10.1016/0006-3002(63)90359-7.

[80]J. M. Alvarez-Suarez et al., "Apis mellifera vs Melipona beecheii Cuban polifloral honeys: A comparison based on their physicochemical parameters, chemical composition and biological properties," LWT Journal, vol. 87, pp. 272–279, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.LWT.2017.08.079.

[81]D. Chan-Rodríguez, J. Ramón-Sierra, J. Lope-Ayora, E. Sauri-Duch, L. Cuevas-Glory, and E. Ortiz-Vázquez, "Antibacterial properties of honey produced by Melipona beecheii and Apis mellifera against foodborn microorganisms," Food Science and Biotechnology 2012 21:3, vol. 21, no. 3, pp. 905–909, Jun. 2012, doi: 10.1007/S10068-012-0118-X.

[82]A. Garedew, E. Schmolz, and I. Lamprecht, "Microcalorimetric investigation on the antimicrobial activity of honey of the stingless bee Trigona spp. and comparison of some parameters with those obtained with standard methods," Thermochimica Acta, vol. 415, no. 1–2, pp. 99–106, Jun. 2004, doi: 10.1016/J.TCA.2003.06.004.

[83]C. F. Massaro, D. Shelley, T. A. Heard, and P. Brooks, "In vitro antibacterial phenolic extracts from 'sugarbag' pot-honeys of australian stingless bees (Tetragonula carbonaria)," Journal Agriculture Food Chemistry, vol. 62, no. 50, pp. 12209–12217, Dec. 2014, doi: 10.1021/JF5051848/SUPPL_FILE/JF5051848_SI_001.PDF.

[84]C. Pucci, C. Martinelli, and G. Ciofani, "Innovative approaches for cancer treatment: current perspectives and new challenges," Ecancermedicalscience, vol. 13, Sep. 2019, doi: 10.3332/ECANCER.2019.961.

[85]P. M. Kustiawan, S. Puthong, E. T. Arung, and C. Chanchao, "In vitro cytotoxicity of Indonesian stingless bee products against human cancer cell lines," Asian Pacific Journal Tropical Biomedical, vol. 4, no. 7, pp. 549–556, Jul. 2014, doi: 10.12980/APJTB.4.2014APJTB-2013-0039.

[86]W. I. W. Ismail, N. N. Hussin, S. N. F. Mazlan, N. H. Hussin, and M. N. F. M. Radzi, "Physicochemical Analysis, Antioxidant and Anti Proliferation Activities of Honey, Propolis and Beebread Harvested from Stingless Bee," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 440, no. 1, p. 012048, Oct. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/440/1/012048.

[87]A. K. Zulpa, N. S. Mohd Isa, F. T. Ahmad, M. N. Islamiah, and H. M. Yusof, "Quality Characteristics, Antioxidant and Anticancer Potential of Stingless Bee Honey and Honeybee Honey from Similar Environmental Conditions," IIUM Medical Journal Malaysia, vol. 20, no. 4, pp. 29–36, Oct. 2021, doi: 10.31436/IMJM.V20I4.1753.

[88]E. T. Arung et al., "Cytotoxicity effect of honey, bee pollen, and propolis from seven stingless bees in some cancer cell lines," Saudi Journal Biology Science, vol. 28, no. 12, p. 7182, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.SJBS.2021.08.017.

[89]F. Ahmad, P. Seerangan, M. Z. Mustafa, Z. F. Osman, J. M. Abdullah, and Z. Idris, "Anti-Cancer Properties of Heterotrigona itama sp. Honey Via Induction of Apoptosis in Malignant Glioma Cells," The Malaysian Journal of Medical Sciences, vol. 26, no. 2, p. 30, 2019, doi: 10.21315/MJMS2019.26.2.4.

[90]L. S. Yazan et al., "Chemopreventive Properties and Toxicity of Kelulut Honey in Sprague Dawley Rats Induced with Azoxymethane," Biomedicine Research International, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/4036926.

[91]D. Goulson, E. Nicholls, C. Botías, and E. L. Rotheray, "Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers.," Science, vol. 347, no. 6229, p. 1255957, Mar. 2015, doi: 10.1126/science.1255957.

[92]S. G. Potts, J. C. Biesmeijer, C. Kremen, P. Neumann, O. Schweiger, and W. E. Kunin, "Global pollinator declines: trends, impacts and drivers," Trends in Ecology & Evolution, vol. 25, no. 6, pp. 345–353, Jun. 2010, doi: 10.1016/J.TREE.2010.01.007.

[93]J. P. González-Varo et al., "Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination," Trends in Ecology & Evolution, vol. 28, no. 9, pp. 524–530, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.TREE.2013.05.008.

[94]B. M. Freitas et al., "Diversity, threats and conservation of native bees in the Neotropics," Apidologie, vol. 40, no. 3, pp. 332–346, May 2009, doi: 10.1051/apido/2009012.

[95]A. Reyes-González, R. Ayala, A. Camou-Guerrero, A. Reyes-González, R. Ayala, and A. Camou-Guerrero, "Nuevo registro de abeja sin aguijón del género Plebeia (Apidae: Meliponini), en el alto Balsas del estado de Michoacán, México," Revista Mexicana Biodiversidad, vol. 88, no. 2, pp. 464–466, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rmb.2017.03.018.

[96]J. S. Pettis, D. VanEngelsdorp, J. Johnson, and G. Dively, "Pesticide exposure in honey bees results in increased levels of the gut pathogen Nosema," Natur wissenschaften, vol. 99, no. 2, pp. 153–158, Feb. 2012, doi: 10.1007/s00114-011-0881-1.

[97]J. Y. Wu, M. D. Smart, C. M. Anelli, and W. S. Sheppard, "Honey bees (Apis mellifera) reared in brood combs containing high levels of pesticide residues exhibit increased susceptibility to Nosema (Microsporidia) infection," Journal of Invertebrate Pathology, vol. 109, no. 3, pp. 326–329, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.JIP.2012.01.005.

Cómo citar este artículo:

Hernández-Zavala, A., Guaita Gavilanes, M. G., & Martínez Castillo, M. (2023). La miel de abejas sin aguijón: una medicina diferente. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.242

Residuos agroindustriales como fuente de nutrientes y compuestos fenólicos

Agroindustrial Residues as Sources of Nutrients and Phenolic Compounds

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Norma Julieta Salazar-López [1]
Salma A. Enríquez-Valencia [2]
Bagdi Shain Zuñiga Martínez [3]
Gustavo A. González-Aguilar [4]

Recibido: 14 / 11 / 2022
Aceptado: 08 / 03 / 2023
Publicado: 31 / 03 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.265

Autor de Correspondencia:
Gustavo A. González Aguilar,
Correo: gustavo@ciad.mx

Resumen

El presente trabajo describe los nutrientes y compuestos fenólicos contenidos en diversos residuos agroindustriales (RAI). Los RAI pueden derivar en problemas que comprometen la alimentación y salud de las poblaciones más vulnerables si no son aprovechados adecuadamente. Por ello es importante crear alternativas que contribuyan a contrarrestar el problema, desde la producción de alimentos hasta la mesa del consumidor. Los RAI de frutas, verduras, cereales y oleaginosas contienen nutrientes y compuestos fenólicos que pueden ser benéficos a la salud debido a sus efectos antioxidantes, antiinflamatorios, antidiabéticos, entre otros. Los RAI podrían también ser aplicados en el desarrollo de alimentos, debido a sus características tecnofuncionales como la capacidad de actuar como agentes gelificantes, emulsificantes, estabilizantes y espesantes. De acuerdo con lo anterior, el empleo de RAI para un segundo uso es prometedor, sin embargo, aún quedan algunos retos por resolver, tales como el escalamiento y la optimización de su extracción.

Palabras clave: residuos de alimentos, nutrición, compuestos bioactivos.

Abstract

The present work describes the nutrients and phenolic compounds contained in diverse agroindustrial residues (AIR). The AIR could derive in problems that compromise the nutrition and health of the most vulnerable populations if they are not properly used. Therefore, it is important to create alternatives that contribute to counteract the problem, from food production to the consumer's table. AIR from fruits, vegetables, cereals and oilseeds contain nutrients and phenolic compounds that can be beneficial to health, due to their antioxidant, anti-inflammatory and antidiabetic effects, among others. The AIR could also be used in food development, due to their techno-functional characteristics such as the capability to act as gelling, emulsifying, stabilizing, and thickening agents. Accordingly, a second use of AIR is promising, however, there are still some challenges to be solved, such as process scaling and optimizing its extraction.

Keywords: *food residues, nutrition, bioactive compounds*.

1 Dra. en Ciencias de Alimentos, Facultad de Medicina de Mexicali, Universidad Autónoma de Baja California, Dr. Humberto Torres Sanginés S/N, Centro Cívico, 21000 Mexicali, Baja California, México, njulietasl@yahoo.es, 0000-0002-8597-3455
2 Química en Alimentos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, 83304 Hermosillo, Sonora, México, salma.enriquezv@gmail.com, 0000-0003-0048-7130.
3 Maestría en Ciencias, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, 83304 Hermosillo, Sonora, México, shain.zuniga21@gmail.com, 0000-0001-5802-9859
4 Dr. en Tecnología de Alimentos, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C., Carretera Gustavo Enrique Astiazarán Rosas No. 46, Col. La Victoria, 83304 Hermosillo, Sonora, México, gustavo@ciad.mx, 0000-0002-7452-286X

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de alimentos debe aumentar en un 60 % para 2050 para satisfacer las necesidades de la población [1]; sin embargo, si se continúa con el tipo de producción actual (lineal) en lugar de una economía circular, se generará una mayor cantidad de residuos agroindustrailes (RAI). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 1,300 millones de toneladas de los alimentos producidos son desechados anualmente a nivel mundial, lo que significa pérdidas del 30%, por lo que tales alimentos se convierten entonces en materia prima subutilizada y que podrían ser consumidos [2], [3].

Cuando no reciben un segundo uso, los RAI se convierten en problemas ambientales, económicos, de seguridad alimentaria y sostenibilidad, que comprometen la alimentación y salud de las poblaciones más vulnerables, debido a que estos restos generalmente terminan en vertederos. Es por ello que en búsqueda de soluciones, este tema fue incluido dentro de la Agenda de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible 2030; específicamente, a través de la meta 12.3 la cual establece que "*De aquí a 2030, reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita mundial en la venta al por menor y a nivel de los consumidores y reducir las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro, incluidas las pérdidas posteriores a la cosecha*" [4].

Lo anterior con el objetivo de crear alternativas que contribuyan a contrarrestar la problemática de pérdida y desperdicio de alimentos, desde su producción en el cultivo hasta la mesa del consumidor. Por otro lado, la Comisión

Europea ha promovido la estrategia de implementación de la economía circular [5], bajo la cual, es prioritario convertir los RAI en un recurso para cerrar el ciclo, evitando que terminen en vertederos o sean incinerados con la subsecuente contaminación del medio ambiente [6].

Una de las estrategias para aprovechar los RAI es su incorporación a la línea de producción o usarlos en una segunda cadena de producción. Dentro de las posibles alternativas de su uso se encuentran la obtención de compuestos bioactivos o nutrientes, los cuales se pueden utilizar como ingredientes para la formulación de alimentos funcionales y nutracéuticos o con funcionalidad tecnológica (figura 1), además de otras opciones como fuentes de proteína alternativa, generación de energía, aplicaciones en industria farmacéutica y cosmética [7], [8].

Figura 1. Ruta de la generación de residuos agroindustriales y aplicaciones potenciales.

Los alimentos con mayor producción de residuos son: (1) las raíces, frutas, hortalizas y semillas oleaginosas (40-50%), seguidos del (2) pescado (35%), cereales (30%), carnes y productos lácteos (20%) [2]. Con respecto a los primeros, sus restos comprenden cáscaras, semillas, tallos, bagazo, mazorcas, hojas, salvado, pastas de semillas de la extracción de aceites, entre otros. Dichos restos comúnmente son descartados durante las etapas de pre y post cosecha, almacenamiento, manejo, transporte, procesamiento o por el consumidor final. Este tipo de residuos son también los de mayor producción a nivel mundial y representan una fuente importante de contaminación ambiental [9], [10].

En cuanto a los restos del segundo grupo derivados del consumo y procesamiento de alimentos, estos pueden representar un alto porcentaje del peso del producto [11]; por ejemplo, del mango se descarta aproximadamente 20-64%, aguacate 26% [12] y piña 15% [13]. Sin embargo, existe evidencia de que estas partes descartadas contienen nutrientes remanentes, destacando lípidos, proteínas, carbohidratos, vitaminas, minerales y compuestos fenólicos. Es por ello que el presente trabajo describe los nutrientes y compuestos fenólicos presentes en RAI, incluyendo rendimientos, con el fin de presentar información relevante de las fuentes y vegetales más viables a ser empleadas para la recuperación de dichas moléculas.

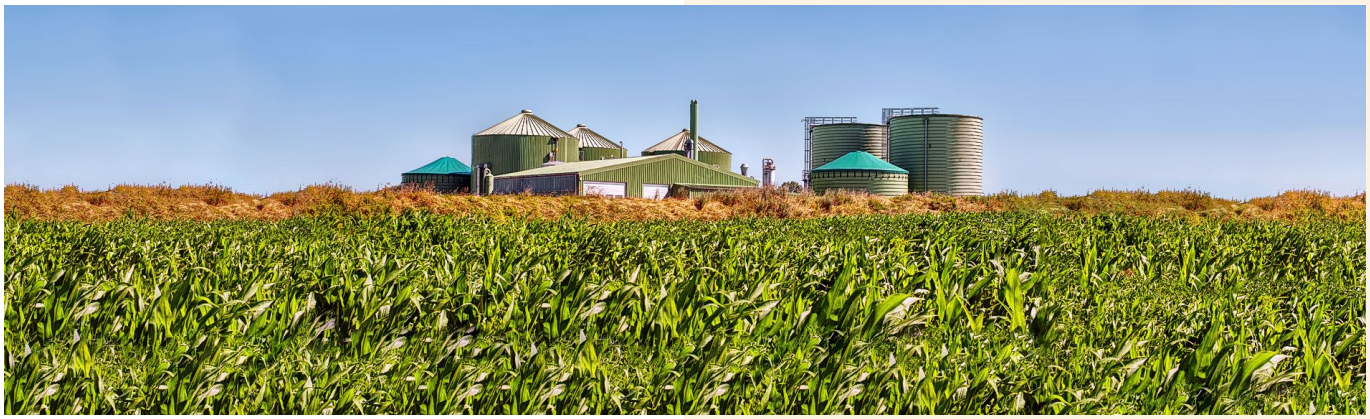
CARBOHIDRATOS

La fibra dietaria pertenece al grupo de los carbohidratos, forma parte prominente en los RAI y se compone de fibra soluble en agua (pectinas, gomas, mucilagos) y fibra insoluble (celulosas y hemicelulosas). Estas moléculas son carbohidratos indigeribles que no pueden ser hidrolizados por las enzimas intestinales humanas, por lo que son utilizadas y fermentadas por la microbiota, los cuales producen metabolitos benéficos para la salud intestinal y general del consumidor [9]. Los RAI son considerados una buena fuente de fibra, por ejemplo, algunos contienen más del 50%, tales como la cáscara de aguacate con 96.85 g/100 g de la

cual 7.46% corresponde a fibra soluble y 89.39% de fibra insoluble [14]. Además, el bagazo de caña de azúcar con 80.7 g/100 g [15], bagazo de acerola con 77 g/100 g [16], cáscara de papa con 76.4 g/100 g [17] y bagazo de naranja con 51.68 g/100 g (44.29 % soluble y 7.39% insoluble) [18]. Particularmente, el bagazo de manzana, bagazo de pepino, bagazo de durazno y bagazo de pimiento rojo contienen cantidades significativas de fibra, con alrededor de 25.28, 22.48, 22.23 y 19.95 g/100 g, respectivamente, lo cual los hace atractivos como fuente para obtención de fibra.

La fibra de RAI cuenta con diversas aplicaciones potenciales, entre las que figuran su uso como prebiótico, ingrediente de alimentos funcionales, fuente de carbono para producción de enzimas y ácidos orgánicos, material base para mejorar la liberación y entrega de compuestos bioactivos en colon y generación de bioetanol [14]–[19]. Por ejemplo, la pectina, cuyo rendimiento es de 12-32 g/100g, puede ser empleada como aditivo alimentario, gelificante, espesante, estabilizante, para producir alimentos funcionales [20], [21].

Se encuentran también diversos tipos de polisacáridos que han mostrado capacidades tecno-funcionales y diversas bioactividades, destacando la antioxidante, prebiótica, antiinflamatoria, antiobesogénica, antidiabética, inmunomoduladora, hipolipidémica y hepatoprotectora [9], [22]. Por ejemplo, los residuos de alimentos fibrosos como tunas o alcachofas, son fuente de fructanos de tipo inulina [23], [24]. La inulina de la alcachofa en particular ha mostrado efecto prebiótico, al incrementar el crecimiento de cinco especies de *Lactobacillus* y cuatro de *Bifidobacterias*, por lo que se ha sugerido su aplicación en formulaciones simbióticas [24]. Algunos polisacáridos son también apreciados por el tipo de monosacáridos que se pueden obtener a partir de ellos para diversos usos industriales; tal es el caso del bagazo de citrón, el cual es fuente de polisacáridos ricos en arabinosa, ácido galacturónico y ramnosa. Los cuales se han sugerido para ser aplicados como aditivos alimentarios en emulsiones para reducir su viscosidad [25]. Los restos de piña son fuente de monosacáridos



con potencial de aplicación como ingredientes funcionales con actividad antioxidante [26].

Proteína

La fuente preferida de proteína por la mayoría de la población mundial es la carne; para el 2050 la demanda de carne se estima que será de aproximadamente 400 millones de toneladas [27]. Sin embargo, su sistema de producción se asocia a múltiples afectaciones ambientales, incluyendo emisiones de gases de efecto invernadero, alto uso de recursos como tierra y agua, etcétera [28], por lo que se buscan fuentes de proteína alternativas para satisfacer dicho incremento en su demanda. Dentro de las alternativas más relevantes presentadas por la comunidad científica actual se encuentran la carne cultivada, insectos, carne de origen vegetal, proteína unicelular y la recuperación de péptidos y proteína a partir de diversos residuos [29]. Se destacan las últimas tres opciones ya que pueden ser obtenidas a partir de RAI, mismos que pueden ser empleados para formular sustitutos de carne, así como recuperar derivados proteicos. Además, pueden utilizarse como sustrato para el crecimiento de microorganismos y la posterior obtención de proteína unicelular [8].

Para ser aprovechados como fuente de proteína, los restos agroindustriales deben contenerla en altas concentraciones, ser de calidad (de acuerdo a un perfil de aminoácidos completo o mayormente completo) y estar libre de tóxicos, toxinas o alérgenos [30]. Asimismo, son preferidas aquellas opciones en las que las moléculas sean relativamente fáciles de extraer o que requieran procesos lo más sencillos posibles, además de que permitan el uso de métodos de extracción eficientes y verdes para no generar más afectaciones ambientales.

Entre los residuos con mayor potencial de ser empleados para la obtención de proteínas se encuentran los provenientes de la industria de la soya, oleaginosas y cereales. Los procesos de obtención pueden ser: por extracción, por ácidos o bases, hidrotérmicos, líquidos iónicos, enzimáticos, alcohólicos, salinos, filtración con membranas y procesos de fermentación [31]. Por otra parte, los restos de frutas y verduras pueden ser fuentes de proteína de manera indirecta, al utilizarse como biomasa para la obtención de proteína unicelular [27], [32]. Diversas investigaciones indican que el uso de RAI puede generar 30-45% de proteína a partir de hongos, 40-60% de algas, 45-55% de levaduras y 50-65% de bacterias; por lo que, el uso de microorganismos para la obtención de proteína se convierte en una alternativa prometedora [8], [33].

Lípidos

Las semillas de diversas frutas son desechadas por la industria agroalimentaria, sin embargo, éstas o sus constituyentes pueden ser empleadas en la elaboración de alimentos funcionales o ser materia prima para formulaciones en las industrias cosmética, farmacéutica y nutracéutica. La presente sección considera solamente lípidos presentes en semillas.

Las semillas acumulan lípidos como reservas energéticas, los cuales se aprovechan con fines nutricionales. Las semillas y sus aceites más comunes son lino, chía, sésamo, girasol y pepitas de calabaza, además constantemente surgen otras, como las de cáñamo y de diversas frutas [34].

Se sabe que las semillas contienen algunos lípidos nutricionalmente importantes, los cuales se utilizan como ingredientes para nutracéuticos y otras aplicaciones [35], siendo algunos de los más relevantes los ácidos grasos

esenciales (como los ácidos grasos omega-3), fitoesteroles, carotenoides, escualeno, fosfolípidos y glicolípidos [36].

Las semillas de frutas cuentan también con un alto valor nutricional, aunque su aprovechamiento como suplementos alimenticios u otros productos de relevancia nutricional es aún mínimo, debido en parte a que no están disponibles en el mercado o no son fácilmente accesibles como las semillas antes mencionadas. Su composición lipídica es variable, por ejemplo, el contenido de aceite es de 3.32 a 14.7 % en semillas de aguacate [37] y de 5.2 a 17.2 % en las de limón [38]; las semillas de arándano, fresa y tuna presentan < 10 %; mientras que las de albaricoque, melón, olivo, naranja, durazno y sandía cuentan con > 50 % [39], aunque la mayoría de las semillas de frutas cuentan con aproximadamente un tercio de aceite del peso total (seco). A pesar de esta variabilidad, la composición lipídica de varias semillas de frutas amerita estudios para establecer su impacto sobre la salud y nutrición humana, así como otras áreas que permitan promover su uso con fines alimentarios y otros. También es determinante que previo al empleo de las semillas como fuente de lípidos, se debe evaluar la presencia de compuestos tóxicos como glicósidos cianogénicos, así como taninos u otros constituyentes antifisiológicos que pueden ocasionar alergias, malnutrición o cuadros de diarrea. Por ello, se requieren mayores investigaciones que evalúen su potencial aplicación de manera segura.

Compuestos fenólicos (CF)

Los CF son metabolitos secundarios producidos por las plantas, por lo que su presencia es esperada en los RAI. Los CF pueden ejercer efectos que promueven mejoras a la salud, principalmente mediante mecanismos antioxidantes. Los CF son antioxidantes exógenos que juegan un papel sinérgico importante con el sistema antioxidante endógeno del consumidor, particularmente cuando éste es rebasado en el intento de modular el estrés oxidativo inducido por radicales libres. Es bajo esa condición cuando sus efectos permiten prevenir ciertas patologías asociadas a fenómenos pro-oxidativos [40].

Además de su efecto antioxidante, los CF extraídos de RAI son capaces de promover la salud del consumidor mediante otras acciones, tales como su potencial antiobesogénico [41], anti-inflamatorio [42], anticancerigeno, antiinflamatorio [12], entre otros. Estos efectos justifican porqué su obtención a partir de residuos se ha convertido en un campo de interés actual [43], cuyas aplicaciones se centran en la elaboración de alimentos funcionales y nutracéuticos [42].

Algunos RAI fuente de CF incluyen la cáscara de aguacate, la cáscara de mango, orujo de uva, residuo de café, residuo de la obtención de aceites, restos de frutas tropicales, entre otros [7], [12], [15], [41], [44], [45]. La tabla 1 resume algunos ejemplos de RAI como fuentes de CF (incluidos flavonoides, ácidos fenólicos y sus glucósidos, entre otros), así como de lípidos, proteínas y fibra descritos en las secciones anteriores y los rendimientos de cada uno.

Los restos de cítricos destacan por ser fuentes de CF como naringenina y naringina, los cuales poseen potencial antioxidante y hepatoprotector [46]. Algunos RAI son fuente de CF conjugados con azucares, tales como el orujo de manzana (residuo obtenido del prensado de manzana para obtención de zumo, sidra), en el que se han reportado la presencia de quercetina-3-*O*-galactósido (3,137 mg/100 g), así como quercetina-3-*O*-ramnósido (2,605 mg/100 g) y florentina-2-*O*-glucósido (1,596 mg/100 g) [42].

Por otra parte, los aspectos positivos relacionados con el uso de bioactivos (por ejemplo, CF) en la nutrición de rumiantes [47], han aumentado el interés en el uso de residuos ricos en ellos como ingredientes dietéticos en beneficio de la nutrición animal, así como en la alimentación humana mencionado anteriormente [48]. Al respecto, el ácido ferúlico es un CF adicionado a dietas animales, que ha mostrado un efecto inmunomodulador y mejoras en la calidad de la carne [49].

Tabla 1. Rendimiento y aplicación de proteínas, carbohidratos, lípidos y compuestos fenólicos contenidos en residuos agroindustriales.

Residuo	Nutriente o compuesto bioactivo	Rendimiento	Aplicación/Beneficio	Ref.
Salvado de sésamo	Proteína	15 g/100 g	Potencial uso en alimentos funcionales Nutrición	[50]
Suero de industria de la soya	Proteína y enzimas	0.3-8.3 g/L	Biotecnología Biotransformación biológica/enzimática Nutrición	[31]
Cáscara de plátano, papa y pulpa de zanahoria	Proteína unicelular	Biomasa 12 g/ 100 g (proteína 47.7%)	Ingrediente para formulación de pan, Nutrición	[51]
Aguas residuales de cervecería	Proteína unicelular	$27 \times 10^5 \pm 0.42$ células/mL (64.9% de proteína)	Proteína con siete aminoácidos esenciales y capacidad antioxidante	[52]
Bagazo de tomate	Pectina	31.58 g/100 g	Ingrediente funcional en la industria alimentaria Agente gelificante, espesante y estabilizador	[21]
Cáscara de mango	Pectina-compuestos fenólicos	21.82 g/100 g y 2,426.67 mg EAG/100 g, respectivamente	Películas activas para alimentos susceptibles a oxidación lipídica. Actividad antioxidante y antimicrobiana	[45]
Cáscara de pitaya	Pectina	23.09 g/100 g	Agente gelificante, emulsificante, estabilizante y espesante en alimentos	[53]
Cáscara de nuez	Pectina	12.78 g/100 g	Ingrediente para la formulación de alimentos, cosméticos y fármacos. Capacidad emulsificante, de absorción de agua y aceite y actividad antioxidante	[54]
Corazón de piña	Polisacáridos compuestos por monosacáridos: galactosa, glucosa, arabinosa, manosa, ácido galacturónico, ribosa, xilosa, ramnosa y ácido glucurónico	16.7 g/100 g	Ingrediente de alimentos funcionales. Agente emulsificante y espumante con actividad antioxidante	[26]
Cáscara de arroz	Holocelulosa compuesta por: arabinosa 4.4 %, galactosa 1.4 %, glucosa 68.8 %, xilosa 25.6 %	78 g/100 g	Desarrollo de materiales de empaquetamiento de alimentos con propiedades mejoradas. Nanocristales de celulosa para el desarrollo de biopolímeros	[55]
Residuo de café molido	Polisacáridos compuestos por glucosa, manosa, galactosa y arabinosa	18.25 g/100 g	Industria alimentaria e industrias relacionadas Alta actividad antioxidante e hipoglicémica	[56]
Cáscara y pulpa de piña	Polisacáridos compuestos por arabinosa, galactosa, glucosa	0.8 g/100 g	Actividad antioxidante y gastroprotectora	[57]
Semillas, cáscara y pulpa de acerola		2.54 g/100 g		
Cáscara y pulpa de anacardo		7 g/100 g		
Semillas de granada (*Punica granatum* L.)	Aceite: Ácido púnico: 72.8 % Ácido linoleico: 11 % Ácido palmítico:5.8 % Ácido oleico:5.4 % Ácido esteárico: 5.0 %	25.5 g/100 g	Aplicación tópica del aceite en piel de ratas Efectos quimiopreventivos contra cáncer de piel asociados a la inhibición de la ornitina descarboxilasa	[58]
Semillas de manzana variedad 'New Red Star'	Aceite: Ácido palmítico: 6.60% Ácido palmitoleico: 0.05 Ácido esteárico: 1.96 % Ácido oleico :38.55	24.32 g/100 g	Antimicrobiano a una concentración inhibitoria mínima de 0.3 mg/mL Inhibición de microorganismos de importancia alimentaria *Escherichia coli, Salmonella sp., Bacillus subtilis*	[59]

Semillas de anón (*Annona squamosa*)	Aceite: ácido palmitico:9.92 %, ácido linoleico:20.49 %, ácido oleico: 56.50 %, ácido esteárico 9.14 %	22.6 g/100 g	Aplicación vía oral Inhibición del crecimiento de células tumorales H22 en ratones Kunming Disminución de la interleucina-6 (IL-6)	[60]
Semilla de melón (*Cucumis melo* L. *Inodorus*)	Aceite: ácidos grasos saturados 8.82 %, ácidos grasos monoinsaturados: 21.95 % y ácidos grasos poliinsaturados:68.22 %	34.1 g/100 g	Antiinflamatorio. Estudios *in vitro* Inhibición de 5-lipoxigenasa	[61]
Aguacate (*Persea americana*)	Ácido palmítico: 18.59 % Ácido palmitoleico: 5.0% Ácido esteárico: 1.5 % Ácido oléico: 49.8 % Ácido linoléico: 20.5 Ácido linolenico:2.4 %	3.2 g/100 g	Aplicación vía oral Inhibición del crecimiento de células de cáncer de colon y de carcinoma hepatocelular Freno del ciclo celular e inhibición del crecimiento de algunas células cancerosas a través de la estimulación de su apoptosis	[62]
Semillas de algodón	Aceite Ácido palmitico: 26.4 % Ácido palmitoleic: 0.66 % Ácido estearico: 3.3 % Ácido oleico: 21.7 % Ácido linoleico: 58.2 Ácido linolénico: 1.0 %	NR	Repelente y pesticida Repelente y altamente letal para ácaros del cocotero	[63]
Cáscara de plátano	Compuestos fenólicos 3,146 mg GAE/100 g Flavonoides totales 2,211 mg QE/100 g Actividad antioxidante (DPPH) 82.5 %		Extracción de compuestos bioactivos del polvo de cáscara de plátano Combatir las enfermedades causadas por radicales libres; Propiedades antidiabéticas	[64]
Cáscara de naranja	Ácido elágico 236 mg/100 g Catequina 222 mg/100 g Quercetina 206 mg/100 g		Fuente de carbono de *Aspergillus fumigatus* Industria alimentaria y farmacéutica Antioxidantes Antibacterianos Actividad anticancerígena	[65]
Pulpa de café	Ácido gálico 7.66 mg/100 g Vainillina 220.83 mg/100 g Catequina 2,443.21 mg/100 g Cumárico 15.64 mg/100 g Cafeico 11.78 mg/100 g Ferúlico 4.52 mg/100 g Actividad antioxidante 11.15 g AAEq./100 g		Extracción de polifenoles de pulpa de café Ayudar a disminuir la incidencia de enfermedades cardiovasculares, cáncer de colon, trastornos hepáticos, obesidad y diabetes	[41]
Orujo de manzana	Quercetina-3-*O*-galactósido 3137 mg/100 g Quercetina-3-*O*-ramnósido 2605 mg/100 g Florentina-2-*O*-glucósido 1596 mg/100 g		Suplementación y/o desarrollo de productos fortificados Propiedades antioxidantes y antivirales Antiinflamatorias	[42]
Orujo de uva	Antocianinas 612 mg/100 g Flavonoles 146 mg/100 g Ácido hidroxicinámico 130 mg/100 g Ácido hidroxibenzóico 330 mg/100 g Flavan-3-oles 1116 mg/100 g		Compostaje de la biomasa de orujo de uva Reguladores del crecimiento para muchas plantas de cultivo vascular, estimulando la absorción de macronutrientes minerales	[66]

NR. No reportado

CONCLUSIÓN

Las evidencias indican que los RAI son, en general, fuentes de nutrientes y compuestos fenólicos, con porcentajes de recuperación superiores al 50%, como en el caso de las fibras. Esto sugiere su potencial para ser aplicados en la producción de alimentos, debido también a sus características tecnofuncionales, entre las que destacan su capacidad gelificante, emulsificante, estabilizante y espesante, así como su utilización como biomasa para la producción de proteína. Los compuestos fenólicos recuperados de restos de alimentos han mostrado potenciales aplicaciones en la salud, debido a sus efectos antioxidante, anticancerígeno, antiinflamatorio, antidiabético, entre otros. Es por ello que, el empleo de residuos de alimentos para un segundo uso como parte de la economía circular, puede dar alternativas viables para el desarrollo de nuevos alimentos innovadores y nutracéuticos. Sin embargo, aún quedan algunos retos por resolver, tales como el escalamiento y la optimización de los distintos procesos de extracción, que varía con las características y composición del residuo agroalimentario.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto "De los subproductos alimenticios de vegetales a nuevos productos de valor agregado, el papel de la tecnología en la bioeconomía" (320351) y PROTEO Alimentaria por aportar nueva información sobre la producción de proteína unicelular. Así como por el proyecto "Revalorización de residuos de alimentos como sustrato para el cultivo de *Lactobacillus rhamnosus* y *Saccharomyces boulardii* con potencial aplicación como probiótico, posbiótico y fuente de proteína bioaccesible" de la Universidad Autónoma de Baja California. Salma A. Enríquez-Valencia, agradece a CONACYT por la beca recibida para la obtención del grado de Maestría en Ciencias. B. Shain Zuñiga-Martínez agradece a CONACYT por la beca recibida para la obtención del grado de Doctorado en Ciencias.

BIBLIOGRAFÍA

[1] M. C. Boliko, "FAO and the Situation of Food Security and Nutrition in the World," J. Nutr. Sci. Vitaminol. (Tokyo), vol. 65, no. Supplement, pp. S4–S8, Oct. 2019, doi: 10.3177/jnsv.65.S4.

[2] Raúl Benítez, "Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe," Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 2015. https://www.fao.org/americas/noticias/ver/es/c/239393/

[3] Z. Usmani et al., "Minimizing hazardous impact of food waste in a circular economy – Advances in resource recovery through green strategies," J. Hazard. Mater., vol. 416, p. 126154, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126154.

[4] FAO, "Objetivos de Desarrollo Sostenible," 2015. https://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/es/

[5] A. Fernandez et al., "Clean recovery of phenolic compounds, pyro-gasification thermokinetics, and bioenergy potential of spent agro-industrial bio-wastes," Biomass Convers. Biorefinery, Jan. 2022, doi: 10.1007/s13399-021-02197-z.

[6] P. Leite, C. Silva, J. M. Salgado, and I. Belo, "Simultaneous production of lignocellulolytic enzymes and extraction of antioxidant compounds by solid-state fermentation of agro-industrial wastes," Ind. Crops Prod., vol. 137, pp. 315–322, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.044.

[7] B. H. Belmonte-Herrera et al., "Lesser-Consumed Tropical Fruits and Their by-Products: Phytochemical Content and Their Antioxidant and Anti-Inflammatory Potential," Nutrients, vol. 14, no. 17, p. 3663, Sep. 2022, doi: 10.3390/nu14173663.

[8] N. J. Salazar-López et al., "Single-Cell Protein Production as a Strategy to Reincorporate Food Waste and Agro By-Products Back intothe Processing Chain," p. 13, 2022.

[9] R. Bhat, "Sustainability challenges in the valorization of agri-food wastes and by-products," in Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products: Recent Trends, Innovations and Sustainability Challenges, R. Bhat, Ed. 2021, pp. 1–28. doi: 10.1016/B978-0-12-824044-1.00042-8.

[10] N. Jiménez-Moreno, I. Esparza, F. Bimbela, L. M. Gandía, and C. Ancín-Azpilicueta, "Valorization of selected fruit and vegetable wastes as bioactive compounds: Opportunities and challenges," Crit. Rev. Environ. Sci. Technol., vol. 50, no. 20, pp. 2061–2108, 2020, doi: 10.1080/10643389.2019.1694819.

[11] C. A. Can-Cauich et al., "Tropical fruit peel powders as functional ingredients: Evaluation of their bioactive compounds and antioxidant activity," J. Funct. Foods, vol. 37, pp. 501–506, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.jff.2017.08.028.

[12] N. J. Salazar-López et al., "Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds," Food Res. Int., vol. 138, p. 109774, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109774.

[13] V. Saraswaty, C. Risdian, I. Primadona, R. Andriyani, D. G. S. Andayani, and T. Mozef, "Pineapple peel wastes as a potential source of antioxidant compounds," IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., vol. 60, p. 012013, Mar. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/60/1/012013.

[14] N. J. Salazar-López, M. L. Salmerón-Ruiz, J. A. Domínguez-Avila, M. A. Villegas-Ochoa, J. F. Ayala-Zavala, and G. A. González-Aguilar, "Phenolic compounds from 'Hass' avocado peel are retained in the indigestible fraction after an in vitro gastrointestinal digestion," J. Food Meas. Charact., vol. 15, no. 2, pp. 1982–1990, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11694-020-00794-6.

[15] D. I. L. Gil-López et al., "Production of dietary fibers from sugarcane bagasse and sugarcane tops using microwave-assisted alkaline treatments," Ind. Crops Prod., vol. 135, pp. 159–169, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.indcrop.2019.04.042.

[16] S. A. Monteiro, M. M. Barbosa, F. F. Maia da Silva, R. F. Bezerra, and K. da Silva Maia, "Preparation, phytochemical and bromatological evaluation of flour obtained from the acerola (Malpighia punicifolia) agroindustrial residue with potential use as fiber source," Lwt, vol. 134, pp. 1–7, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.110142.

[17] P. D. Pathak, S. A. Mandavgane, N. M. Puranik, S. J. Jambhulkar, and B. D. Kulkarni, "Valorization of potato peel: a biorefinery approach," Crit. Rev. Biotechnol., vol. 38, no. 2, pp. 218–230, Feb. 2018, doi: 10.1080/07388551.2017.1331337.

[18] P. D. G. Pacheco, M. A. Baller, F. M. Peres, É. de M. Ribeiro, T. C. Putarov, and A. C. Carciofi, "Citrus pulp and orange fiber as dietary fiber sources for dogs," Anim. Feed Sci. Technol., vol. 282, p. 115123, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2021.115123.

[19] I. Mármol et al., "Valorization of agro-food by-products and their potential therapeutic applications," Food Bioprod. Process., vol. 128, pp. 247–258, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.06.003.

[20] M. Kazemi, F. Khodaiyan, M. Labbafi, and S. S. Hosseini, "Ultrasonic and heating extraction of pistachio by-product pectin: physicochemical, structural characterization and functional measurement," J. Food Meas. Charact., vol. 14, no. 2, pp. 679–693, Apr. 2020, doi: 10.1007/s11694-019-00315-0.

[21] P. Lasunon and N. Sengkhamparn, "Effect of ultrasound-assisted, microwave-assisted and ultrasound-microwave-assisted extraction of pectin extraction from industrial tomato waste," Molecules, vol. 27, no. 1157, 2022.

[22]L. X. López-Martínez, S. A. Enríquez-Valencia, and G. González Aguilar, "Tropical fruits and by-products as a potential source of bioactive polysaccharides: Bioactive polysaccharides from tropical fruits," Biotecnia, vol. 23, no. 3, Oct. 2021, doi: 10.18633/biotecnia.v23i3.1450.

[23]I. Benítez-Cortés, A. Pérez-Martínez, R. Álvarez, O. Collado-García, and Y. González-Díaz, "Perspectivas de la producción de inulina a partir de la tuna (Opuntia ficus-indica)," Tecnol. Quím., vol. 35, no. 2, p. 12, May 2015.

[24]Z. Zeaiter, M. E. Regonesi, S. Cavini, M. Labra, G. Sello, and P. Di Gennaro, "Extraction and Characterization of Inulin-Type Fructans from Artichoke Wastes and Their Effect on the Growth of Intestinal Bacteria Associated with Health," BioMed Res. Int., vol. 2019, pp. 1–8, Sep. 2019, doi: 10.1155/2019/1083952.

[25]R. Fan, G. Mao, H. Xia, and J. Zeng, "Chemical elucidation and rheological properties of a pectic polysaccharide extracted from Citrus medica L. fruit residues by gradient ethanol precipitation," Int. J. Biol. Macromol., vol. 198, pp. 46–53, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.12.131.

[26]M. Hadidi et al., "Polysaccharides from pineapple core as a canning by-product: Extraction optimization, chemical structure, antioxidant and functional properties," Int. J. Biol. Macromol., vol. 163, pp. 2357–2364, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.092.

[27]A. Ritala, S. T. Häkkinen, M. Toivari, and M. G. Wiebe, "Single Cell Protein—State-of-the-Art, Industrial Landscape and Patents 2001–2016," Front. Microbiol., vol. 8, p. 2009, Oct. 2017, doi: 10.3389/fmicb.2017.02009.

[28]S. Smetana, A. Mathys, A. Knoch, and V. Heinz, "Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes," Int. J. Life Cycle Assess., vol. 20, no. 9, pp. 1254–1267, Sep. 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0931-6.

[29]C. van der Weele, P. Feindt, A. Jan van der Goot, B. van Mierlo, and M. van Boekel, "Meat alternatives: an integrative comparison," Trends Food Sci. Technol., vol. 88, pp. 505–512, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.tifs.2019.04.018.

[30]H. Kamal, C. F. Le, A. M. Salter, and A. Ali, "Extraction of protein from food waste: An overview of current status and opportunities," Compr. Rev. Food Sci. Food Saf., vol. 20, no. 3, pp. 2455–2475, May 2021, doi: 10.1111/1541-4337.12739.

[31]M. Peydayesh, M. Bagnani, W. L. Soon, and R. Mezzenga, "Turning Food Protein Waste into Sustainable Technologies," Chem. Rev., p. acs.chemrev.2c00236, Jun. 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00236.

[32]A. Tropea, A. Ferracane, A. Albergamo, A. G. Potortì, V. Lo Turco, and G. Di Bella, "Single Cell Protein Production through Multi Food-Waste Substrate Fermentation," Fermentation, vol. 8, no. 3, p. 91, Feb. 2022, doi: 10.3390/fermentation8030091.

[33]P. Thiviya, A. Gamage, R. Kapilan, O. Merah, and T. Madhujith, "Single Cell Protein Production Using Different Fruit Waste: A Review," Separations, vol. 9, no. 7, p. 178, Jul. 2022, doi: 10.3390/separations9070178.

[34]B. Matthäus and M. Musazcan Özcan, "Oil Content, Fatty Acid Composition and Distributions of Vitamin-E-Active Compounds of Some Fruit Seed Oils," Antioxidants, vol. 4, no. 1, pp. 124–133, Jan. 2015, doi: 10.3390/antiox4010124.

[35]K. L. Alharbi, J. Raman, and H.-J. Shin, "Date Fruit and Seed in Nutricosmetics," Cosmetics, vol. 8, no. 3, p. 59, Jun. 2021, doi: 10.3390/cosmetics8030059.

[36]P. Górnaś and M. Rudzińska, "Seeds recovered from industry by-products of nine fruit species with a high potential utility as a source of unconventional oil for biodiesel and cosmetic and pharmaceutical sectors," Ind. Crops Prod., vol. 83, pp. 329–338, May 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.01.021.

[37]R. G. Araújo, R. M. Rodriguez-Jasso, H. A. Ruiz, M. M. E. Pintado, and C. N. Aguilar, "Avocado by-products: Nutritional and functional properties," Trends Food Sci. Technol., vol. 80, pp. 51–60, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.tifs.2018.07.027.

[38]E. Yilmaz and B. A. Güneşer, "Cold pressed versus solvent extracted lemon (Citrus limon L.) seed oils: yield and properties," J. Food Sci. Technol., vol. 54, no. 7, pp. 1891–1900, Jun. 2017, doi: 10.1007/s13197-017-2622-8.

[39]E. Alves, A. Simoes, and M. R. Domingues, "Fruit seeds and their oils as promising sources of value-added lipids from agro-industrial byproducts: oil content, lipid composition, lipid analysis, biological activity and potential biotechnological applications," Crit. Rev. Food Sci. Nutr., vol. 61, no. 8, pp. 1305–1339, Apr. 2021, doi: 10.1080/10408398.2020.1757617.

[40]I. M. Martins et al., "Tannase enhances the anti-inflammatory effect of grape pomace in Caco-2 cells treated with IL-1β," J. Funct. Foods, vol. 29, pp. 69–76, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jff.2016.12.011.

[41]V. Manasa, A. Padmanabhan, and K. A. Anu Appaiah, "Utilization of coffee pulp waste for rapid recovery of pectin and polyphenols for sustainable material recycle," Waste Manag., vol. 120, pp. 762–771, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.10.045.

[42]P. A. R. Fernandes et al., "Apple Pomace Extract as a Sustainable Food Ingredient," Antioxidants, vol. 8, no. 6, p. 189, Jun. 2019, doi: 10.3390/antiox8060189.

[43]K. Kumar, A. N. Yadav, V. Kumar, P. Vyas, and H. S. Dhaliwal, "Food waste: a potential bioresource for extraction of nutraceuticals and bioactive compounds," Bioresour. Bioprocess., vol. 4, no. 1, p. 18, Dec. 2017, doi: 10.1186/s40643-017-0148-6.

[44]À. Casanova-Martí et al., "Grape seed proanthocyanidins influence gut microbiota and enteroendocrine secretions in female rats," Food Funct., vol. 9, no. 3, pp. 1672–1682, 2018, doi: 10.1039/C7FO02028G.

[45]A. C. B. Ribeiro et al., "From mango by-product to food packaging: Pectin-phenolic antioxidant films from mango peels," Int. J. Biol. Macromol., vol. 193, pp. 1138–1150, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.10.131.

[46]N. M. Ammar et al., "Protective Effects of Naringenin from Citrus sinensis (var. Valencia) Peels against CCl4-Induced Hepatic and Renal Injuries in Rats Assessed by Metabolomics, Histological and Biochemical Analyses," Nutrients, vol. 14, no. 4, p. 841, Feb. 2022, doi: 10.3390/nu14040841.

[47]B. R. Min, T. N. Barry, G. T. Attwood, and W. C. McNabb, "The effect of condensed tannins on the nutrition and health of ruminants fed fresh temperate forages: a review," Anim. Feed Sci. Technol., vol. 106, no. 1–4, pp. 3–19, Apr. 2003, doi: 10.1016/S0377-8401(03)00041-5.

[48]S. A. Salami et al., "Sustainability of feeding plant by-products: A review of the implications for ruminant meat production," Anim. Feed Sci. Technol., vol. 251, pp. 37–55, May 2019, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2019.02.006.

[49]K. M. Valadez-García et al., "Ferulic acid in animal feeding:

Mechanisms of action, productive benefits, and future perspectives in meat production," Food Biosci., vol. 43, p. 101247, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.fbio.2021.101247.
A. Görgüç, P. Özer, and F. M. Yılmaz, "Microwave-assisted enzymatic extraction of plant protein with antioxidant compounds from the food waste sesame bran: Comparative optimization study and identification of metabolomics using LC/Q-TOF/MS," J. Food Process. Preserv., vol. 44, no. 1, Jan. 2020, doi: 10.1111/jfpp.14304.
[51]M. K. I. Khan, M. Asif, Z. U. Razzaq, A. Nazir, and A. A. Maan, "Sustainable food industrial waste management through single cell protein production and characterization of protein enriched bread," Food Biosci., vol. 46, p. 101406, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.fbio.2021.101406.
[52]S. M. Yap, J. C.-W. Lan, P. E. Kee, H. S. Ng, and H. S. Yim, "Enhancement of protein production using synthetic brewery wastewater by Haematococcus pluvialis," J. Biotechnol., vol. 350, pp. 1–10, May 2022, doi: 10.1016/j.jbiotec.2022.03.008.
[53]B. L. Chua, S. F. Tang, A. Ali, and Y. H. Chow, "Optimisation of pectin production from dragon fruit peels waste: drying, extraction and characterisation studies," SN Appl. Sci., vol. 2, no. 4, p. 621, Apr. 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2415-y.
[54]K. Asgari, M. Labbafi, F. Khodaiyan, M. Kazemi, and S. S. Hosseini, "High-methylated pectin from walnut processing wastes as a potential resource: Ultrasound assisted extraction and physicochemical, structural and functional analysis," Int. J. Biol. Macromol., vol. 152, pp. 1274–1282, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.10.224.
[55]I. Benito-González, M. del M. Ortiz-Gimeno, A. López-Rubio, A. Martínez-Abad, A. Garrido-Fernández, and M. Martínez-Sanz, "Sustainable starch biocomposite films fully-based on white rice (Oryza sativa) agroindustrial by-products," Food Bioprod. Process., vol. 136, pp. 47–58, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.fbp.2022.09.008.
[56]A. T. Getachew, Y. J. Cho, and B. S. Chun, "Effect of pretreatments on isolation of bioactive polysaccharides from spent coffee grounds using subcritical water," Int. J. Biol. Macromol., vol. 109, pp. 711–719, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2017.12.120.
[57]L. Bruno de Sousa Sabino et al., "Polysaccharides from acerola, cashew apple, pineapple, mango and passion fruit co-products: Structure, cytotoxicity and gastroprotective effects," Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre, vol. 24, p. 100228, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.bcdf.2020.100228.
[58]J. J. Hora, E. R. Maydew, E. P. Lansky, and C. Dwivedi, "Chemopreventive Effects of Pomegranate Seed Oil on Skin Tumor Development in CD 1 Mice," J. Med. Food, vol. 6, no. 3, pp. 157–161, Oct. 2003, doi: 10.1089/10966200360716553.
[59]H.-L. Tian, P. Zhan, and K.-X. Li, "Analysis of components and study on antioxidant and antimicrobial activities of oil in apple seeds," Int. J. Food Sci. Nutr., vol. 61, no. 4, pp. 395–403, Jun. 2010, doi: 10.3109/09637480903535772.
[60]Y. Chen et al., "Antitumor activity of Annona squamosa seed oil," J. Ethnopharmacol., vol. 193, pp. 362–367, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jep.2016.08.036.
[61]N. Bouazzaoui, J. Bouajila, S. Camy, J. K. Mulengi, and J.-S. Condoret, "Fatty acid composition, cytotoxicity and anti-inflammatory evaluation of melon (Cucumis melo L. Inodorus) seed oil extracted by supercritical carbon dioxide," Sep. Sci. Technol., vol. 53, no. 16, pp. 2622–2627, Nov. 2018, doi: 10.1080/01496395.2018.1464579.
[62]M. I. Alkhalaf, W. S. Alansari, E. A. Ibrahim, and M. E. A. ELhalwagy, "Anti-oxidant, anti-inflammatory and anti-cancer activities of avocado (Persea americana) fruit and seed extract," J. King Saud Univ. - Sci., vol. 31, no. 4, pp. 1358–1362, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jksus.2018.10.010.
[63]E. Rojo-Gutiérrez, J. J. Buenrostro-Figueroa, L. X. López-Martínez, D. R. Sepúlveda, and R. Baeza-Jiménez, "Biotechnological Potential of Cottonseed, a By-Product of Cotton Production," in Valorisation of Agro-industrial Residues – Volume II: Non-Biological Approaches, Z. A. Zakaria, C. N. Aguilar, R. D. Kusumaningtyas, and P. Binod, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 63–82. doi: 10.1007/978-3-030-39208-6_3.
[64]F. Chaudhry et al., "Extraction and Evaluation of the Antimicrobial Activity of Polyphenols from Banana Peels Employing Different Extraction Techniques," Separations, vol. 9, no. 7, p. 165, Jun. 2022, doi: 10.3390/separations9070165.
[65]L. Sepúlveda et al., "Ellagic acid production using polyphenols from orange peel waste by submerged fermentation," Electron. J. Biotechnol., vol. 43, pp. 1–7, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ejbt.2019.11.002.
[66]M. Perra et al., "Combining Different Approaches for Grape Pomace Valorization: Polyphenols Extraction and Composting of the Exhausted Biomass," Sustainability, vol. 14, no. 17, p. 10690, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141710690.

Cómo citar este artículo:

SALAZAR-LÓPEZ, N. J., ENRÍQUEZ-VALENCIA, S. A., ZUÑIGA MARTÍNEZ, B. S., & GUSTAVO A. GONZÁLEZ-AGUILAR, G. A. (2023). Residuos agroindustriales como fuente de nutrientes y compuestos fenólicos. EPISTEMUS, 17(34).
https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.265

La Supremacía del Número Uno

The Supremacy of the Number One

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Rodrigo González González [1]
Roberto Núñez González [2]
Rodrigo Iván González Valenzuela [3]

Recibido: 22 / 11 / 2022
Aceptado: 29 / 03 / 2023
Publicado: 20 / 04 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.275

Autor de Correspondencia:
Rodrigo González González
Correo: rodrigo.gonzalez@unison.mx

Resumen

En este escrito se presenta de forma general una curiosidad matemática que rápidamente llama la atención per se, la cual describe un patrón peculiar que cumplen los primeros dígitos de datos obtenidos de diversas situaciones ordinarias y de muchos procesos reales, conocida como Ley de Benford o Fenómeno de los Dígitos Significativos. Además de analizar y reproducir el cumplimiento de este singular principio matemático que siguen los dígitos significativos para algunos ejemplos típicos encontrados en la literatura, se analiza también la validez de esta ley en casos de interés particular y se describen posibles aplicaciones potenciales.

Palabras clave: ley de Benford, dígitos significativos, validación de información, Simon Newcomb.

Abstract

In this paper, it is presented (in a general way) a mathematical curiosity that quickly attracts attention per se. It describes a peculiar pattern, known as Benford's Law or the Significant-Digit Phenomenon, that the first digits of data obtained from various ordinary situations and many real processes comply. In addition to analyzing and reproducing the compliance of this singular mathematical principle, that are followed by the significant digits for some typical examples found in the literature, the validity of this law in cases of particular interest is also analyzed and possible potential applications are described.

Keywords: *benford´s Law, significant digits, information validation, Simon Newcomb*.

1 Ph.D (Doctor of Philosophy in Physics and Mathematics), Departamento de Matemáticas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, rodrigo.gonzalez@unison.mx, https://orcid.org/0000-0002-1178-0562
2 Dr. (Doctor en Ciencias en Física de Materiales), Departamento de Matemáticas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, roberto.nunez@unison.mx, https://orcid.org/0000-0001-7202-2549.
3 IME (Ingeniero en Mecatrónica) y Estudiante de la Maestría en Ciencias de Datos, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, ivanglz98@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-2570-1984

INTRODUCCIÓN

La *Ley de Benford* describe el comportamiento que siguen los dígitos significativos (primera, segunda, tercera, ..., k-ésima posición en una cifra) de una secuencia determinada de números suficientemente grande, la cual establece que alrededor del 30% de tales dígitos empiezan con el número **1**, aproximadamente el 18% con el número 2, y así sucesivamente hasta 5% que empiezan con el número 9 (la figura 1 ilustra esquemáticamente este hecho). La Ley de Benford también se conoce como *Distribución Logarítmica*.

Figura 1. Distribución Benford

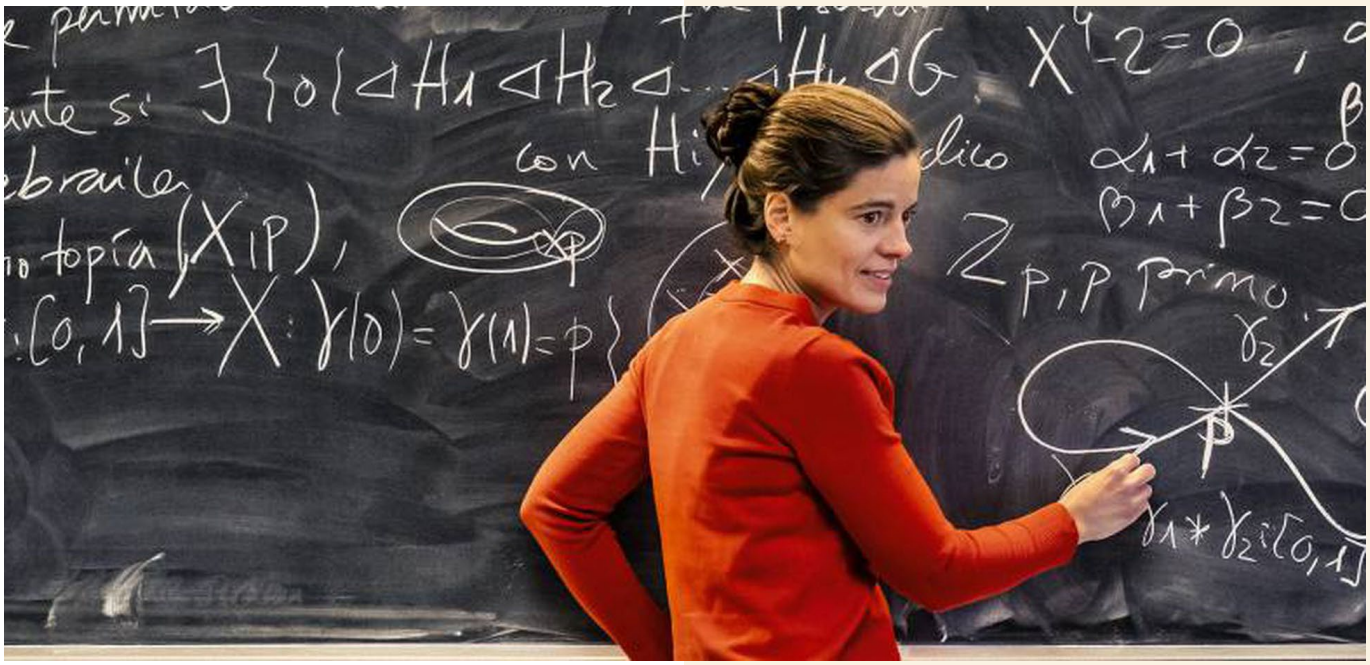
Nota del Primer Autor. El primer contacto con esta interesante propiedad matemática fue hace algunos años, en una amena plática impartida en la Universidad de Costa Rica por el Dr. Theodore Preston Hill (Ted Hill), profesor investigador del Departamento de Matemáticas en el Instituto Tecnológico de Georgia, quien es uno de los principales precursores y contribuidor formal de la teoría y aplicación de esta ley matemática.

En particular, esta característica distintiva me pareció sumamente interesante y digna de ser compartida a un público general y fue el propio Ted Hill, quien (después de abordarlo al finalizar la plática y posteriormente contactarlo vía correo electrónico) al conocer mi interés de profundizar, aplicar y divulgar esta fascinante particularidad de los números, me animó a darle forma para publicarla en nuestro idioma con un lenguaje sencillo, para que no solo sea de dominio científico o académico, sino accesible a todo lector. Posteriormente, el tema atrajo la atención del segundo autor quien, junto con el estudiante de la Maestría en Ciencias de Datos y tercer autor, se sumaron y contribuyeron con la implementación de los algoritmos en lenguaje de programación Python para ejecutar los cálculos y verificar los resultados.

UN POCO DE HISTORIA

Esta regla matemática fue descubierta empíricamente hace poco más de 100 años y, de acuerdo a algunas investigaciones (citadas en [2, 3, 4, 9, 11]), a ésta se sujeta una impresionante variedad de secuencias de números obtenidas de fuentes reales de información cotidianas. Por ejemplo, listas de precios de supermercado, información numérica de extractos de periódicos y revistas, datos de censos y entrevistas, medidas en observaciones realizadas en laboratorios u originadas por procesos reales y sistemas dinámicos, series de tiempo, estadísticas deportivas y estudios de mercado, entre muchas otras más.

La Ley de Benford, después de muchos años de ser considerada solo como una curiosidad matemática, en la década de los noventa empezó a cobrar un serio interés por investigadores y usuarios de distintas áreas. En particular, cautivó nuestra atención y el objetivo es utilizarla como filtro primario en el análisis de datos de interés específico.



Una aplicación importante que ha tenido la Ley de Benford es principalmente en la detección de información fraudulenta. Hoy en día la utilidad de la Ley de Benford es equiparable al hecho que, *en principio, el invento del teflón no fue ideado para aplicarse en los utensilios de cocina antiadherentes, pero se hizo y resultó de gran beneficio.* Y lo mejor de todo es que no es necesario ser un erudito en la materia para utilizarla, casi en la misma proporción que es posible hablar del tiempo, sin saber cómo se construye un reloj o entender el funcionamiento del celular, sin necesariamente haberlo inventado o fabricado.

La primera observación sobre el comportamiento de los dígitos significativos fue una nota escrita (de dos páginas) por el astrónomo estadounidense Simon Newcomb [1], en la que hizo referencia a un "extraño capricho" encontrado en varios libros o tablas de logaritmos en algunas bibliotecas; los cuales en ese tiempo eran ampliamente utilizados por científicos y estudiantes para realizar sus cálculos. La observación de Newcomb fue que "las primeras páginas de tales documentos estaban más sucias que las restantes", lo cual significa que el uso de las primeras páginas fue manifiestamente mayor que el de las últimas. Esto le permitió deducir que aparentemente los dígitos iniciales de los números que utilizaron de tales tablas no son equiprobables (como comúnmente se pensaría, con probabilidad de 1/9 o equivalentemente 11.11%), sino que el número 1 aparece como dígito inicial más frecuente, seguido del número 2, y así sucesivamente hasta el número 9 que es el de menor frecuencia de aparición como dígito inicial. La explicación obvia fue desconcertante: por alguna razón la gente hace más cálculos con números que empiezan con 1 que con 8 o 9. De hecho, a partir de un argumento heurístico, Newcomb proporcionó una fórmula simple que describe el patrón observado, la cual se expresa a continuación.

"Al parecer la naturaleza tiene predilección en ordenar los números de tal forma que la proporción de números que empiezan con el primer dígito D_1 es igual a

$$\text{Prob}(D_1=d_1)=\log_{10}(d_1+1)-\log_{10}(d_1)=\log_{10}\left(1+\frac{1}{d_1}\right),\ d_1\in\{1,2,\dots,9\} \quad (1)$$

(aquí, allá y acullá)".

Además, se tiene que la probabilidad de que un dígito dado esté en la segunda posición es

$$\text{Prob}(D_2=d_2)=\sum_{d_1=1}^{9}\log_{10}\left(1+\frac{1}{10d_1+d_2}\right),\ d_2\in\{0,1,2,\dots,9\} \quad (2)$$

Mientras que para la tercera posición

$$\text{Prob}(D_3=d_3)=\sum_{d_1=1}^{9}\sum_{d_2=0}^{9}\log_{10}\left(1+\frac{1}{d_1d_2d_3}\right),\ d_3\in\{0,1,2,\dots,9\} \quad (3)$$

donde $1/d_1d_2d_3=(100\cdot d_1+10\cdot d_2+d_3)^{-1}$, así como también las fórmulas correspondientes para las demás posiciones consecutivas. Para la justificación formal de estas fórmulas referirse, por ejemplo, a [2, 4].

Por otra parte, para los primeros dos dígitos se tiene que

$$\text{Prob}(D_1D_2=d_1d_2)=\log_{10}\left(1+\frac{1}{d_1d_2}\right),\ d_1d_2\in\{10,11,12,\dots,99\} \quad (4)$$

y, en general,

$$\text{Prob}(D_1=d_1,D_2=d_2,\dots,D_m=d_m)=\log_{10}\left(1+\left(\sum_{j=1}^{m}10^{m-j}d_j\right)^{-1}\right) \quad (5)$$

donde $D_1, D_2, D_3, D_4, \dots$ representa el primero, segundo, tercero, cuarto, etc., dígito decimal significativo, respectivamente, y con m un entero positivo que define los bloques iniciales de dígitos significativos $d_1d_2\cdots d_m$, con $d_1\in\{1,2,\dots,9\}$ y $d_j\in\{0,1,2,\dots,9\},\ j\geq 2$..

También es posible trabajar con probabilidad condicional, entre otros conceptos relacionados.

En la tabla 1 se incluyen las probabilidades de ocurrencia para los primeros cuatro dígitos significativos, mismas que se obtuvieron al utilizar las fórmulas respectivas, verificando el resultado presentado en [2]. Además, enseguida se presentan ejemplos específicos.

Tabla 1. Probabilidad porcentual de los primeros cuatro dígitos significativos

d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\text{Prob}(D_1 = d)$	0	30.10	17.60	12.49	9.69	7.91	6.69	5.79	5.11	4.57
$\text{Prob}(D_2 = d)$	11.96	11.38	10.88	10.43	10.03	9.66	9.33	9.03	8.75	8.49
$\text{Prob}(D_3 = d)$	10.17	10.13	10.09	10.05	10.01	9.97	9.94	9.90	9.86	9.82
$\text{Prob}(D_4 = d)$	10.01	10.01	10.00	10.00	10.00	9.99	9.99	9.99	9.98	9.98

Ejemplos particulares de las operaciones anteriores:

a) Probabilidad de que un número tenga los tres primeros dígitos del número $\pi = 3.1415926536\ldots$

$$\text{Prob}(D_1 = 3, D_2 = 1, D_3 = 4) = \log_{10}\left(1 + \frac{1}{314}\right) = \log_{10}\frac{315}{314} = 0.00138$$

b) Probabilidad (incondicional) de que el segundo dígito sea igual a 1

$$\text{Prob}(D_2 = 1) = \sum_{k=1}^{9} \log_{10}\left(1 + \frac{1}{10k+1}\right) = \log_{10}\frac{6029312}{4638501} = 0.11389$$

c) Probabilidad (condicional) de que el segundo dígito también sea igual a 1

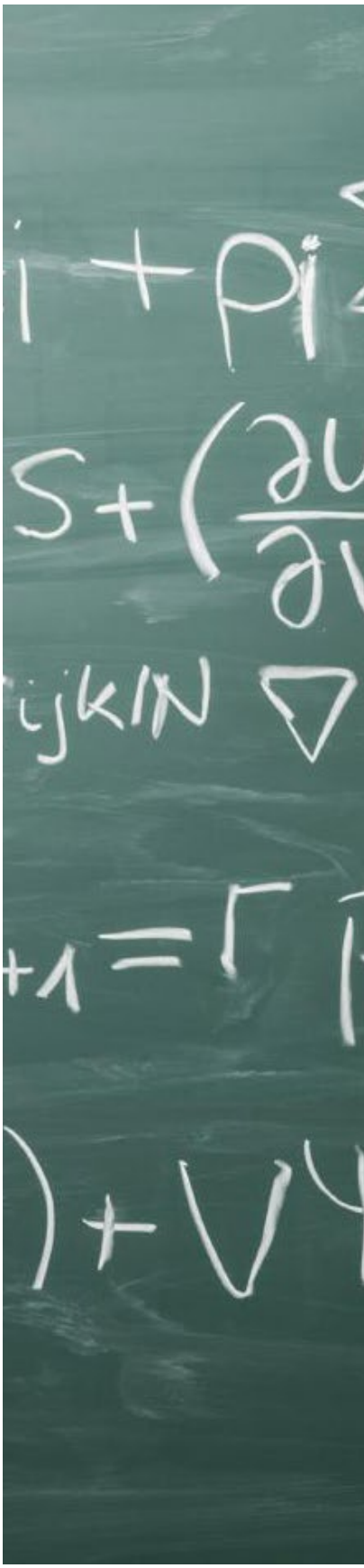
$$\text{Prob}(D_2 = 1 \mid D_1 = 1) = \frac{\log_{10}12 - \log_{10}11}{\log_{10}2} = 0.12553\ldots$$

LEY DE BENFORD

No teniendo un argumento convincente, el artículo de Newcomb no fue de gran interés y el efecto de las páginas sucias de las tablas logarítmicas quedó en el olvido por más de medio siglo. Hasta que en 1938, Frank A. Benford [5], un físico que trabajaba para la Compañía General Electric en Estados Unidos, redescubrió tal efecto y se dio a la tarea de analizar grandes cantidades de datos obtenidos en distintos procesos: números que aparecían en periódicos y revistas, registros de drenado de presas en varios estados de la Unión Americana, áreas sembradas en terrenos agrícolas, información de censos de muchos condados, entre otros. Sin embargo, al igual que Newcomb, Benford tampoco tuvo una buena explicación del por qué se tenía el cumplimiento de esta singular ley de distribución de los dígitos para muchos fenómenos naturales.

¿Por qué Frank Benford mantuvo su interés centrado en este tema? Es algo que nadie sabe con certeza; es un hecho que se pierde en la historia. Sin embargo, su *hobby* consumía mucho tiempo (sobre todo en esa época en la que aún no existían computadoras ni calculadoras); dedicaba horas y horas a veces haciendo más de 20,000 cálculos enteramente a mano [2]. Su fascinación por la Matemática tenía poco que ver con la aplicación potencial que su pasatiempo pudiera llegar a tener, pero como alguien dijo por ahí: *"las matemáticas son leales"* (queriendo decir *reales*), y ¡sí que lo son! ¡Los números no mienten! La Matemática es leal y útil para analizar cualquier proceso real.

Finalmente, a partir de la última década del siglo XX, la Ley de Benford logró captar el interés de varios investigadores (de hecho, la base de datos Benford actualmente cuenta con más de 1,000 entradas de artículos, libros, software y videos) y se consolidó con el trabajo del Dr. Mark J. Nigrini [4], profesor de la West Virginia University, quien es conocido por sus contribuciones en auditoría y contabilidad para la detección de anomalías en los datos de empresas y del gobierno de los Estados Unidos (como la evasión de impuestos fiscales, alteración de nóminas, variación de precios de fábrica, aplicación errónea de pólizas de seguros, falsificación de patentes, malversación de cuentas gubernamentales, entre otras). Otro destacado investigador, quien demostró formalmente varios teoremas en relación con la Ley de Benford, es el Dr. Ted Hill [2], además de una larga lista de investigadores y aficionados que en los últimos años se han interesado y sumado en aplicar este principio en diversas áreas [6,11].



CARACTERÍSTICAS DE LA LEY DE BENFORD

A continuación, se listan algunos hechos y propiedades que satisface la Ley de Benford, cuya justificación se encuentra en las referencias [2-4].

- ¡Los dígitos significativos son dependientes (y no independientes, como pudiera esperarse)!
- ¡La Ley de Benford es invariante bajo escala, base y adición!
- ¡La Ley de Benford es sensible a la manipulación por redondeo!
- ¡La Distribución Benford es la distribución de distribuciones! (Teorema de Hill, 1996).
- ¡La distribución logarítmica particular (monótona decreciente), aunque no es universal, su alcance en la aplicación es sorprendente y en un primer vistazo se le encuentra en una amplia literatura: estadística, matemática, economía, ingeniería y de aficionados!
- ¡La Ley de Benford tiene muchas más caracterizaciones matemáticas!

¡Se invita al lector a investigar otras características interesantes!

VERIFICACIÓN DE LA LEY DE BENFORD

En esta sección se analizan varios conjuntos de datos para verificar si cumplen o no la Ley de Benford. La variedad de ejemplos a seleccionar es amplia; sin embargo, debido al espacio e interés personal, el trabajo se enfoca en analizar la interrelación que tiene la Ley de Benford con la Teoría de Sistemas Dinámicos, muchos de los cuales se encuentran en la literatura, inclusive casos de sistemas caóticos, ver por ejemplo Tolle [6], cuyos resultados muestran la relación directa o indirecta que cumplen las coordenadas de las trayectorias en cuanto a la Ley de Benford. En particular, consideramos tres sistemas dinámicos clásicos para una elección adecuada de sus parámetros. Por otra parte, se verifica la Ley de Benford para la Sucesión de Fibonacci y se analiza una base de datos con altimetría de la Tierra, la cual contiene millones de valores.

1. Sistemas Dinámicos

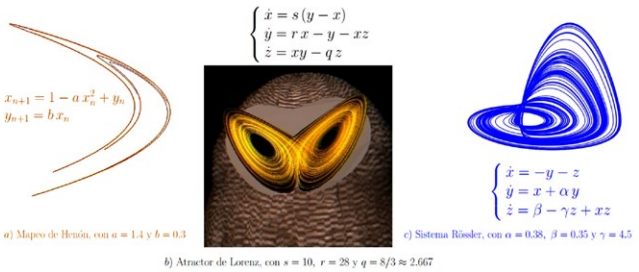
a) Mapeo de Henón. El mapeo de Henón (figura 2*a*)) es un sistema de ecuaciones discreto con dos grados de libertad que genera estados que no cumplen la Distribución Benford para la elección predeterminada de algunos valores de los parámetros del sistema.

Se deja como ejercicio analizar el comportamiento del sistema en cuanto a Benford para otras elecciones de los valores de los parámetros y concluir al respecto.

b) Atractor "extraño" de Lorenz. El conocido atractor caótico de Lorenz, generado por el sistema 3-dimensional de ecuaciones diferenciales no lineales descritas en la figura 2*b*), para valores específicos de los parámetros involucrados satisface la Ley de Benford con diferente grado de error para cada una de las coordenadas. Se observa que aun cuando la solución para algunos valores de los parámetros no sigue de cerca la distribución Benford, la predominancia del número uno en la primera posición prevalece.

c) Sistema Rössler. El sistema continuo 3-dimensional (figura 2*c*), cuya gráfica se ilustra con escalas ajustadas), para la elección de ciertos valores específicos de los parámetros tiende a cumplir la distribución uniforme, mientras que para otros "simpatiza" con Benford.

Nota: La integración numérica para Henón, Lorenz y Rössler se realizó con un número considerable de iteraciones, diferente para cada caso, generando pares (x, y) o ternas (x, y, z) , cuyos resultados se guardaron en matrices de porcentajes de ocurrencia con las que se realizó el análisis gráfico-estadístico correspondiente y la conclusión respectiva.



a) Mapeo de Henón, con $a = 1.4$ y $b = 0.3$

b) Atractor de Lorenz, con $s = 10$, $r = 28$ y $q = 8/3 \approx 2.667$

c) Sistema Rössler, con $\alpha = 0.38$, $\beta = 0.35$ y $\gamma = 4.5$

Figura 2. Sistemas caóticos clásicos

2. Prototipo en Matemáticas. Un ejercicio interesante es analizar la *Sucesión de Fibonacci*, $\{f_n\}$, definida de forma recursiva mediante las condiciones:

$$f_1 = 1, f_2 = 1, \ldots, f_{n+2} = f_{n+1} + f_n\,, \quad n \geq 1 \qquad (6)$$

Esto es, a partir del tercer paso el término correspondiente se obtiene sumando los dos términos previos consecutivos.

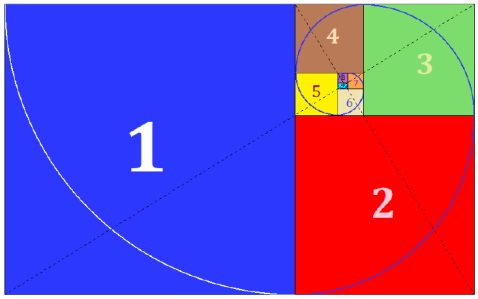
Nota: Esta sucesión de números surge, por ejemplo, al considerar la cría de conejos en un medio confinado con recursos suficientes, entre otros procesos naturales. Por otro lado, la Sucesión de Fibonacci está estrechamente relacionada con la *razón aurea* o *número de oro*,

$$\varphi = \lim_{n\to\infty} \frac{f_{n+1}}{f_n} = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \approx 1.6180339887\ldots$$

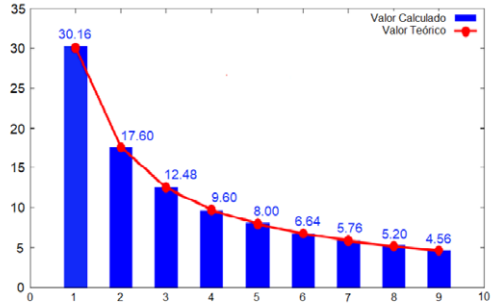
la cual está presente en muchas situaciones y aplicaciones reales, por ejemplo, en Geometría, Arquitectura, Ingeniería, Biología, Artes, entre otras.

Al realizar el cómputo, primero para $n = 1001$ y analizar los datos generados, el conjunto de datos obtenido cumple satisfactoriamente la Ley de Benford. En el rango considerado hay 301 entradas que inician con el número 1, que representan el 30.07%, 177 inician con el número 2

(17.68%), 125 con el número 3 (12.48%), 96 con 4 (9.59%), 80 con 5 (7.99%), 67 con 6 (6.69%), 57 con 7 (5.69%), 53 con 8 (5.29%) y 45 con 9 (4.49%), lo cual aproxima a los valores del primer renglón de la tabla 1 con un margen de error pequeño (el proceso se resume en la figura 3*a*) de una forma típica representativa).



a) Primer dígito significativo en la Sucesión Fibonacci



b) Porcentajes de ocurrencia (1250 iteraciones)

Figura 3. Ley de Benford en la Sucesión de Fibonacci

Observación: Un mayor número de iteraciones estabiliza la aproximación, pero el tamaño de las cifras de los valores generados se incrementa de forma considerable y se tornan difíciles de manipular. Por ejemplo, al aumentar las iteraciones a 1250 se tiene una mejor aproximación al resultado teórico (figura 3*b*)), pero las magnitudes de las últimas cifras son muy grandes.

Base de datos ETOPO1. Como aplicación específica se analizó una base de datos que contiene alrededor de **233,312,401** registros de las alturas sobre (+) y debajo (-) del nivel del mar en una malla que cubre la superficie del globo terráqueo. Esta es la base de datos **ETOPO1**, un modelo de relieve global de 1 minuto de arco de la superficie de la Tierra que integra la topografía terrestre y la batimetría oceánica, construido a partir de conjuntos de datos mundiales y regionales, la cual es de dominio público. Es importante observar que ya está disponible una actualización de esta base (resolución a 15 segundos de arco), para repetir el análisis y obtener conclusiones. Al realizar nuestro análisis, utilizamos la versión "Bedrock" de la base de datos ETOPO 1, la cual contiene la topografía terrestre y del fondo del océano sin considerar la capa de hielo de los polos, obtenida de la página oficial NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)/ NCEI (National Centers for Environmental Information), https://www.ncei.noaa.gov/ (citada en [7]). Para realizar el presente ejercicio, se consideraron solo los valores positivos (elevaciones sobre el nivel del mar). La tendencia encontrada es que las elevaciones se concentran mayormente en aquellas en las que predomina el número 1 como primer dígito (1-2 m, 10-20 m, 100-200 m y principalmente 1000-2000 m), seguida de las que inician con 2, 3, 4, y así sucesivamente. En la figura 4 se ilustra la distribución de porcentaje de ocurrencia para

cada número en la primera posición de las alturas registradas (base de datos Bedrock de ETOPO1).

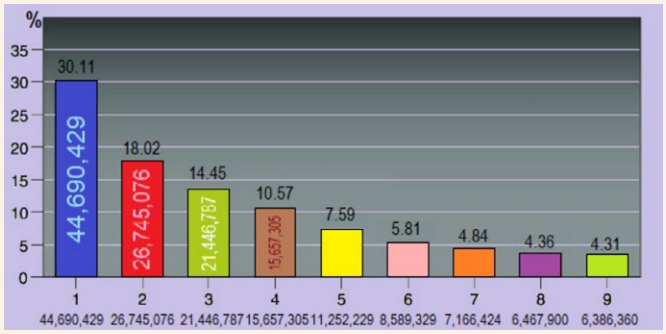


Figura 4. Porcentaje de alturas sobre el nivel del mar según el primer dígito significativo

Nota Importante. Los datos de la batimetría oceánica también fueron analizados y se observó que no cumplen la Ley de Benford, lo cual puede deberse a que hubo algún tipo de interferencia del mar sobre las lecturas de los dispositivos con los que se realizaron las medidas o se aplicó algún método de interpolación o ajuste para profundidades inaccesibles.

Figura 5. Elevación y profundidad sobre el nivel del mar (base de datos ETOPO1)

CONCLUSIONES

Además de ser útil como herramienta auxiliar en el análisis y validación de datos obtenidos de sistemas dinámicos, ecuaciones diferenciales y en diferencias, teoría de matrices, métodos numéricos, series de tiempo y bases de datos de interés específico disponibles, hay otros trabajos relacionados con la Ley de Benford, tal como el descubrimiento de errores informáticos (computer bugs), detección de información errónea o fraudulenta [4, 9], aplicación en el diseño y diagnóstico de modelos matemáticos de interés específico [10], entre otros [7, 11].

Aun cuando la Ley de Benford no es una varita mágica para resolver cualquier problema, así como no lo es ninguna otra técnica o resultado matemático, esta puede llegar a ser de gran utilidad en el estudio de muchas situaciones importantes. Por lo tanto, vale la pena su estudio formal y aplicación o simplemente considerarla como pasatiempo, al igual como la tuvo en su momento Frank Benford, sumado a que actualmente se dispone de recursos de cómputo de vanguardia para un mejor y confiable análisis de bases de datos de distintas situaciones y procesos.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos profundamente al Dr. Ted Hill por haber presentado y motivado el estudio de esta maravilla matemática, generando la oportunidad de asegurar que la Matemática, además de ser exacta y complicada, también es interesante, importante, poderosa, útil, y relativamente simple o lúdica, a diferencia de la creencia común que se tiene sobre ésta. Nuestro más sincero agradecimiento al Departamento de Matemáticas y Universidad de Sonora por el estímulo y apoyo para la realización de este tipo de actividad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] S. Newcomb. "Note on the Frequency of Use of the Different Digits in Natural Numbers", American Journal of Mathematics, Vol.4, No.1/4 (1881), pp.39-40. DOI:10.2307/2369148.
[2] A. Berger and T.P. Hill. An Introduction to Benford's Law, Princeton University Press. 2015. DOI: 10.1515/9781400866588
[3] S.J. Miller. Benford's Law. Theory and Applications, Princeton University Press. 2015. DOI: 10.1515/9781400866595
[4] M.J. Nigrini. Benford's Law. Applications for Forensic Accounting, Auditing and Fraud Detection, John Wiley & Sons, Inc. 2012. DOI: 10.1002/9781119203094
[5] F.A. Benford. "The Law of Anomalous Numbers", Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 78, No.4 (1938), pp.551-572.
[6] C.R. Tolle, J.L. Budzien and R.A. LaViolette. "Do Dynamical Systems follow Benford's Law?", Physics Today. Chaos, Vol.10, No.2 (2000), pp.331-336. DOI: 10.1063/1.166498
[7] C. Amante and B. W. Eakins. ETOPO1, 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19 pp, March 2009. http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/docs/ETOPO1.pdf
[8] T.A. Mir and M. Ausloos. "Benford's law: a 'sleeping beauty' sleeping in the dirty pages of logarithmic tables", Journal of the Association for Information Science and Technology 69(3). (2018), pp. 349–358. DOI:10.1002/asi.23845
[9] P.Y. Leonov, V.P. Suyts, A.N. Norkina, V.M. Sushkov. "Integrated application of Benford's Law tests to detect corporate fraud". Procedia Computer Science, V.213 (2022), pp. 332-337. DOI: 10.1016/j.procs.2022.11.075
[10] G. Whyman. "Origin, Alternative Expressions of Newcomb-Benford Law and Deviations of Digit Frequencies", Applied Mathematics, 12 (2021). pp. 576-586. DOI: 10.4236/am.2021.127041
[11] D. Crisan, A. Irimia, D. Gota, L. Miclea, A. Puscasiu, O. Stan, H. Valean. "Analyzing Benford's Law's", Powerful Applications in Image Forensics. Appl. Sci. 11, 11482. (2021). https://doi.org/10.3390/app112311482

Cómo citar este artículo:

González González, R., Núñez González, R., & González Valenzuela, R. I. (2023). La Supremacía del Número Uno. EPISTEMUS, 17(34).
https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.275

Harina de larva de mosca soldado negro y de organismos unicelulares como alternativas proteicas para alimentos acuícolas

Black Soldier Fly Larvae and Single Cell Meals as Alternative Protein Sources for Aquafeeds

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Martin Perez-Velazquez [1]
Hugo Cañedo-Orihuela [2]
Reyna D. Félix-Berumen [3]
Mayra L. González-Félix* [4]

Recibido: 1 / 12 / 2022
Aceptado: 16 / 05 / 2023
Publicado: 16 / 06 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.280

Autor de Correspondencia:
Mayra L. González-Félix
Correo: mayra.gonzalez@unison.mx

Resumen

La búsqueda de ingredientes alternativos a la harina de pescado para su inclusión en alimento balanceado utilizado para el cultivo de organismos acuáticos es una tarea importante para la sustentabilidad de la acuacultura, una industria que satisface la demanda de alimentos acuáticos para el consumo humano. La harina de larva de mosca soldado negro y de organismos unicelulares como bacterias y levaduras, presentan contenidos de proteína relativamente altos, perfiles de amino ácidos favorables y se producen utilizando subproductos o residuos orgánicos de origen animal o vegetal, por lo que su producción es sustentable y de bajo costo, en comparación con la harina de pescado. El presente artículo de divulgación tiene por objeto dar a conocer las características más relevantes de estos insumos alternativos, así como mostrar algunos de los ejemplos más significativos de su utilización en alimentos balanceados para el cultivo de especies de importancia comercial.

Palabras clave: clave: Ingredientes alternativos, Acuacultura, Reemplazo, Harina de pescado.

Abstract

Searching for alternative ingredients to replace fishmeal in balanced feeds for the culture of aquatic organisms is a relevant task to promote the sustainability of aquaculture, an industry that satisfies the demand for aquatic foods for human consumption. Black soldier fly larvae meal and single cell protein meals such as those from bacteria and yeasts, have relatively high protein contents, favorable amino acid profiles, and can be produced using by-products or organic residues from animal or vegetable sources; therefore, their production is sustainable and low-priced, as compared to that of fishmeal. This non scholarly article is intended to divulge the most relevant features of these alternative feedstuffs, and to show some of the most significant examples of their use in balanced feeds for cultured species of commercial relevance.

Keywords: *alternative ingredients, Aquaculture, Replacement, Fish meal.*

1 Dr. en Nutrición Acuícola, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, martin.perez@unison.mx, ORCID: 0000-0002-9019-1220
2 Candidato a Doctor, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, hugocanori@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2303-4046
3 Estudiante de Maestría, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, dayhanafb@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8279-4945
4 Dra. en Nutrición Acuícola, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, mayra.gonzalez@unison.mx, ORCID: 0000-0003-1886-4096

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de ingredientes alternativos a la harina de pescado para su inclusión en alimento balanceado para el cultivo de organismos acuáticos constituye una de las tareas que ocupan la atención de un gran número de investigadores alrededor del mundo. Una labor difícil, pues la harina de pescado ha sido una de las principales fuentes proteicas utilizadas en acuacultura por décadas, y es muy apreciada por poseer un alto contenido proteico, un perfil de aminoácidos (AA) no solo adecuado sino también deseable, y que además contribuye ácidos grasos esenciales altamente insaturados de la familia omega-3 en la fracción de grasa remanente que contiene [1]. Su uso, sin embargo, está asociado con una acción no sostenible que deriva de la sobreexplotación de pesquerías como la anchoveta peruana (Engraulis ringens) y el arenque del del Atlántico (Brevoortia tyrannus), entre otros. Ello, aunado a su alto costo (tabla 1), han promovido el cada vez menor uso de este insumo en la manufactura de alimento balanceado para el sector acuícola [2]. Otros insumos proteicos alternativos para reemplazar la harina de pescado, además de ser sustentables y de menor costo (tabla 1), deben estar disponibles para utilizarse en un país o región particular; no obstante, cuando se lanza al mercado un nuevo ingrediente, su disponibilidad se incrementará paulatinamente a medida que su utilización se divulgue o propague.

El requerimiento proteico de un organismo corresponde cercanamente con el requerimiento de AA esenciales específicos, así como a una necesidad no específica de grupos amino (nitrógeno no específico) para la síntesis de AA no esenciales, la contribución de AA para satisfacer requerimientos energéticos y otras necesidades metabólicas del organismo [1]. Los componentes nitrogenados presentes en un alimento balanceado, además de proteína y AA, incluyen también compuestos como ácidos nucleicos, aminas, urea, amoníaco, nitratos, nitritos, fosfolípidos y glucósidos nitrogenados. La

contribución al contenido total de N de cada ingrediente proteico es muy variable, por lo tanto, la proteína cruda (PC) y la proteína digerible de un alimento balanceado dependerá de la mezcla de sus ingredientes proteicos que difieren en su naturaleza bioquímica y valor nutricional [3] (tabla 2 [4, 5, 6]). El uso de nuevos insumos proteicos requiere entonces de un proceso de evaluación cuando se ofrecen en el alimento de alguna especie acuícola cultivada, principalmente en términos del desempeño biológico como el crecimiento y supervivencia, así como la eficiencia en la utilización de la nueva fuente de proteína dietaria usada.

Este trabajo pretende contribuir a divulgar las principales características, ventajas y desventajas de dos fuentes proteicas que están recibiendo gran atención en la industria acuícola como alternativas a la harina de pescado, la harina de la larva de mosca soldado negro (Hermetia illucens) y la harina de organismos unicelulares (single cell protein o SCP, por sus siglas en inglés). Así mismo, se examinarán resultados recientes de su utilización en dietas para especies de importancia comercial.

HARINA DE LARVA DE MOSCA SOLDADO NEGRO (HLMSN)

La mosca soldado negro, *H. illucens*, es un díptero con la capacidad de transformar residuos orgánicos en proteína de alta calidad. No se considera una peste y no es portadora

de bacterias que puedan representar un riesgo para la salud, al contrario de la mosca común *Musca domestica* [7], de manera que es apta para utilizarse en alimentos acuícolas. Su contenido de PC disminuye conforme avanza su edad, por lo que la larva es la fase del desarrollo utilizada para la producción de harina [8].

Tabla 1. Precio de ingredientes proteicos utilizados en alimento acuícola en 2022.

Ingredientes proteicos	Precio (US dólares por tonelada métrica)
Harina de pescado (67% PC)	$1,745.96
Harina de subproductos de pollo (67% PC)	$698.00
Harina de gluten de maíz (60% PC)	$603.00
Harina de sangre (80% PC)	$450.00
Harina de soya (48% PC)	$445.00
Harina de plumas (82%)	$347.00
Harina de larva de mosca soldado negro (55% PC)	$312.00
Harina de carne y hueso, porcina (50% PC)	$285.00
Harina de subproductos de pollo (57% PC)	$277.00
Harina de carne y hueso, rumiantes (50% PC)	$239.00

% PC= porcentaje de proteína cruda. Información disponible el 24/marzo/2023 en Feedstuffs (www.feedstuffs.com) **y el US Department of Agriculture Animal By-product Feedstuff Report (www.ams.usda.gov).**

Tabla 2. Contenido proteico (% PC) y perfil de aminoácidos (g/100 g de PC) de harinas de pescado, larva de mosca soldado negro (HLMSN) y de organismos unicelulares (SCP; bacteria).

	Harina de pescado (anchoveta)	HLMSN	SCP Lactobacillus acidophilus
Proteína cruda (%)	64.6	60.0	69.0
Aminoácidos esenciales (g/100 g de proteína cruda)			
Arginina	5.7	5.0	5.1
Histidina	2.4	3.3	2.4
Treonina	4.4	4.1	4.0
Metionina	3.0	7.9	1.9
Valina	5.4	1.2	4.9
Fenilalanina	4.1	4.6	3.3
Isoleucina	4.7	2.6	4.3
Leucina	7.7	2.9	7.4
Lisina	7.9	4.7	10.4
Triptófano	1.2	0.72	4.0

La HLMSN (figura 1) presenta un alto contenido proteico, entre 37 y 63% y puede contener entre 7 y 39% de grasa cruda y 9 a 28% de ceniza, diferencias influenciadas por el sustrato utilizado para su cultivo, su contenido

energético y la densidad de siembra. Un mayor contenido energético en el sustrato genera mayor contenido de grasa, mientras que un menor contenido energético genera mayor contenido proteico, por lo que se ha evaluado principalmente para sustituir fuentes de proteína en la engorda de cerdos, pollos y en la acuacultura [7, 9].

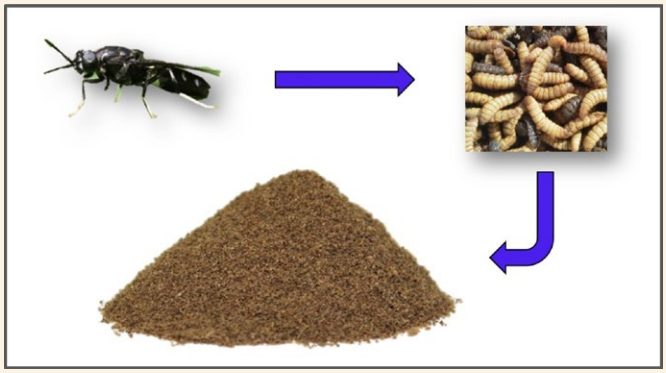


Figura 1. Harina de larva de mosca soldado negro.

Entre los posibles anti-nutrientes presentes en este insumo está la quitina, un biopolímero complejo del exoesqueleto de insectos que es de difícil digestión, lo que se relaciona con la disminución de la digestibilidad del alimento para peces y limita el porcentaje de reemplazo de harina de pescado que puede lograrse para algunas especies [10]. Por otra parte, es deficiente en metionina y cistina [7] y posee un alto contenido de grasa (24.5 a 45%), con ácido láurico (12:0) como el ácido graso más predominante (21 a 49% del total de ácidos grasos) que puede modificar el perfil lipídico de los tejidos del pez, por ello es recomendable el uso de HLMSN desgrasada para la sustitución de harina de pescado [11]. La HLMSN representa una fuente de proteína sustentable pues permite reciclar desechos orgánicos como excremento de cerdo o pollo, desechos alimenticios de cocinas o restaurantes, granos de desecho de cervecerías o café molido y otros subproductos; se logra una conversión de hasta un 25% del sustrato en proteína de alta calidad con un bajo costo, reduciendo el impacto ambiental de desechos y generando menor cantidad de residuos.

El cultivo de la mosca soldado negro es relativamente sencillo y rápido, ya que el ciclo de vida del organismo es de apenas 45 días, y al huevo le toma aproximadamente 18 días alcanzar la etapa larvaria. El cultivo puede ser implementado en zonas remotas con difícil acceso o realizarse en traspatios, utilizando estructuras semejantes a invernaderos cerrados con ventilación y con camas, paneles o bandejas para contener los residuos orgánicos y las larvas. Incluso puede realizarse en naves cerradas con condiciones ambientales controladas de mayor costo, pero con mayor producción. La cosecha de las larvas puede ser manual, aunque hoy en día existen separadores mecánicos que agilizan el proceso, al que sigue el secado en horno a aproximadamente 50ºC por 24-36 horas, la molienda y la extracción mecánica de grasa para generar la harina (figura 1), el aceite y residuos utilizados como fertilizante orgánico [12, 13].

En la trucha arcoíris *Onchorynchus mikyss*, se logró el reemplazo del 50% de harina de pescado por HLMSN sin afectar la supervivencia ni el crecimiento, y sin comprometer el rendimiento del filete [14]; el mismo nivel de reemplazo fue también aceptado por alevines de tilapia del Nilo *Oreochromis niloticus* [12]. La carpa común *Cyprinus carpio* variedad Jian, aceptó hasta 75% de reemplazo de harina de pescado por HLMSN desgrasada sin afectar el crecimiento, pero inclusiones superiores generaron afectaciones intestinales y estrés [15]. En el esturión siberiano *Acipenser baerii*, solo se pudo reemplazar un 25%, pues sustituciones superiores disminuyeron la digestibilidad y crecimiento [16]. En el rodaballo *Psetta maxima*, sustituciones de harina de pescado por HLMSN superiores al 33% disminuyeron la digestibilidad, la retención de proteína y el crecimiento [10]. El reemplazo de harina de pescado por HLMSN también se ha evaluado en otras especies como el salmón común *Salmo salar*, bagre africano *Clarias gariepinus*, bagre amarillo *Pelteobagrus fulvidraco*, lubina *Dicentrarchus labrax*, lubina japonesa *Lates calcarifer* y *L. japonicus*, anguila arrocera *Monopterus albus*, pez guppy *Poecilia reticulata*, lubina negra *Micropterus salmonides* y dorada *Sparus aurata*, entre otras [17].

HARINA DE ORGANISMOS UNICELULARES: BACTERIAS

La proteína de origen unicelular bacteriana (SCP bacteriano) (figura 2) tiene un contenido de PC que puede variar generalmente entre 60 y 70%, con AA esenciales y ácidos nucleicos libres presentes, además de vitaminas y minerales. La PC puede diferir dependiendo del microorganismo seleccionado, el medio de cultivo o sustrato, o la tecnología de preparación de la biomasa resultante. Por ejemplo, el contenido de PC puede ampliarse en un rango entre 50 y 83%, pero en general, tanto el perfil de AA como la digestibilidad del SCP bacteriano, es muy similar al de la harina de pescado [18].

No suele contener niveles nocivos de toxinas o factores anti-nutricionales que limiten su uso en la acuacultura, aunque ciertas especies de bacterias pueden producir exotoxinas o endotoxinas que limitan su uso como SCP, pero pueden ser destruidas por calentamiento [19]. Debido a la rápida proliferación celular, las bacterias poseen un alto contenido de ácidos nucleicos que pudieran causar cálculos renales y vesicales en especies longevas, por lo que se recomienda su uso en animales de vida corta; sin embargo, también pueden reducirse con tratamiento térmico o mediante hidrólisis [18]. Es importante asegurar la pureza del sustrato de cultivo, pues se corre el riesgo de que las bacterias puedan absorber metales pesados o sustancias nocivas de la fuente de carbono [20].

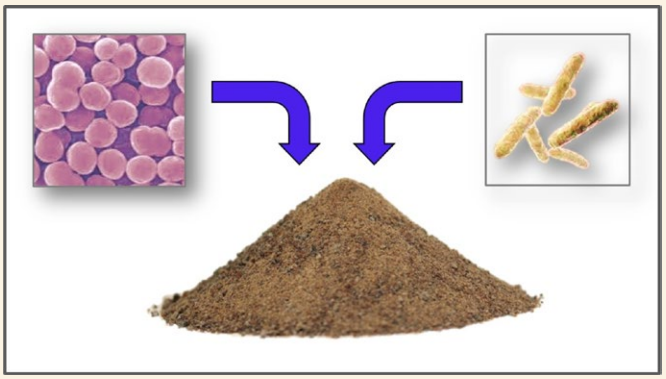


Figura 2. Harina de SCP de bacteria.

Una ventaja del uso de SCP bacteriano es que su producción no depende de variaciones estacionales o climáticas, lo que permite su producción durante todo el año en condiciones controladas. En contraste, la producción de proteína de origen vegetal e incluso animal puede verse afectada por el clima, la disponibilidad de agua y requiere una gran superficie territorial. Al igual que la HLMSN, la fabricación de SCP bacteriano utiliza como sustratos de cultivo subproductos o residuos orgánicos de origen animal o vegetal desechados por actividades agrícolas, comerciales e industriales, por lo que también promueve la conversión de residuos y mitiga la acumulación de desechos, lo que genera una fuente proteica alternativa en forma sustentable a un bajo costo [20].

En *M. salmonides*, a una inclusión de 8.6% de SCP bacteriano de *Methylococcus capsulatus*, se logró el reemplazo de un 10% de harina de pescado en la dieta sin afectar su desempeño biológico, pero inclusiones mayores afectaron el crecimiento y dañaron el grosor de la pared intestinal y la altura de los *villi* intestinales [21]. El SCP bacteriano de *M. capsulatus*, *Alcaligenes acidovorans*, *Bacillus brevis* y *B. firmus*, promovió un buen desempeño en el crecimiento de una variedad de *O. niloticus* mejorada genéticamente utilizando inclusiones de hasta 8.5% de la dieta [22]. En alevines de *O. mykiss* se reportó un reemplazo

exitoso de 50% de harina de pescado con SPC bacteriano (PL68®, Intraco Ltd., Belgium) obtenido como subproducto de la fermentación de materia prima vegetal durante la producción de ácido glutámico monosódico, pero niveles de reemplazo superiores afectaron negativamente el crecimiento, el consumo de alimento y el perfil de AA y ácidos grasos del filete [23]. En alimento de post-larvas de camarón blanco del Pacífico, *Litopenaeus vannamei*, se reportó un efecto benéfico con el reemplazo de entre 10 y 20% de harina de pescado por SCP bacteriano de *Corynebacterium ammoniagenes*, mejorando parámetros de producción y el contenido de PC en músculo [24].

HARINA DE ORGANISMOS UNICELULARES: LEVADURAS

El uso de levaduras y de otros miembros unicelulares del reino de los hongos (Fungi) con fines nutricionales ha sido explorado ampliamente para organismos terrestres y para consumo humano. Por ejemplo, la levadura *Saccharomyces cerevisiae* ha sido utilizada históricamente por el ser humano para la elaboración de pan y cerveza. La levadura y sus extractos han sido comercializados por más de un siglo para consumo humano directo en productos tales como Vegemite® (Bega Cheese Ltd.), Marmite® (Unilever and Sanitarium Health Food), Cenovis® (Gustav Gerig AG) y Vitam-R® (VITAM Hefe-Produkt GmbH) [20]. El uso de estos organismos como harina de SCP también ha sido investigado, revelando un atractivo contenido de proteína de 30 a 50%, y un perfil de AA que cumple con estándares de la FAO, con altos contenidos de lisina y treonina, pero a veces bajos en metionina y cisteína. Además, el SCP de levaduras (figura 3) contiene nutrientes como riboflavina, niacina, tiamina, biotina, ácido pantoténico, colina, piridoxina, ácido benzoico y ácido fólico, entre otros. Por otra parte, el contenido de ácidos nucleicos es de 7 a 10%; se considera demasiado alto para consumo humano e incluso para organismos cultivados,

por lo que se ha sugerido la aplicación de procesos industriales para reducirlos [25].

En cuanto al uso de SCP de levaduras para alimentos acuícolas, se observaron pobres resultados en el crecimiento del *S. salar* al utilizar SCP de *S. cerevisiae*. En cambio, fue posible reemplazar hasta 40% de harina de pescado en su dieta sin afectar el crecimiento y el aprovechamiento de nutrientes al emplear SCP de *Candida utilis* y *Kluyveromyces marxianus* [26]. Para *L. vannamei*, utilizando *S. cerevisiae*, fue posible reemplazar desde 15 a 24% de harina de pescado, o hasta 24% de harina de soya en la dieta de esta especie sin reducir el crecimiento [27]. Así mismo, se observó crecimiento adecuado de *L. vannamei* al utilizar *C. utilis* en un nivel de inclusión de 50% de la dieta [28]. Finalmente, en un estudio reciente con *O. niloticus*, se encontró que la forma inactiva de *S. cerevisiae* producida con un sustrato co-producto de la fermentación de maíz para la producción de etanol, no solamente reemplazó por completo la harina de pescado en la dieta de juveniles, también mejoró la eficiencia alimenticia y no causó alteraciones del tracto gastrointestinal al analizarse histológicamente [29].

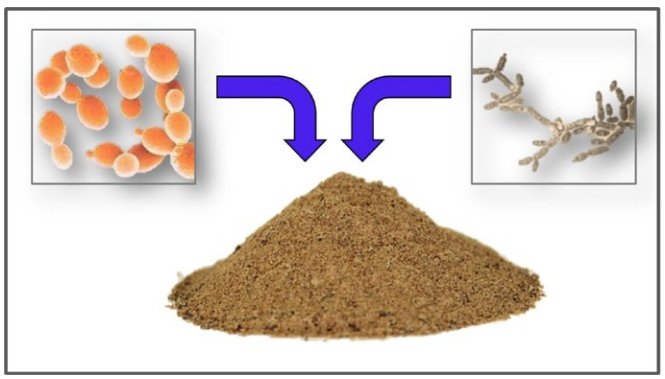


Figura 3. Harina de SCP de levadura.

CONCLUSIONES

El abastecimiento de proteína es un problema que el ser humano debe solucionar para su subsistencia, por lo que la creación y desarrollo de fuentes proteicas alternativas constituye un esfuerzo importante para atender este problema. Específicamente en acuacultura, el reemplazo de la harina de pescado en alimentos balanceados es una tarea imprescindible para beneficio de la salud de los océanos del mundo, sobrexplotados desde hace décadas. También porque es un recurso limitado que no satisface la creciente demanda de alimentos para la producción de organismos acuáticos. La harina de larva de mosca soldado negro y las harinas de organismos unicelulares como bacterias y levaduras son alternativas de insumos proteicos que comparten características como presentar contenidos de proteína relativamente altos y perfiles de AA favorables que se acercan a los requerimientos de diversas especies acuícolas. A diferencia de la harina de pescado, estos insumos se producen utilizando subproductos, co-productos o residuos orgánicos de origen animal o vegetal, provenientes de actividades agrícolas, comerciales e industriales, por lo que su producción es sustentable y de menor costo. Aunque por largo tiempo habían sido considerados alternativas proteicas promisorias o prospectos interesantes, actualmente son producidos por algunas compañías alrededor del mundo y existe ya un cúmulo de evidencias experimentales acerca de los beneficios y aplicaciones para un número cada vez mayor de especies acuáticas, por lo que el presente y futuro de estos insumos es sin duda alentador para la sustentabilidad de la acuacultura y para contribuir a la generación de alimento acuático con proteína de alta calidad para consumo humano.

BIBLIOGRAFÍA

[1] National Research Council (NRC), "Nutrient Requirements of Fish and Shrimp," Washington, D.C.: The National Academies Press, 2011, pp. 70–71, DOI: https://doi.org/10.17226/130.39

[2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), "The State of World Fisheries and Aquaculture", Rome, 2020, pp. 1–244, DOI: https://doi.org/10.4060/ca9229en

[3] M. Marotti, D. Tome, and P. P. Mirand, "Converting nitrogen into protein-beyond 6.25 and Jones' Factors," Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2008, vol. 48, pp. 177–184. DOI: http://10.1080/10408390701279749

[4] National Research Council (NRC), "Nutrient Requirements of Swine," Washington, D.C.: The National Academies Press, 1998, pp. 124-141, ISBN 9780309132640

[5] M. Shumo, I. M. Osuga, F. M. Khamis, C. M. Tanga, K. K. Fiaboe, S. Subramanian, S. Ekesi, A. van Huis, and C. Borgemeister, "The nutritive value od black soldier fly larvae reared on common organic waste streams in Kenya," Scientific Reports, 2019, vol. 9, pp. 1-13. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-019-46603-z

[6] M. D. Erdman, W. G. Bergen, and C. Adinarayana Reddy, "Amino acid profiles and presumptive nutritional assestment of Single-Cell Protein from certain Lactobacilli," Applied and Environmental Microbiology, 1977, vol. 33, pp. 901-905. 10.1128/aem.33.4.901-905.1977

[7] K. B. Barragan-Fonseca, M. Dicke, and J. J. A. van Loon, "Nutritinal value of the black soldier fly (Hermetia illucens L.) and its suitability as animal feed – a review," Journal of Insects as Food and Feed, 2017, vol. 3, pp. 105–120. DOI: https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055

[8] R. Rachmawati, D. Buchori, P. Hidayat, S. Hem, and M. R. Fahmi, "Perkembangan dan kandungan nutrisi larva Hermetia illucens (Linnaeus)(Diptera: Stratiomyidae) pada bungkil kelapa sawit". Jurnal Entomologi Indonesia, 2010, vol. 7, pp. 28–41. DOI: https://doi.org/10.5994/jei.7.1.28

[9] K. B. Barragan-Fonseca, M. Dicke, and J. J. A. van Loon, "Influence of larval density and dietary nutrient concentration on performance, body protein, and fat contents of black soldier fly larvae (Hermetia illucens)," Entomologia Experimentalis et Applicata, 2018, vol.166(9),

pp. 761–770. DOI: https://doi.org/10.1111/eea.12716
[10] S. Kroeckel, A. G. E. Harjes, I. Roth, H. Katz, S. Wuertz, A. Susenbeth, and C. Schulz, "When a turbot catches a fly: Evaluation of a pre-pupae meal of the Black Soldier Fly (Hermetia illucens) as fish meal substitute - Growth performance and chitin degradation in juvenile turbot (Psetta maxima)," Aquaculture, 2012, vol. 364–365, pp. 345–352. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2012.08.041
[11] A. Benzertiha, B. Kierończyk, M. Rawski, Z. Mikołajczak, A. Urbański, L. Nogowski, and D. Józefiak, "Insect Fat in Animal Nutrition – A Review," Annals of Animal Science, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 1217–1240. DOI: https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0076
[12] K. M. Rana, M. A. Salam, and M. Ariful-Islam M., "Development of black soldier fly larvae production technique as an alternate fish feed," International Journal of Research in Fisheries and Aquaculture, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 41–47.
[13] A. Gougbedji, P. Agbohessou, P. Laleye, F. Francis, and R. Caparros-Megido R., "Technical basis for the small-scale production of black soldier fly, Hermetia illucens (L. 1758), meal as fish feed in Benin. Journal of Agriculture and Food Research, 2021, vol. 4., pp. 100153, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100153
[14] L. Bruni, R. Pastorelli, C. Viti, L. Gasco, and G. Parisi, "Characterisation of the intestinal microbial communities of rainbow trout (Onchorhynchus mykiss) fed with Hermetia ilucens (black soldier fly) partially defatted larva meal as partial dietary protein source," Aquaculture, 2018, vol. 487, pp. 56–63, DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.01.006
[15] S. Li, H. Ji, B. Zhang, J. Zhou, and H. Yu, "Defatted black soldier fly (Hermetia illucens) larvae meal in diets for juvenile Jian carp (Cyprinus carpio var. Jian): Growth performance, antioxidant enzyme activities, digestive enzyme activities, intestine and hepatopancreas histological structure," Aquaculture, 2017, vol. 477, pp. 62–70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2017.04.015
[16] C. Caimi, M. Renna, C. Luissiana, A. Bonaldo, M. Gariglio, M. Meneguz, S. Dabbou, A. Schiavone, F. Gai, A. Concetta-Elia, M. Prearo, and L.Gasco, "First insights on black soldier fly (Hermetia illucens L.) larva meal dietary administration in Siberia sturgeon (Acipneser baerii Brandt) juveniles," Aquaculture, 2020, vol. 515, pp. 734539, DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734539
[17] K. Mohan, D. K. Rajan, T. Muralisankar, A. R. Ganesan, P. Satishkumar, and N. Revathi, "Use of black soldier fly (Hermetia illucens L.) larvae meal in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry: A review of past and future needs," Aquaculture, 2022, vol. 553, pp. 738095 DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738095
[18] P. J. Strong, S. Xie, and W. P. Clarke, "Methane as a resource: can the methanotrophs add value?," Environmental Science & Technology, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 4001–4018, DOI: https://doi.org/10.1021/es504242n
[19] R. Rudravaram, A. Chandel, L. V. Rao, Y. Hui, and P. Ravindra, "Bio (Single Cell) protein: issues of production, toxins and commercialization status," in Agricultural Wastes, Eds G. S. Ashworth and P. Azevedo, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009, pp. 129–153.
[20] A. Ritala, S. Häkkinen, M. Toivari, and M. Wiebe, "Single Cell Protein–State-of-the-Art, Industrial Landscape and Patents 2001–2016," Frontiers in Microbiology, 2017, vol., 8, pp. 1–18, DOI: https://doi.org./10.3389/fmicb.2017.02009
[21] Q. Zhang, H. Liang, M. Longshaw, J. Wang, X. Ge, J. Zhu, S. Li, and M. Ren, "Effects of replacing fishmeal with methanotroph (Methylococcus capsulatus, Bath) bacteria meal (FeedKind®) on growth and intestinal health status of juvenile largemouth bass (Micropterus salmoides)," Fish and Shellfish Immunology, 2022, vol. 122, pp. 298–305. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.02.008
[22]M. K. H. Chama, H. Liang, D. Huang, X. De, M. Ren, L. Zhang, L. Wu, and J. Ke, "Methanotroph (Methylococcus capsulatus, Bath) as an alternative protein source for genetically improved farmed tilapia (GIFT: Oreochromis niloticus) and its effect on antioxidants and immune response," Aquaculture Reports, 2021, vol. 21, pp. 100872. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100872
[23]A. Zamani, M. Khajavi, M. H. Nazarpak, and E. Gisbert, "Evaluation of a Bacterial Single-Cell Protein in Compound Diets for Rainbow Trout (Oncorhynchus mykiss) Fry as an Alternative Protein Source," Animals, 2020, vol.10 no. 9, pp. 1676, DOI: https://doi.org/10.3390/ani10091676
[24]A. Hamidoghli, H. Yun, S. Won, S. Kim., N. Farris, and S. C. Bai, "Evaluation of a single-cell protein as a dietary fish meal substitute for whiteleg shrimp Litopenaeus vannamei," Fisheries Science, 2018, vol. 85, pp. 147–155, DOI: https://doi.org/10.1007/s12562-018-1275-5
[25]A. T. Nasseri, S. Rasoul-Amini, M. H. Morowvat, and Y. Ghasemi, "Single cell protein: production and process," American Journal of Food Technology, 2011, vol. 6, pp. 103–116. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02009
[26]J. O. Hansen, M. Hofossaeter, C. Sahlmann, R. Anestad, F. E. Reveco-Urzua, C. M. Press, L. T. Mydland, and M. Overland, "Effect of Candida utilis on growth and intestinal health of Atlantic salmon (Salmo salar) parr," Aquaculture, 2019, vol. 511, pp. 734239, DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734239
[27]J. Guo, X. Qiu, X., G. Salze, D. A. Davis, "Use of high-protein brewer's yeast products in practical diets for the Pacific white shrimp Litopenaeus vannamei," Aquaculture Nutrition, 2019, vol. 25, pp. 680–690. DOI: https://doi.org/10.1111/anu.12889
[28]J. Gamboa-Delgado, B. Fernandez-Diaz, M. G. Nieto-Lopez, L. E. Cruz-Suarez, "Nutritional contribution of torula yeast and fish meal to the growth of shrimp Litopenaeus vannamei as indicated by natural nitrogen stable isotopes," Aquaculture, 2015, vol. 453, pp. 116–121, DOI: https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.11.026
[29]R. Yossa, A. M. Greiling, R. K. Basiita, M. E. Sakala, W. A. Baumgartner, A. Taylor, D. M. Gatlin III, "Replacing fishmeal with a single cell protein feedstuff in Nile tilapia Oreochromis niloticus diets," Animal Feed Science and Technology, 2021, vol. 281, pp., 115089. DOI: https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2021.115089

Cómo citar este artículo:

Perez-Velazquez, M., Cañedo-Orihuela, H., Félix-Berumen, R. D., & González-Félix, M. L. (2023). Harina de larva de mosca soldado negro y de organismos unicelulares como alternativas proteicas para alimentos acuícolas. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.280

Lixiviación de calcopirita con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en medio oxidante

Chalcopyrite Leaching with Ethylenediaminetetraacetic Acid (EDTA) in Oxidizing Medium

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Carlos Uriel Mendez-Velasco[1]
Dandy Calla-Choque* [2]
Joshua Emmanuel Fuentes-Rubio [3]
Mauricio Joaquin Reyna-Robelo [4]

Recibido: 20 / 11 / 2022
Aceptado: 20 / 02 / 2023
Publicado: 06 / 03 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.274

Autor de Correspondencia:
Dandy Calla Choque
Correo: dcalla@unam.mx

Resumen

El cobre en la naturaleza se presenta en forma predominante como complejos sulfurados, calcopirita ($CuFeS_2$), bornita (Cu_5FeS_4) y calcosina (Cu_2S). La recuperación de cobre a partir de calcopirita por lixiviación es un proceso complicado debido a la estabilidad química de este mineral y conlleva el uso de sistemas complejos para el tratamiento en tiempos prolongados. En este trabajo se presenta una alternativa para la lixiviación de calcopirita a condiciones contraladas con la finalidad de evaluar el efecto pH, concentración de EDTA y peróxido de hidrógeno para la recuperación de cobre. Con ayuda de un diseño factorial se busca optimizar el proceso de recuperación de cobre con una menor disolución de hierro. De acuerdo con los resultados experimentales, una baja concentración de EDTA (0.0006 M) promueve la disolución selectiva de cobre (20.04%) y una baja disolución hierro (0.2%) a pH 4.5 y temperatura ambiente.

Palabras clave: calcopirita, Hidrometalurgia, Lixiviación, EDTA.

Abstract

In nature, copper is presented predominantly as sulfide complexes, chalcopyrite ($CuFeS_2$), bornite (Cu_5FeS_4), and chalcocite (Cu_2S). Copper recovery from chalcopyrite by leaching is difficult due to chemical stability and involves using complex systems for long-term treatment. In the present work, an alternative for leaching chalcopyrite under controlled conditions is presented to evaluate the effect of pH, EDTA concentration, and hydrogen peroxide on copper recovery. With the help of a factorial design, the aim is to optimize the copper recovery process with less iron dissolution. According to the experimental results, a low concentration of EDTA (0.0006 M) promotes the selective dissolution of copper (20.04%) and low dissolution of iron (0.2%) at pH 4.5 and room temperature.

Keywords: *chalcopyrite, Hydrometallurgy, Leaching, EDTA.*

1 Egresado de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, cumv2395@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-8198-4923
*2 * Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, dcalla@unam.mx https://orcid.org/0000-0003-2848-4388*
3 Egresado de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, josfuentes135@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-3689-0733
4 Egresado de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, mauricio67@comunidad.unam.mx, https://orcid.org/0000-0002-9034-7459

INTRODUCCIÓN

La principal propiedad del cobre es la conductividad eléctrica y en el siglo XXI prácticamente se ha garantizado su uso en aplicaciones eléctricas y electrónicas. El cobre tiene mayor fuerza y resistencia a la fatiga y es menos propenso a la corrosión. En aplicaciones no eléctricas, la característica más explotada del cobre es la transferencia de calor, en la infraestructura, el cobre sigue siendo un material idóneo por su compacidad y también su facilidad de unión por soldadura, maleabilidad, conductividad y ductilidad. En forma de aleación, su buena resistencia a la tracción, se combinan para convertirlo en un metal versátil, cuando está aleado con zinc permite la formación del latón, el cuál es lo suficientemente dúctil en caliente y permite forjar formas intrincadas como válvulas y grifos; cuando está frío, exhibe características de mecanizado buenas para que sea utilizado como estándar [1]. En los últimos años, la demanda de cobre ha crecido rápidamente como resultado del aumento de la población mundial, de las economías emergentes y la búsqueda de una sociedad sostenible [2]. En la naturaleza, el cobre se presenta como minerales, malaquita ($Cu_2(OH)_2CO_3$), cuprita (Cu_2O), calcopirita ($CuFeS_2$), calcocita (Cu_2S), covelita (CuS) y cobre nativo (Cu) [3]. La calcopirita ($CuFeS_2$) es uno de los minerales de cobre, más abundantes, representando aproximadamente el 70% del cobre en la Tierra [4].

La extracción hidrometalúrgica de cobre a partir de calcopirita se considera más económica y amigable con el medio ambiente que la extracción pirometalúrgica, especialmente cuando los minerales de sulfuro que contienen cobre presente en menas de baja ley [5]. El procesamiento del cobre a partir de este tipo de sulfuros de baja ley es limitado debido a la naturaleza refractaria durante la lixiviación de la calcopirita [6]; por lo que, actualmente se utilizan procesos de tratamiento de minerales con la finalidad de obtener un concentrado de cobre que es tratado por la vía pirometalúrgica hasta la obtención del cobre metálico. El principio químico para la extracción convencional de cobre a partir de $CuFeS_2$ es la oxidación selectiva de los iones sulfuro (S) con oxígeno para la formación de dióxido de azufre (SO_2) en forma gaseosa y cobre metálico como producto. Esta ruta requiere del manejo SO_2 para la conversión en ácido sulfúrico, además se puede llegar a azufre elemental, pero implica la disociación térmica y reacción de los minerales sulfurados con SO_2 [7]. Por la complejidad del método, se están trabajando en algunas alternativas donde se reduzca la generación de gases, por lo que el procesamiento hidrometalúrgico de la calcopirita sigue siendo un área atractiva para su procesamiento. Los trabajos de investigación son importantes debido a que los mecanismos presentes en este tipo de sistemas son poco conocidos para cada medio acuoso. Se pueden seguir diferentes rutas para el tratamiento hidrometalúrgico de la calcopirita, estos incluyen el tratamiento térmico previo a la lixiviación, la lixiviación directa y la electrolixiviación química [8], por biolixiviación (BRISA, Biolixiviación Rápida Indirecta con Separación de Acciones), en dos etapas, una etapa química y una biológica [9]. En los últimos años, se ha estudiado a la lixiviación de calcopirita con amoníaco, debido a la mayor selectividad del amoniaco para la disolución de cobre en relación al ácido sulfúrico, especialmente para minerales que contienen carbonatos. En la lixiviación amoniacal se forma complejo $Cu(NH_3)_4^{2+}$ en función del pH, donde la extracción de cobre puede ser baja a pH menor que 9, además el pH de la solución es difícil de controlar debido a la evaporación del amoníaco [10]. Por otro lado, el uso de ácido clorhídrico, puede llegar

a ser más efectivo que el sulfúrico en la lixiviación de calcopirita, sin embargo, es muy poco utilizado en la industria debido a su alto costo, corrosividad y alta volatilidad [11]. Además, se han utilizado agentes orgánicos para la formación de complejos con el cobre como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en la lixiviación de calcopirita, este agente orgánico puede formar complejos estables con varios elementos como el hierro y cobre, sin embargo, es necesario el uso de dos etapas con la finalidad de obtener una solución de cobre con baja concentración de hierro. En este sentido, en la primera etapa se puede usar ácido oxálico para disolver el hierro y precipitar el cobre en una sal de oxalato; finalmente, en una segunda etapa se promueve la lixiviación del residuo con ácido sulfúrico (H_2SO_4), peróxido (H_2O_2), etilenglicol ($C_2H_6O_2$) y EDTA para obtener el cobre en forma iónica [12].

El diseño factorial se utiliza para estudiar el efecto de la interacción de los factores en la respuesta (% de recuperación de cobre y % de disolución de hierro). La contribución de cada efecto de interacción se demuestra a través del diseño factorial tomando en consideración varios factores (pH, EDTA y H_2O_2), con este enfoque evaluará no solo el efecto de las variables en la respuesta, sino también la característica de respuesta. El diseño factorial permite la evaluación de los efectos de los factores principales y las interacciones de los diferentes factores [13], a medida que aumenta la cantidad de factores a considerar se expande rápidamente los recursos para los experimentos. Por lo que se han propuesto diseños factoriales fraccionados (FrFD) para detectar el efecto de los factores e identificar que variables tienen un efecto significativo en el proceso [14], se puede reducir la cantidad de experimentos sin pérdida de información sobre los efectos principales [15]. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos de la lixiviación de cobre con EDTA a partir de calcopirita con un diseño factorial fraccionado $3^{(3-1)}$, variando el pH, la concentración del EDTA y peróxido de hidrogeno (H_2O_2).

METODOLOGÍA

Caracterización

Durante el desarrollo experimental se utilizaron cristales de calcopirita como mineral de cabeza a un tamaño de partícula entre -45 µm (malla 375) y +53 µm (malla 375). La determinación de las especies mineralógicas se realizó en un analizador portátil XRD-XRF TERRA, Olympus, en un intervalo angular de 5º a 55º con un escaneo de 100 exposiciones de 20 segundos cada una con una fuente de radiación de cobalto. La identificación se llevó a cabo con ayuda del software XPowder Ver. 2010.01.35 PRO y una base de datos PDF2. Los reactivos utilizados son de grado analítico, HNO_3 (MEYER®), HCl (MEYER®). Para la caracterización cuantitativa de los elementos presentes en la muestra, se pesó el mineral en una balanza analítica (Ohaus®) y la digestión ácida se realizó en un vaso de precipitados de 250 mL con agua regia, sobre una parrilla eléctrica (Ohaus®) para incrementar la temperatura. La relación de los ácidos HNO_3 y HCl fue de 3:1. Durante la cuantificación de metales en solución se empleó el método instrumental de espectroscopía de absorción atómica (SpectrAA 220 Varian).

Sistema de lixiviación

En el sistema de lixiviación se utilizó un agitador mecánico (CAFRAMO BDC-250), una parrilla eléctrica (OHAUS®), un medidor multiparámetro (Hanna S5521), vaso de precipitados de 250 mL (PYREX®), tubos de ensayo (PYREX®) una micropipeta de 5 ml (Omega®) y reactivos de grado analítico, EDTA (MEYER®), H_2SO_4 (MEYER®), $Ca(OH)_2$ (MEYER®) y H_2O_2 (MEYER®).

Para las pruebas de lixiviación de la calcopirita en presencia de EDTA, se utilizó el agitador mecánico para favorecer la cinética de reacción, la parrilla eléctrica para el control de temperatura y un medidor multiparámetro para las lecturas de pH, ORP y temperatura. En el vaso de precipitados de 250 mL se llevaron a cabo los procesos de lixiviación con 100 mL de solución y 60 mg de mineral a diferente concentración de peróxido (H_2O_2) y EDTA. El peróxido se adicionó cada media hora hasta llegar a la concentración propuesta en el desarrollo experimental, el pH del sistema se reguló con alícuotas de H_2SO_4 diluido y $Ca(OH)_2$ de acuerdo al pH propuesto y se tomaron alícuotas a tiempos determinados. Se utilizo el $Ca(OH)_2$ por su bajo costo industrial.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Para evaluar los tres efectos propuestos (EDTA, H_2O_2, pH) en este sistema de lixiviación, se realizó un diseño factorial de 3^{3-1}. El diseño factorial completo (3^3) se descartó

con la finalidad de disminuir la cantidad de pruebas a la mitad sin perder la representatividad. El diseño factorial $3^{(3-1)}$ plantea realizar 27 pruebas en dos bloques: bloque 1 (pruebas) y bloque 2 (réplicas). Los niveles y factores se presentan en la tabla 1, donde se muestran los niveles bajo, medio y alto con la finalidad de evaluar los efectos de EDTA, H_2O_2 y pH. Además, se pretende obtener la media, desviación estándar, el mínimo, el máximo y los cuartiles a fin de obtener más información con respecto al comportamiento del sistema.

Tabla 1. Matriz de factores y niveles

	Prueba		
Factor	**Bajo (1)**	**Medio (2)**	**Alto (3)**
EDTA (M)	0.0006	0.006	0.06
H_2O_2 (M)	0.2	0.4	0.6
pH	4	4.5	5

Las especies presentes en el sistema propuesto fueron identificadas con ayuda de los diagramas de distribución de especies y predominancia realizados en el Software Medusa, considerando los equilibrios de la base de datos de Hydra [16].

RESULTADOS

CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

El mineral se caracterizó por difracción de rayos X, donde se identificó a la calcopirita ($CuFeS_2$) como mineral principal (93.3%) con trazas de una fase amorfa - cristalina no identificada (6.7%, figura 1), la determinación del contenido metálico se realizó por espectroscopia de absorción atómica, se tiene 30.3% Cu y 26.75% Fe (tabla 2).

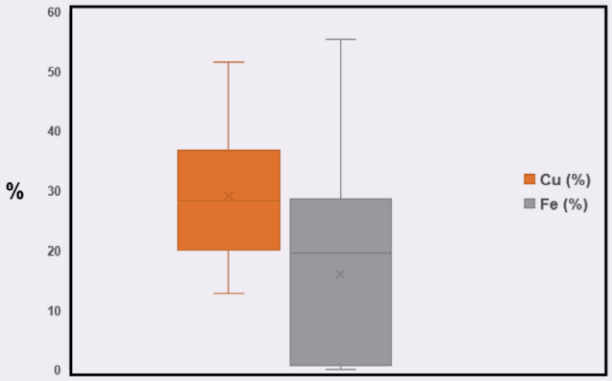


Figura 1. Difractograma del mineral de cabeza

Tabla 2. Leyes de cabeza

Contenido metálico	
Cu (%)	Fe (%)
30.3	26.75

DISEÑO EXPERIMENTAL

El resultado de las pruebas de lixiviación en un tiempo de 10 horas a 25°C (+- 0.5 °C) con una relación sólido/líquido de 0.6 g/L, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Matriz de concentración en solución de Fe (%) y Cu (%)

Prueba	Factor			Resultado	
	H_2O_2	EDTA	pH	Cu (%)	Fe (%)
1	1	1	1	28.40	3.59
2	1	1	2	33.09	8.86
3	1	1	3	16.89	1.40
4	1	2	1	40.46	40.91
5	1	2	2	27.16	20.23
6	1	2	3	24.27	21.63
7	1	3	1	51.66	55.47
8	1	3	2	34.12	34.24
9	1	3	3	36.74	34.40
10	2	1	1	27.30	1.06
11	2	1	2	16.84	0.29
12	2	1	3	13.13	0.15
13	2	2	1	36.96	28.69
14	2	2	2	32.44	19.71
15	2	2	3	22.34	0.68
16	2	3	1	38.98	31.90
17	2	3	2	32.92	21.13
18	2	3	3	22.90	20.60
19	3	1	1	26.96	0.88
20	3	1	2	20.04	0.20
21	3	1	3	12.83	0.15
22	3	2	1	41.14	23.44
23	3	2	2	28.66	1.22
24	3	2	3	18.55	0.33
25	3	3	1	44.45	20.58
26	3	3	2	41.29	29.00
27	3	3	3	18.18	15.22

Datos estadísticos

La tabla 4, presenta las medias estadísticas para las pruebas de lixiviación de la calcopirita. El valor mínimo de recuperación en cobre es de 12.83% con una disolución mínima de hierro del 0.15%; mientras que las mayores recuperaciones de cobre son de 51.66% y una disolución de hierro de 55.47%. La desviación estándar de Fe (15.73) es mayor que la de Cu (10.15), esto quiere decir que, las disoluciones de hierro se encuentran más dispersos con

respecto a su media en las lixiviaciones y su extensión en la distribución de datos se muestra en el diagrama de la figura 2.

El primer cuartil indica que el 25% de las pruebas muestran una recuperación igual o menor al 22.48% de cobre con una disolución de hierro del 0.93%, el segundo cuartil indica que el 50% de las pruebas muestran una recuperación igual o menor al 28.53% de cobre con una disolución de hierro del 19.97%, el tercer cuartil indica que el 75% de las pruebas muestran una recuperación igual o menor al 36.91% de cobre con una disolución de hierro del 27.38%.

Tabla 4. Medidas estadísticas

	Cu (%)	Fe (%)
Media	29.64	16.18
Desviación estándar	10.15	15.73
Mínimo	12.83	0.15
Q1 - 25%	22.48	0.93
Q2 - 50%	28.53	19.97
Q3 - 75%	36.91	27.38
Máximo	51.66	55.47

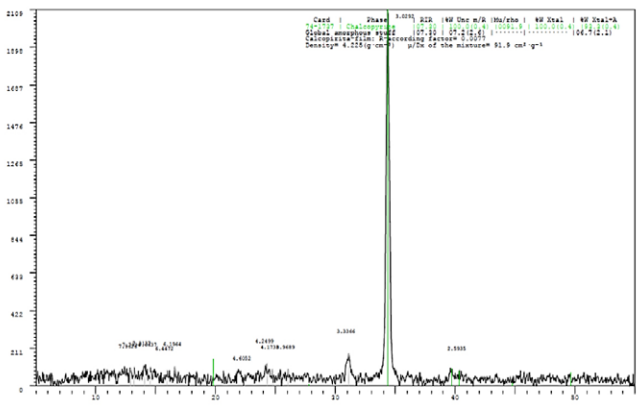
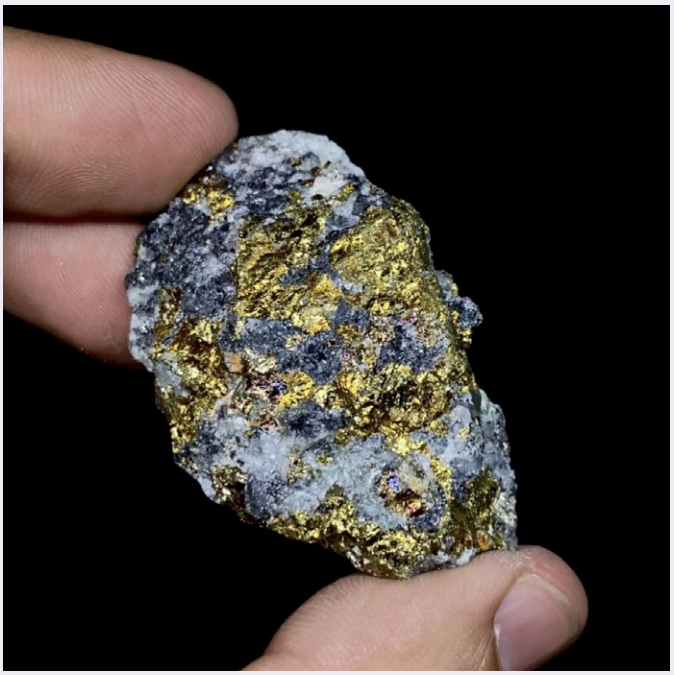


Figura 2. Diagrama de caja sobre la distribución de los valores de Cu y Fe

De acuerdo, con los resultados del diseño experimental, el sistema muestra un comportamiento selectivo para la disolución de cobre a una concentración de 0.6 M de H_2O_2, 0.0006 M de EDTA y pH 4.5 (tabla 5), obteniendo una mayor recuperación de cobre (20.04%) en la solución y una menor disolución de hierro (0.2%).

Tabla 5. Resultado óptimo durante la experimentación

Factor			Resultado	
H_2O_2	EDTA	pH	Cu (%)	Fe (%)
3	1	2	20.04	0.2



La mayor recuperación de cobre (51.66%) se obtuvo a una concentración de 0.2 M de H_2O_2, 0.06 M de EDTA y pH 4, sin embargo, con estos parámetros se tiene una baja selectividad en el sistema al tener una mayor disolución de hierro (55.47%, tabla 6).

Tabla 6. Resultados del proceso menos óptimo durante la experimentación

Factor			Resultado	
H_2O_2	EDTA	pH	Cu (%)	Fe (%)
1	3	1	51.66	55.47

La máxima extracción del cobre del 51.66% sugiere una posible pasivación del mineral causada por una capa protectora no conductora de azufre, como sucede en los procesos hidrometalúrgicos donde están presentes algunas especies relacionadas a este elemento, esta capa impide el transporte de reactivos y productos en la lixiviación [16].

La variable que tiene un mayor efecto en el sistema EDTA-Fe-Cu es la concentración de EDTA, debido a que la concentración de EDTA está relacionado a la liberación de iones de hierro a la solución; es decir, a mayor concentración de EDTA se tiene una mayor liberación de los iones Fe y Cu, sin embargo, si se reduce su concentración, la liberación de los iones de Fe a la solución disminuyen y se promueve una mayor disolución de cobre generando una mayor selectividad del sistema.

Es importante mencionar que el EDTA puede formar complejos con el Ca^{2+} liberado durante la adición de $Ca(OH)_2$ al regular el pH del sistema disminuyendo la disponibilidad del EDTA para formar complejos con el cobre; sin embargo, a las condiciones estudiadas no se

encontraron efectos adversos durante la lixiviación debido a que su uso se restringió al pH 5. Además, se tiene una concentración de EDTA en exceso en relación al cobre presente en el mineral (figura 3C).

Comportamiento del sistema

En la figura 3, se observa la variación en los valores de recuperación porcentual tanto de cobre como de hierro, al finalizar la lixiviación. Donde la relación de recuperación de ambos metales es inversamente proporcional al aumento de pH (figura 3A), es decir que en la medida que se incrementa el pH, el porcentaje de recuperación de hierro y cobre disminuye. Un comportamiento interesante muestra que con el incremento de la concentración de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (Figura 3B), se incrementa la selectividad del proceso, marcándose una clara diferencia entre la recuperación de cobre y la disolución de hierro. Por otra parte, el incremento de EDTA promueve la disolución de ambos elementos por lo tanto hace que el proceso sea menos selectivo para la recuperación de cobre y la disolución de hierro (figura 3C).

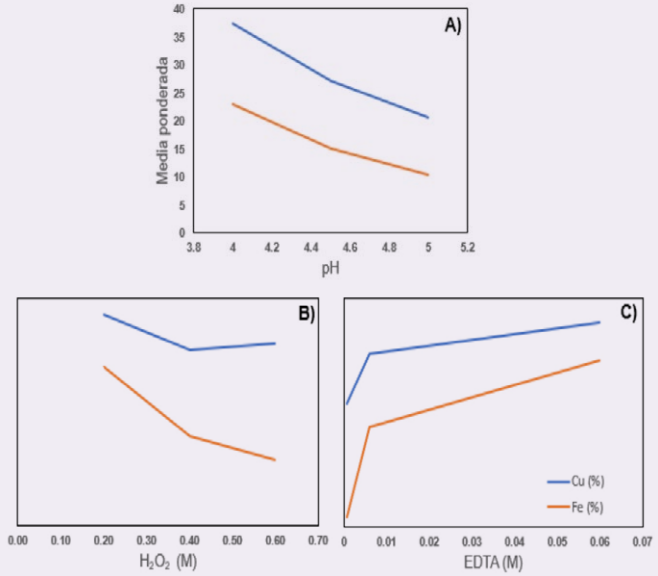
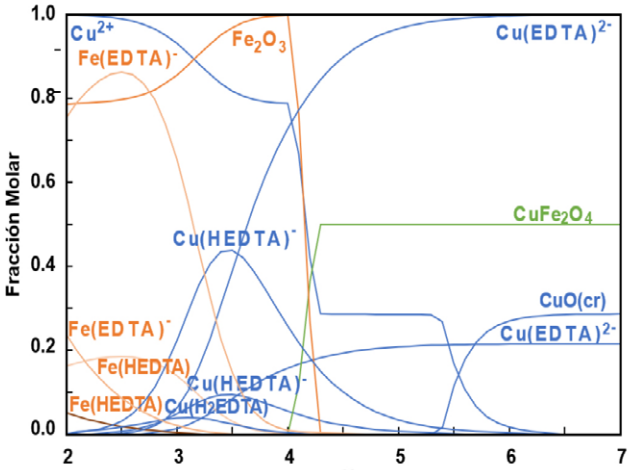


Figura 3. Efectos en los parámetros de pH, H_2O_2 y EDTA (Cu y Fe).

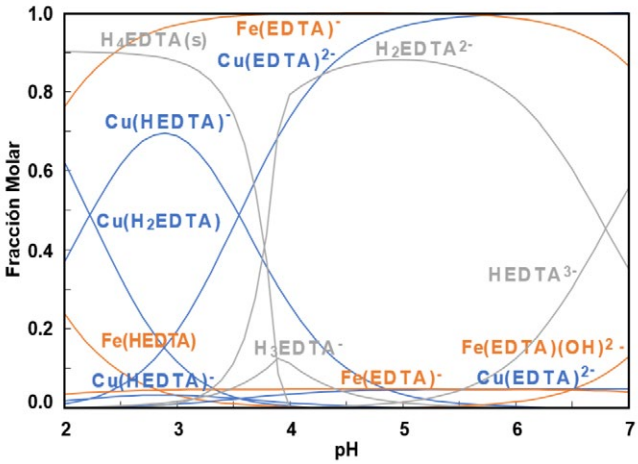
El comportamiento observado en los resultados de las lixiviaciones con relación a la recuperación de cobre y la disolución de hierro presente se puede explicar mediante los diagramas de distribución de especies a altas y bajas concentraciones, teniendo en cuenta el diseño factorial efectuado, en las que se muestran las especies sólidas y liquidas formadas en el proceso.

La figura 4, presenta el efecto de la concentración de EDTA del diseño experimental, en relación con la formación de especies con el cobre y hierro a distintos valores de pH. Por lo que a un pH inferior a 4 y a una concentración de 0.0006 M se tiene una mayor presencia de complejos del hierro en forma sólida (Fe_2O_3); mientras que, a un pH mayor que 4, los complejos del cobre soluble ($Cu(EDTA)^{2-}$) se mantienen en el sistema, sin embargo, se promueve la formación del $CuFe_2O_4$ responsable de la inestabilidad y baja recuperación de cobre.



sistema Cu-Fe-EDTA a 0.0006 M EDTA, 2.8 x10^{-3} M Cu y 2.8 x10^{-3} M Fe a 25°C [17].

Mientras que a mayores concentraciones de EDTA 0.06 M del diseño experimental realizado (figura 5), se tiene una menor cantidad de especies solidas pero la distribución de especies es homogénea. Este comportamiento provoca que exista una mayor solubilidad de la calcopirita, pero con un sistema menos selectivo a diferentes pH, es decir se tiene tanto el cobre como el hierro en solución.



sistema Cu-Fe-EDTA a 0.06 M EDTA, 2.8 x10^{-3} M Cu y 2.8 x10^{-3} M Fe a 25°C [17]

A pesar de que a pH de 3.5 (figura 4) y 3 (figura 5) para las diferentes condiciones es posible la recuperación de cobre debido a posibilidad de formación de los complejos

de Cu-EDTA, también se promueve a la formación de los complejos Fe-EDTA, promoviendo una menor selectividad del sistema.

Finalmente, reducir el contenido de hierro en la solución permite proponer un sistema selectivo para la disolución de cobre a partir de calcopirita ($CuFeS_2$) y eliminar procesos de pretratamiento que limiten la presencia de algunos de los elementos presentes en la matriz del mineral o la oxidación del azufre mediante procesos pirometalúrgicos que liberan gases contaminantes, lo que conlleva a la reducción de costos en la etapa de purificación y concentración.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el comportamiento del sistema EDTA-Cu-Fe, se encontró que a una concentración de 0.006 M de EDTA, 0.6 M de peróxido de hidrogeno y a pH de 4.5, el sistema permite una recuperación selectiva de cobre del 20.04% con baja disolución de hierro (0.2%), sin embargo, se forman precipitados que limitan la recuperación de cobre; en la medida que se incrementa la concentración del EDTA la recuperación del cobre se incrementa a 51.66% y se promueve una baja selectividad del proceso con una disolución de hierro del 55.47%.

RECOMENDACIONES

Debido a que la concentración del EDTA influye para la recuperación de cobre de forma selectiva, se recomendaría mantener una baja concentración de EDTA a pH 4.5. La mejor relación entre concentración del Cu liberado/EDTA fue de 9:1 a pH 4.5, por lo que se recomienda mantener esta relación si se pretende de variar las relaciones S/L y cuantificar el consumo del EDTA.

AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al apoyo financiero del Programa UNAM-PAPIIT IA106221, al apoyo brindado en el laboratorio de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la UNAM y al laboratorio de Hidrometalurgia de la UAM de Iztapalapa.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Anyadike, N. (2002). 1 - Background: key issues. In N. Anyadike (Ed.), Copper (pp. 1-26): Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-592-7.50004-7.

[2] A. Elshkaki, T. Gradel, L. Ciacci, B.K. Reck, "Copper demand, supply, and associated energy use to 2050", Global Environmental Change, vol 39, pp 305-315, Junio 2016. https://doi:10.1016/j.gloenvcha.2016.06.006

[3] Z. Liu, Z. Yin, H. Hu, Q.Y. Chen, "Leaching kinetics of low-grade copper ore with high-alkality gangues in ammonia-ammonium sulphate solution", J. Cent. South Univ. Technol, vol 19, pp 77-84, January 2012. http://doi:10.1007/s11771-012-0975-8

[4] Y. Li, N. Kawashima, J. Li, A.P. Chandra, A.R. Gerson, "A review of the structure, and fundamental mechanisms and kinetics of the leaching of chalcopyrite", Advances in Colloid and Interface Science, vol 197–198, Marzo 2013, Pages 1-32, https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.03.004.

[5] Pradhan, N., Nathsarma, K. C., Srinivasa Rao, K., Sukla, L. B., & Mishra, B. K. (2008). Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. Minerals Engineering, 21(5), 355-365. https://doi:10.1016/j.mineng.2007.10.018.

[6] I.F. Barton, J. Brent, "Chalcopyrite leaching in novel lixiviants", Hydrometallurgy, vol. 207, pp 20, November 2021 https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105775

[7] F. Habashi, "Processes for Sulfur Recovery from ores", American Mining Congress, Washington, D.C, 1969, pp 12.

[8] R. Romero, A Mazuelos, I. Palencia, F. Carranza. "Copper recovery from chalcopyrite concentrates by the BRISA process", Hydrometallurgy, vol 70, pp 205-215, March 2003. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00081-1.

[9] Moyo, T., & Petersen, J. (2016). Study of the dissolution of chalcopyrite in solutions of different ammonium salts. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 116, 509-516. http://doi:10.17159/2411-9717/2016/v116n6a4.

[10] Y. Ma, Y. Yang, R. Fan, X. Gao, l. Zheng, M. Chen." Chalcopyrite leaching in ammonium chloride solutions under ambient conditions: Insight into the dissolution mechanism by XANES, Raman spectroscopy and electrochemical studies", Elsevier, pp 13, June 2021. https://doi:10.1016/j.mineng.2021.107063.

[11] T.C. Chagas, E.M. Garcia, H.W. Alves, T. Matencio, V. F. Cunha, "Electrochemical study of chalcopyrite dissolution in sulfuric, nitric and hydrochloric acid solutions". International Journal of Mineral Processing, vol. 49, pp. 25-33, February 2016. https://doi:10.1016/j.minpro.2016.02.001.

[12] Ruiz-Sánchez, A., Lázaro, I., & Lapidus, G. T. (2020). Improvement effect of organic ligands on chalcopyrite leaching in the aqueous medium of sulfuric acidhydrogen peroxide-ethylene glycol. Hydrometallurgy, 193, 105293. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105293

[13] Abdullah, M. A. M., Seman, M. N. A., Chik, S. M. S. T., & Abdullah, S. B. (2022). Factorial design in optimizing parameters for thermoresponsive ionic liquids as draw solution. Process Safety and Environmental Protection, 161, 34-49. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.016

[14] Hamdi, M. M., Thiru, S., Gzara, L., & Bin Mahfouz, A. S. (2018). Application of factorial design for modeling reverse osmosis process using thin film composite polyamide membrane: A theoretical analysis and experimental validation. Desalination and Water Treatment, 124, 37-52. https://doi:10.5004/dwt.2018.22749

[15] Cacua, K., Buitrago-Sierra, R., Herrera, B., Chejne, F., & Pabón, E. (2017). Influence of different parameters and their coupled effects on the stability of alumina nanofluids by a fractional factorial design approach. Advanced Powder Technology, 28(10), 2581-2588. https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.07.009

[16] P. B. Munoz, J. D. Miller, and M. E. Wadsworth, "Reaction mechanism for the acid ferric sulfate leaching of chalcopyrite," Metallurgical Transactions B, vol. 10, no. 2, pp. 149-158, 1979/06/01 1979. https://doi.org/10.1007/BF02652458

[17] Puigdomenech, I. (2004). Make equilibrium diagrams using sophisticated algorithms (MEDUSA), inorganic chemistry. Royal Institute of Technology.

Cómo citar este artículo:

Mendez-Velasco, C. U., Calla-Choque, D., Fuentes-Rubio, J. E., & Reyna-Robelo, M. J. (2023). Lixiviación de calcopirita con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) en medio oxidante. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.274

¿Virus o bacteria? esa es la cuestión

Virus or bacteria? That is the Question

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Mónica Lizeth Montaño Icedo [1]

Recibido: 17 / 11 / 2022
Aceptado: 11 / 03 / 2023
Publicado: 20 / 04 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.270

Autor de Correspondencia:
Mónica Lizeth Montaño Icedo
Correo: a219220097@unison.mx

Resumen

Los virus y las bacterias pertenecen a diferentes reinos biológicos; sin embargo, comparten las características de ser microscópicos, ser letales para la salud humana y ser capaces de vivir en ambientes extremos. A pesar de estas similitudes se debe aclarar que no son lo mismo. Las bacterias son organismos unicelulares y los virus son partículas que contienen ADN o ARN. Después de la pandemia por Covid-19 se han creado especulaciones y confusiones sobre los virus. Se realizó una encuesta digital abierta para evaluar el conocimiento de público general. Se encontró que el 97.6% de los encuestados no consideran a los virus y las bacterias como lo mismo y el 90.5% considera que se debería de profundizar el tema desde la primaria. Aunque la mayoría de los encuestados conocían la diferencia entre virus y bacteria, contrario a lo que se había previsto, se obtuvo un resultado esperado en que se debería de profundizar el tema en el plan educativo.

Palabras clave: virus, bacterias, pandemia.

Abstract

Viruses and bacteria belong to different biological kingdoms; however, they share the characteristics of being microscopic, being lethal for human's health, and being able of living in extreme environments. Despite these similarities, it should be clarified that they are not the same. Bacteria are unicellular organisms and viruses are particles that contain DNA or RNA. After the Covid-19 pandemic speculations and confusions about viruses were created. To evaluate the knowledge of the general audience, an open digital survey was created. It was found that 97.6% of the respondents did not consider viruses and bacteria as the same thing and 90.5% considers that the topic should be deepened since elementary school. Even though most of the respondents knew the difference between viruses and bacteria, contrary to what was predicted, an expected outcome was reached in the idea that the topic should be deepened in the educational plan.

Keywords: *viruses, bacteria, pandemic.*

1 *Estudiante de la licenciatura en biología, Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, a219220097@unison.mx, https://orcid.org/0000-0003-2562-4154*

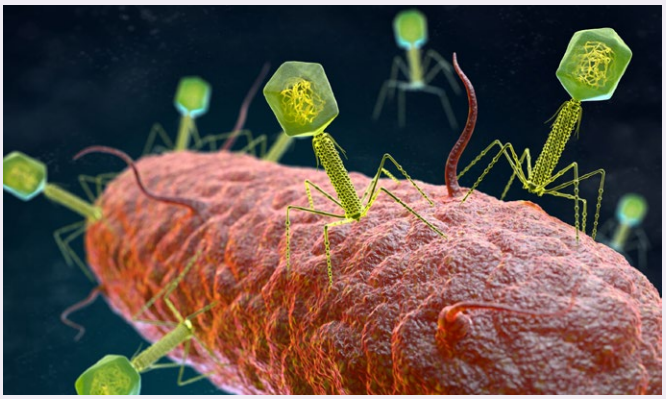
INTRODUCCIÓN

Son microscópicos, pueden llegar a ser letales para la salud y son capaces de vivir cómodamente en ambientes extremos. Éstas son de las escasas similitudes entre los virus y las bacterias [1]. Sin embargo, uno de los errores menos conocidos y de mayor importancia es que: los virus no pueden ser considerados organismos vivos. El concepto de "vida" se compone de una serie de requisitos a cumplir y sí, los virus cuentan con algunos como es la presencia de material genético y su alta tasa de mutación, lo cual los ha hecho evolucionar [2]. Su mayor desventaja es que necesitan de un hospedero para existir, no para vivir [3]. En cambio, las bacterias están compuestas por una célula, (son unicelulares), y esta es la unidad fundamental de la vida para todos los organismos.

Durante la pandemia por Covid-19, se generalizaron ambos términos dentro del ambiente científico con la finalidad de evitar tecnicismos confusos para la población en general. Dentro de estas generalizaciones se encuentra el uso indistinto de palabras comunes o de uso cotidiano. Un ejemplo de esto es que se le denominó "bicho" al virus SARS COV-2, lo cual es una imprecisión que pueden conllevar a una serie de problemas epidemiológicos. Ya que las enfermedades causadas por virus, bacterias y bichos (insectos) o insectos infectados por otros virus como el del Zika (ZIKV) [4], tienen tratamientos específicos, que en ocasiones solo sirven para ciertos padecimientos como es el caso de los antibióticos.

La desinformación es muy peligrosa, sin embargo, no es culpa solamente del desinterés de la población en general, ya que la falta de canales adecuados para la transmisión de información científica certera y precisa no se encuentra al alcance de todos. Uno de los principales objetivos de la ciencia debería de ser que el público no especializado pueda entender los temas científicos sin ningún problema.

Movimientos como el de "ciencia abierta" tienen el objetivo de promover el acceso abierto a la ciencia, el cual es



una buena alternativa para evitar la desinformación [5]. Cabe destacar que hay ocasiones que no se crea esa barrera por parte de los científicos, ni el público general, sino que dicho obstáculo se puede originar desde una temprana edad. Los niños y jóvenes actualmente son usuarios activos del internet por lo que están constantemente expuestos a la desinformación. En un análisis elaborado por Howard y colaboradores, en 2021, destacan que el 76% de un grupo de individuos, con un rango de edad de entre 14 a 20 años, reportaron encontrarse noticias falsas en su interacción con el internet al menos una vez a la semana [6].

Como lo establece la Secretaría de Educación Pública (SEP), desde primero de secundaria se enseña a la célula como la unidad estructural de vida de los organismos [7]. Sin embargo, otros planes de estudios de diversos niveles escolares solamente se enfocan a lo que es una célula y en algunos casos a su fisiología. La enseñanza de los diferentes tipos de células y profundización de éstas parece ser solo en la educación especializada. Además, la identificación de los virus en los planes de estudio se ha visto superado por la pandemia, por lo que se carece de información desde grados académicos básicos. Por razones como estas, se puede cuestionar si el público general tiene la información suficiente para distinguir la individualidad del virus o de la bacteria.

ANTECEDENTES

Aun sin un significado dogmático de vida, lo único que se puede asegurar en los organismos vivos es la presencia de células. Existen dos tipos de células que son las eucariotas y las procariotas; se pueden diferenciar por su tamaño y sus componentes. Mientras que las células eucariotas pueden ser encontradas en animales, hongos, protistas y plantas; las células procariotas pueden ser encontradas en bacterias y en arqueas como organismos unicelulares [8].

Las bacterias son organismos unicelulares y casi todos son microscópicos (figura 1).

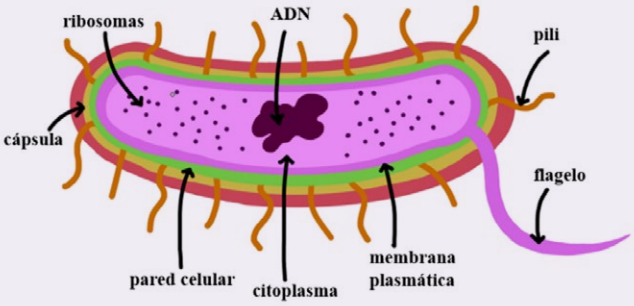
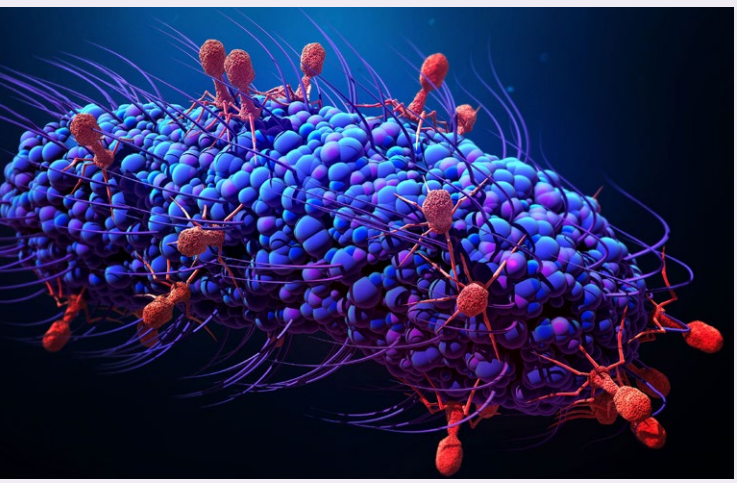


Figura 1. Representación gráfica de una bacteria idealizada. Modificada de fuente: [9]

La diversidad bacteriana es extraordinaria y no está completamente conocida. Las bacterias son capaces de vivir en ambientes inimaginables, como en las profundidades de la tierra y cuerpos de agua inhabitables para otros seres vivos. Sin ir más allá, las bacterias también son encontradas en la piel, en vías respiratorias, en la boca y en el tracto digestivo de animales y humanos. Son capaces de vivir ahí sin crear un riesgo para el hospedero, sin embargo, no siempre las bacterias son inofensivas [10].

En cambio, un virus no es una célula y es más similar a una partícula. Se puede definir como un elemento genético el cual puede contener ADN o ARN y que solo es capaz de replicarse dentro de una célula hospedera (figura 2).



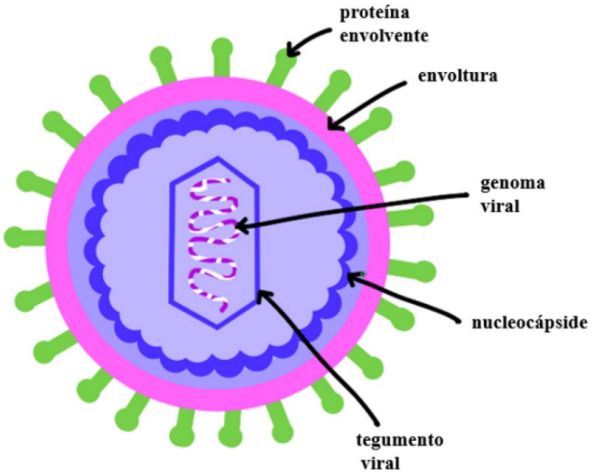


Figura 2. Representación gráfica de un virión, la partícula de un virus sin hospedero, del virus Epstein-Barr. Modificado de fuente: [11]

Para poder replicarse necesita de una célula adecuada y cuando logra entrar y asentarse se completa un proceso que se conoce como infección [12].

El nivel de alcance nocivo que una bacteria o un virus puede tener depende de su composición. Las bacterias pueden ser Gram positivas o Gram negativas; éstas últimas tienen ejemplares dañinos como: *Escherichia coli* (gastroenteritis), *Salmonella typhi* (fiebre tifoidea), *Neisseria gonorrhoeae* (gonorrea), *Yersina pestis* (peste), entre otras. Los virus también pueden ser de dos tipos dependiendo del ácido nucleico que presenten, sin embargo, ambos pueden ser nocivos. Los virus que poseen ADN como partícula genética se les conoce como adenovirus, mientras que los que poseen ARN se les denomina retrovirus [13]. Los virus de ADN más conocidos son: Virus varicela-zoster (VH-3) (varicela), Citomegalovirus (VH-5) (mononucleosis infecciosa), Parvovirus B19 (exantemas), etc. Ejemplos de virus de ARN son: Coronavirus (SARS), Filovirus o virus del Ébola (fiebres hemorrágicas), VIH (síndrome de inmunodeficiencia adquirida), entre otros [14].

Los virus y bacterias entre nosotros

Se estima que el origen de la tierra fue hace 4.6 billones de años y ésta solo fue habitable hasta hace casi 3.8 billones de años. Aunque no se sabe cómo se veían las primeras formas de vida, tampoco si solo se originó una forma de vida o múltiples, se puede tener en consideración la fuerte evidencia que todos los organismos vivos vienen de un ancestro en común. Curiosamente, el fósil más antiguo de evidencia de vida exhibe un organismo muy similar a las bacterias modernas. Este fósil fue encontrado en estratos que se remontan hasta hace 3.5 billones de años [15].

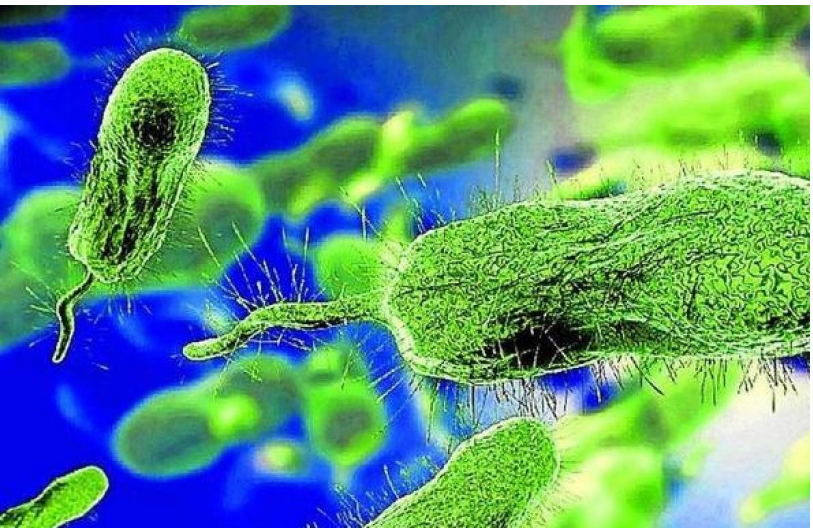
La presencia tan arcaica de las bacterias, o estructuras similares, ha ayudado mucho al momento de teorizar el

origen de la vida. Además, su presencia sigue dejando diversos marcadores importantes en la historia. Se han encontrado rastros de tuberculosis en restos humanos del Neolítico, esto es por su poderosa capacidad de afectar los huesos de los infectados; en la Edad Media se le llamó "Plaga Blanca" [16] y en el año 2018 causó 1.5 millones de muertes [17]. Cabe destacar que las bacterias no son necesariamente malas; de hecho, solo 1% de las bacterias conocidas causan enfermedades y el resto tienen aplicaciones esenciales en la producción de alimentos (pan, queso, yogurt, cerveza, vinos, entre otros), sustancias químicas y muchas tienen potencial en la biorremediación [18].

Aún más importante, el balance de un sistema como nuestro medio ambiente es gracias a los ciclos biogeoquímico, rutas responsables del intercambio de nutrientes, energía y elementos; algunos de estos ciclos deben su regulación a las bacterias. Uno de los ciclos más importantes es el ciclo del nitrógeno, el cual es un elemento vital para la composición de aminoácidos, ADN y ARN, sin embargo, generalmente se encuentra como nitrógeno molecular, forma inutilizable para los organismos vivos. Por esto, es necesaria la presencia de diversas bacterias que intervengan en la transformación del nitrógeno gaseoso en compuestos metabolizables para los organismos vivos.

Las bacterias también regulan el ciclo del carbono, el cual comienza con la utilización del carbono presente en el suelo, proveniente de la materia orgánica, el cual es aprovechado por las bacterias detritívoras que consumen desechos de plantas y animales muertos. La descomposición de la materia orgánica genera dióxido de carbono a través de la respiración celular, el cual regresa a la atmósfera; regulando así el flujo del carbono dentro de los ecosistemas [19].

El papel de los virus dentro de la biosfera es totalmente distinto al de las bacterias. En el caso de los virus, necesitan infectar un organismo para poder replicarse. En algunos casos de infecciones virales, los hospederos nunca manifiestan síntomas; en otras personas se manifiestan como una simple gripe, o pueden ser tan dañinos como el



VIH o el Ébola. Hasta la fecha, alrededor de 35 millones de personas han muerto por motivos relacionados al VIH [20].

Mientras algunos virus siguen siendo complejos y mortales, hay virus que pueden ser utilizados en beneficio de los seres humanos. La infección por virus GBV-C, al cual se relacionaban erróneamente con la hepatitis C, a un paciente con sida de alto riesgo podría reducir hasta el 78% del riesgo de mortalidad por esta enfermedad, por esto se le propone utilizarlo como una vacuna terapéutica [21].

Dentro del campo médico, los bacteriófagos son virus que tiene la capacidad de infectar y destruir bacterias. Estos virus ya se encuentran como objetos de estudio en la biología molecular y en el análisis clínico. Los bacteriófagos son considerados como estructuras más abundantes en la tierra, principalmente en cuerpos de agua, aunque también se han encontrado en muestras de tierra. La Fagoterapia tiene la intención de tratar enfermedades causadas por bacterias con unos virus muy especiales y son utilizados como una alternativa médica al uso de fármacos [22].

Las bacterias y los virus no solo causan impacto en los seres vivos, otra de sus principales víctimas es la economía. Las enfermedades tienen un costo importante para las naciones; en 2013 el Ébola "cobró" 53 millones de dólares, en 2019 la gripe porcina (H1N1) 50 millones de dólares y el coronavirus alrededor de 280 millones de dólares solo en 2020 [23].

La diferencia de impactos de los distintos virus puede tener muchas razones. En el caso particular del coronavirus, podemos identificar a la ignorancia como una razón principal, ya que la sociedad no estaba preparada para un cambio tan radical en su vida. La mayoría de las personas descubrieron que sus acciones no eran tan higiénicas como pensaban y tuvieron que alterar su rutina diaria; otras personas se rehusaron a cambiar sus vidas por un "bicho invisible" y como consecuencia permitían su transmisión.

Se desarrollaron un sinfín de teorías conspirativas para establecer el origen del virus y el caos que éste estaba causando. Se aseguraba que era un arma biológica extranjera

o que todo era parte de una conspiración dedicada a reconfigurar a la población. También nacieron los remedios espontáneos como apagar todos los aparatos electrónicos, comer plátanos o consumir cloro diluido [24], siendo este último peligroso para la salud. Al final, la comprensión de la naturaleza científica del virus y las campañas de vacunas interminables lograron detener los peores momentos de la pandemia. Ahora es fácil comprender que la incertidumbre va de la mano con el miedo y la desinformación, por lo que una persona con miedo y escasamente informada puede llegar a tomar decisiones irracionales.

EXPOSICIÓN

Considerando el impacto, alcance e importancia de los virus y las bacterias, es lógico pensar que su conocimiento no debería de resguardarse en los tecnicismos científicos. Existe la posibilidad de que la mayoría del público general ignore la diferencia entre un virus y una bacteria, ya sea por la falta de profundización del tema durante su desarrollo educativo o por desinterés en general.

Metodología

Con el fin de evaluar el conocimiento de una pequeña parte del público general sobre la gran diferencia entre los virus y las bacterias se elaboró una encuesta digital abierta que se realizó a través de la plataforma Google, esta fue difundida por medios digitales de comunicación instantánea, en los cuales el enlace fue compartido de persona en persona en sus respectivos grupos de comunicación. En total se hicieron ocho preguntas obligatorias, de las cuales: dos eran de información personal (una abierta y otra cerrada) y seis preguntas cerradas correspondientes al tema de investigación; además de un apartado opcional y abierto de opiniones sobre el tema.

Las preguntas elaboradas fueron: edad, ocupación, ¿considera que las bacterias y los virus son lo mismo? ¿Sabía que las bacterias son organismos unicelulares (están compuestos de una sola célula)? ¿Sabía que los virus no son considerados organismos vivos (no están vivos, son partículas)? Antes de la pandemia por Covid-19 ¿consideraba a los virus como inofensivos? Después de la pandemia ¿cambió su percepción de los virus? ¿Considera que el plan educativo debería profundizar el tema de las bacterias y los virus desde la educación primaria? y opinión sobre el tema.

Resultados

Se obtuvieron un total de 42 encuestas respondidas. El rango de edad de las personas encuestadas fue de entre los 20 y 62 años, siendo los 21 años la edad más frecuente. El 47.6% de los encuestados eran empleados y el 33.3% eran estudiantes, el porcentaje restante seleccionaron la respuesta de "otro".

El 97.6% de los encuestados respondieron que no consideran a las bacterias y los virus como lo mismo, solo hubo un encuestado que respondió que sí. El 73.8% de los encuestados sabían que las bacterias son organismos unicelulares y el 61.9% sabían que los virus no son considerados como organismos vivos. El 85.7% de los encuestados respondieron que no consideraban a los virus como inofensivos antes de la pandemia por Covid-19. En la pregunta de cambio de percepción sobre los virus se obtuvie-

ron resultados de 50% y 50% en las respuestas de sí y no. El 90.5% de los encuestados consideran que el plan educativo debería de profundizar el tema desde la educación primaria, cuatro encuestados respondieron que no.

Se obtuvieron un total de 26 opiniones sobre el tema en el apartado opcional de la encuesta, todas las respuestas fueron positivas hacia el tema y la encuesta. Dentro de las repuestas más destacadas se puede encontrar:

- "*los virus son un tema muy interesante y considero que sí debería ampliarse durante los niveles educativos*"
- "*Opino que estos entes biológicos han sido un gran reto para la humanidad con respecto a las enfermedades que pueden causar, pero que gracias a esto la medicina y biología ha podido evolucionar para precisamente afrontar estos retos. Se sabe que las bacterias tienen muchos beneficios en el cuerpo humano, por lo que hay que evitar tenerlas en una percepción negativa total. En el caso de los virus, se sabe aun mas* [sic] *de los daños que pueden causar, pero también pueden llegar a ser beneficiosos, por ejemplo para el tratamiento de algunos cánceres y enfermedades.*"
- "*Me parece un tema muy interesante, sin embargo creo sería mejor profundizar sobre el tema en secundaria que en primaria*"
- "*Es un tema relevante que debe tocarse más a profundidad ya que por desconocimiento e ignorancia no sabemos tratar con ambos casos.*"
- "*Creo que deberían hacer énfasis en explicar las razones por las que un virus no es considerado un ser vivo pues para muchas personas es difícil entenderlo.*"
- "*Hace much[a] falta inducirnos desde niños*".
- "*La mayoría de las personas no están muy informados sobre los virus y menos su potenci[a]l peligro para nuestra salud*"
- "*Creo que es suficiente que en la primaria se expliquen aspectos básicos de este tema, y cómo prevenir enfermedades por virus y bacterias.*"
- "*Muy importante tema, como bien dice en una de las preguntas siempre los confundimos, es bueno aprender sobre ellos para saber cómo diferenciarlos.*"
- "*Se debería concientizar a los estudiantes de los beneficios de la higiene personal y también en el hogar, para tener una vida sana y saludable.*"

CONCLUSIÓN

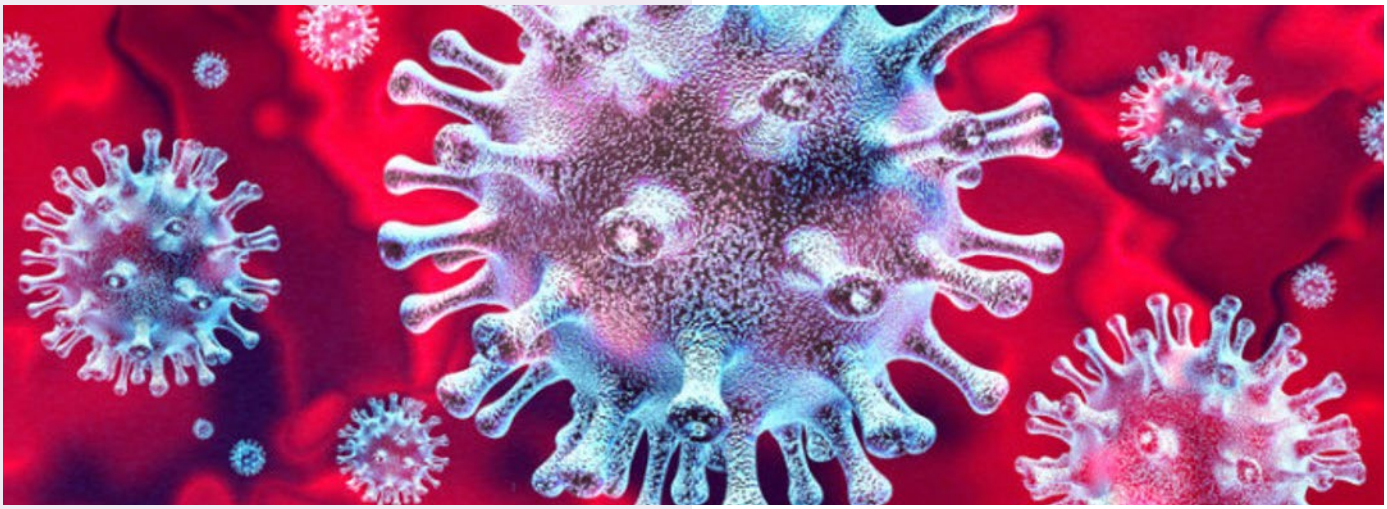
Una de las limitantes del presente trabajo fue el número de encuestas aplicadas. Esto fue debido a las restricciones que se presentaron durante la aplicación de las encuestas, así como el tiempo en el que se desarrolló la presente dinámica. A partir de las respuestas obtenidas se puede inferir que la mayoría del público general sí se encuentra lo suficientemente familiarizado con el tema y sabe la diferencia entre los virus y las bacterias, no como se había previsto. Sin embargo, en las preguntas de información específica de las características de los virus y las bacterias se observó que, aunque hubo una mayoría en una respuesta, el porcentaje se acercaba a la mediana; por lo que se puede inferir que existe la posibilidad de informar y concientizar más sobre el tema.

Además, es importante mencionar que casi todos los encuestados opinaron que se debería de profundizar el tema en el plan educativo básico. Los encuestados que respondieron que no, especificaron en el apartado de opiniones que se debería de profundizar desde el nivel secundaria y primaria. Esto podría apoyar la idea de la investigación, se debería de profundizar el tema de los virus y las bacterias en los planes educativos.

Que los resultados no hayan sido totalmente como los esperados realmente significa algo positivo. Esto es porque el pequeño grupo de personas encuestado tiene las bases suficientes para comprender otros temas de igual importancia; como cuál sería la diferencia entre una enfermedad causada por un virus y una por una bacteria, tratamientos, aplicaciones biotecnológicas de bacterias y virus, etc.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Ciencia en Chile (2022, junio 4) Las curiosas semejanzas y diferencias de los microorganismos que habitan en la Antártica y en el desierto de Atacama [Online]. Available: https://



www.cienciaenchile.cl/las-curiosas-semejanzas-y-diferencias-de-los-microorganismos-que-habitan-en-la-antartica-y-en-el-desierto-de-atacama/

[2] P. López (2019, marzo 25) Acercamiento al concepto de vida [Online] Available: https://www.gaceta.unam.mx/acercamiento-al-concepto-de-vida/

[3] J. Paps (2017, abril 20) ¿Están vivos los virus? Un nuevo descubrimiento indica que se parecen más a los zombis [Online] Available: https://elpais.com/elpais/2017/04/12/ciencia/1492011691_067101.html

[4] C. A. Heras & M. J. Sierra "Enfermedades transmitidas por vectores. Un nuevo reto para los sistemas de vigilancia y la salud pública", Gac Sanit, vol. 30, pp. 167-169, 2016.

[5] A. López-Borrull, "¿Es la ciencia abierta una respuesta válida para la lucha contra la desinformación científica?", ThinKEPI, vol. 15, dic. 2021. doi: https://doi.org/10.3145/thinkepi.2021.e15e06

[6] P. N. Howard, L. M. Neudert & N. Prakash, "Digital misinformation / disinformation and children", UNICEF, vol. 20, pp.13, febrero 2021.

[7] A. Nuño, J. Treviño, E. Bonilla, C. P. Ortega & R. Morales, Aprendizajes clave para la educación integral. 1ª edición. México: SEP, 2017.

[8] Generación Elsevier (2017, octubre 23) Células eucariotas y procariotas: ¿Sabrías distinguirlas? Te damos las claves [Online]. Available: https://www.elsevier.com/es-es/connect/medicina/celulas-eucariotas-y-procariotas-sabrias-distinguirlas-te-damos-las-claves#:~:text=Las%20c%C3%A9lulas%20de%20los%20animales,griego%20%C2%ABn%C3%BAcleo%20primitivo%C2%BB

[9] H. Pedranzani, N. Tavecchio & R. Osses. MANUAL TEÓRICO PRÁCTICO DE BIOLOGÍA. 1ª edición. Argentina: Universidad Nacional de San Luís, 2018.

[10] L. M. Bush (2022, agosto) Introducción a las bacterias [Online]. Available: https://www.msdmanuals.com/es-mx/hogar/infecciones/infecciones-bacterianas-introducci%C3%B3n/introducci%C3%B3n-a-las-bacterias

[11] I. Pardo (2017, enero 22) Virus, ¿están vivos? [Online] Available: https://lanaturalezaenunclic.com/virus-estan-vivos/

[12] M. Madigan, J. Martinko, D. Buckley & D. Stahl, Brock Biología de los Microorganismos. 14ª edición. Reino Unido: Pearson, 2015.

[13] J. Chinén "Vectores virales para terapia genética" DIAGNOSTICO, vol. 39, no. 6, noviembre-diciembre 2000.

[14] J. D. García, J. Agüero, J. A. Parra & M. F. Santos, "Enfermedades infecciosas. Concepto. Clasificación. Aspectos generales y específicos de las infecciones. Criterios de sospecha de enfermedad infecciosa. Pruebas diagnósticas complementarias. Criterios de indicación", Medicine, Vol. 10, no. 49, pp. 3251-3264, febrero 2010. doi: 10.1016/S0304-5412(10)70027-5

[15] E. Mayr, What evolution is, Nueva York: Basic Books, 2001.

[16] O. Serrano & J. C. Hernández "Las bacterias en la historia y la cultura humanas", Revista Electrónica Dr. Zoilo E. Marinello Vidaurreta, vol. 41, no. 10, septiembre 2016.

[17] P. Linde (2019, octubre 17) La bacteria asesina de la tuberculosis causó 1,5 millones de muertos en 2018 [Online] Available: https://elpais.com/elpais/2019/10/17/planeta_futuro/1571300567_186568.html

[18] D. Marcano, "El lado positivo de las bacterias.", INHRR, vol. 39, no. 2, diciembre 2008.

[19] S. Guzmán, "Los microbios y la ecología", ciencia, vol. 68, no. 2, pp. 55-57, abril-junio 2017.

[20] R. R. González (2020, noviembre 12) Quince virus que han cambiado la historia de la Humanidad [Online] Available: https://theconversation.com/quince-virus-que-han-cambiado-la-historia-de-la-humanidad-149031

[21] M. Vázquez (2012, julio 18) La infección de GBV-C podría ayudar a ralentizar la progresión de VIH [Online]. Available: http://gtt-vih.org/actualizate/la_noticia_del_dia/18-07-12#:~:text=18%2F07%2F2012-,La%20infecci%C3%B3n%20por%20GBV%2DC%20podr%C3%ADa%20ayudar,ralentizar%20la%20progresi%C3%B3n%20del%20VIH&text=La%20infecci%C3%B3n%20por%20el%20virus,-digital%20de%20Clinical%20Infectious%20Diseases.

[22] N. Segundo, E. Hernández, O. Villegas & O. Torres, "Los bacteriófagos como una alternativa en el tratamiento de enfermedades infecciosas Bacterianas (Fagoterapia)", Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas, vol. 41, no. 3, pp. 17-26, julio – septiembre 2010.

[23] F. Guardia (2020, marzo 13) Impacto de las enfermedades en la economía global [Online] Available: https://www.ey.com/es_mx/future-health/impacto-de-las-enfermedades-en-la-economia-mundial

[24] M. Fisher (2020, abril 13) Teorías de la conspiración del coronavirus: por qué prosperan y por qué son peligrosas [Online]. Available: https://www.nytimes.com/es/2020/04/13/espanol/mundo/coronavirus-conspiracion-fake-news.html

Cómo citar este artículo:

Montaño Icedo, M. L. (2023). ¿Virus o bacteria? esa es la cuestión. EPISTEMUS, 17(34).
https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.270

Lixiviación de indio con pirofosfato a partir de una jarosita industrial

Indium Leaching with Pyrophosphate from Industrial Jarosite

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Dandy Calla-Choque* [1]
José María Rodríguez-Aragón [2]

Recibido: 20 / 11 / 2022
Aceptado: 14 / 04 / 2023
Publicado: 25 / 04 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.272

Autor de Correspondencia:
Dandy Calla Choque
Correo: dcalla@unam.mx

Resumen

La jarosita es producida en la naturaleza en ambientes húmedos en presencia de sulfuros; además es producida en forma de precipitado en algunos procesos metalúrgicos como método de tratamiento de algunas soluciones para el control de hierro presente en las soluciones ácidas. Los precipitados formados como jarosita tienen contenidos de algunos metales de interés como el oro, la plata y el indio (In). En este trabajo se presenta el efecto del pH, concentración de pirofosfato y tiempo en la lixiviación de indio a temperatura ambiente a partir de jarositas industriales. El contenido de indio en la jarosita fue de 26.8 g/t, donde el 89.5% del In fue recuperado a pH 7, en una solución de pirofosfato 0.1 M a los 60 min de lixiviación. El análisis de resultados incluye un análisis estadístico.

Palabras clave: Indio, Pirofosfato, Hidrometalurgia, Lixiviación.

Abstract

Jarosite is produced in nature, in humid environments, and in the presence of sulfides. In addition, it is produced as a precipitate in some metallurgical processes as a treatment method for some solutions to control the iron present in acid solutions. The precipitates formed as jarosite have contents of some metals of interest such as gold, silver, and indium (In). In this work, the effect of pH, pyrophosphate concentration, and time is studied on the indium leaching at room temperature from industrial jarosite is presented. The indium content in the jarosite was 26.8 g/t, where 89.5% (In) was recovered at pH 7, in a 0.1 M pyrophosphate solution at 60 minutes of leaching. The analysis of results includes a statistical analysis.

Keywords: *Indium, Pyrophosphate, Hydrometallurgy, Leaching.*

1 * Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, dcalla@unam.mx, https://orcid.org/0000-0003-2848-4388

2 Estudiante de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, jose.rodriguezar@ingenieria.unam.edu, https://orcid.org/0000-0002-8909-5493

INTRODUCCIÓN

El indio es un elemento metálico situado en el grupo 13, periodo 5 de la tabla periódica y estado de oxidación +3 [1,2]. El nombre tiene su origen en la línea de espectro color índigo, es un metal plateado químicamente estable debido a que no reacciona con el aire y el agua a temperatura y presión estándar.

La extracción del In a partir de minerales es de importancia debido a que se encuentra en pequeñas cantidades (0.05 ppm) en la corteza terrestre y 0.072 ppm en la corteza oceánica [3]. El uso del In se ha incrementado debido a su aplicación en las tecnologías emergentes o estratégicas [4], soldaduras [5], dispositivos fotovoltaicos [6], material de interfaz térmica [7], baterías [8], pantallas de cristal líquido [1], entre otras.

Los minerales de In son extremadamente raros en la naturaleza, donde la roquesita es el mineral más importante; a menudo, el In sustituye a elementos con radios iónicos similares, especialmente aquellos que tienen coordinación tetraédrica con respecto al principal elemento metálico, (Cu^{+} In^{3+}) = (Zn^{2+}, Fe^{2+}), (Cu^{+} Fe^{3+} S_2) – (Cu^{+} In^{3+} S_2) [9]. Generalmente, el In está asociado a algunos minerales sustituyendo elementos de forma acoplada como, esfalerita (ZnS), calcopirita ($CuFeS_2$), estannita (Cu_2FeSnS_4), tennantita ($Cu_{12}As_4S_{13}$) y casiterita (SnO_2) [9,10]. El In sustituye al zinc dentro de la red cristalina de la esfalerita y representa el mineral económico principal [9]; alrededor del 95% de la producción global de In es derivada de la refinación de zinc y el 5% restante proviene de operaciones de refinación de cobre y estaño [11]; en la refinación del zinc parte de In se precipita durante el proceso de eliminación del hierro por medio de la formación de jarosita en medio ácido.

La formación de la jarosita formada en un proceso industrial permite el control de hierro (Fe^{3+}), sulfatos (SO_4^{2-}) y otras impurezas presentes en el sistema de lixiviación [12]; se representa típicamente con la fórmula $MFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, donde M corresponde a alguno de los siguientes iones H_3O^{+}, Na^{+}, Rb^{+}, Ag^{+}, NH_4^{+}, o Pb^{2+} [13]. Además, se han reportado contenidos de plomo, cobre, galio, arsénico, cadmio, también del In, utilizando espectroscopía de emisión atómica ICP-OES [14,15], por lo que recientemente se han desarrollado procesos para la obtención de estos metales utilizando algunos métodos pirometalúrgicos [14], en unión con los hidrometalúrgicos [16] con el uso de solventes orgánicos [17].

Otra fuente importante para la obtención de este metal es el reciclaje de productos electrónicos [18] como las pantallas de cristal líquido (LCD), donde el contenido de In es recuperado de forma selectiva mediante un proceso de lixiviación con ultrasonido en presencia de pirofosfato ($P_2O_7^{4-}$) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [19].

El pirofosfato (PPi) es un ligando de interés por su coordinación versátil, solubilidad, baja toxicidad y biocompatibilidad [20]; puede formar complejos estables con el In (Ec. 1 y 2), hierro (Ec. 3) y cobre (Ec. 4 y 5) [21].

$$In^{3+} + 2P_2O_7^{4-} = In(P_2O_7)_2^{5-} \quad Log_{10} \quad K = 23.8 \qquad (1)$$

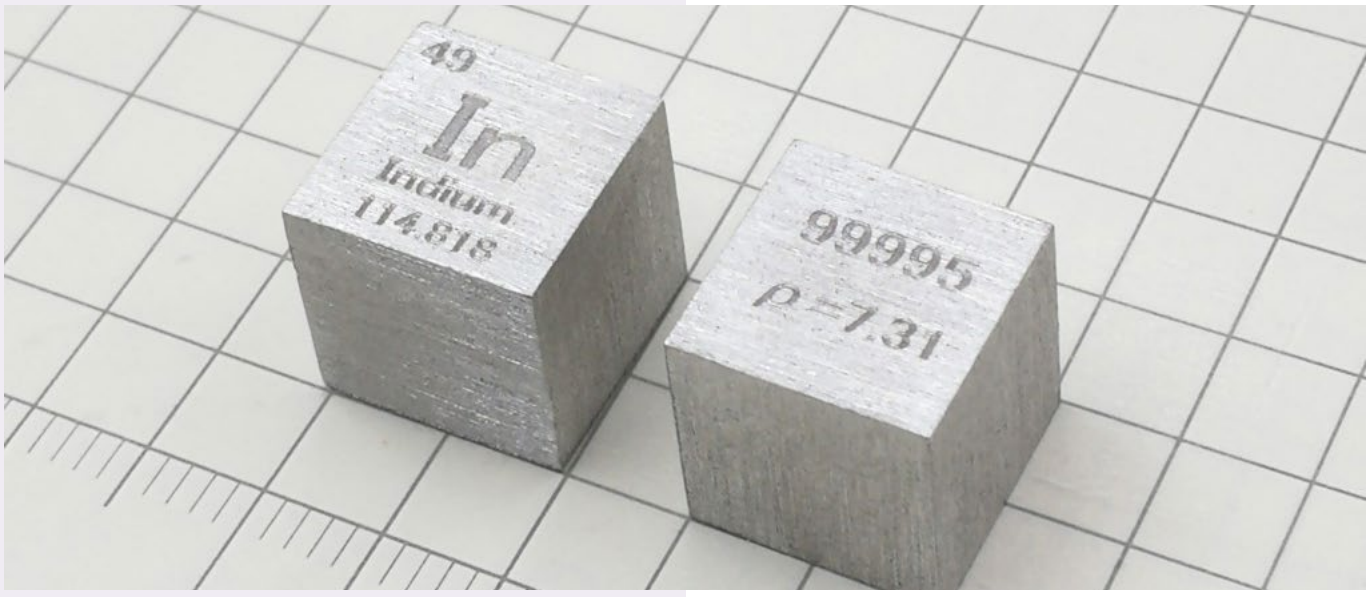
$$4In^{3+} + 3P_2O_7^{4-} = In_4(P_2O_7)_3 \quad Log_{10} \quad K = 22.0 \qquad (2)$$

$$Fe^{3+} + P_2O_7^{4-} = FeP_2O_7^{-} \quad Log_{10} \quad K = 22.2 \qquad (3)$$

$$Cu^{2+} + P_2O_7^{4-} = CuP_2O_7^{2-} \quad Log_{10} \quad K = 7.3 \qquad (4)$$

$$Cu^{2+} + 2P_2O_7^{4-} = Cu(P_2O_7)_2^{6-} \quad Log_{10} \quad K = 12.5 \qquad (5)$$

En este artículo se presentan los resultados de la lixiviación de jarositas con contenido de In a diferentes valores de pH y concentraciones de pirofosfato a temperatura ambiente. La experimentación y los resultados fueron evaluados con un análisis de varianza (ANOVA), porque permite disminuir el número de pruebas mediante la experimentación fraccionada sin perder representatividad.



MATERIALES Y MÉTODOS

Las jarositas usadas en este trabajo son residuos una planta de electro-refinación del zinc. Para las soluciones de lixiviación se utilizaron reactivos de grado analítico y agua desionizada, pirofosfato de sodio (PPi) y ácido sulfúrico (H_2SO_4).

El contenido de metales se obtuvo mediante digestión ácida analizada por medio de espectrometría de absorción atómica (Varian SpectrAA 220 FS). La determinación de las especies mineralógicas se realizó por difracción de rayos X (Philips, X-Pert PW3040).

Todas las pruebas fueron realizadas usando agitación magnética a temperatura ambiente con 3 g jarosita en 100 mL de agua desionizada (30 g/L) a diferente pH y concentración de PPi (tabla 1) con la finalidad de evaluar estos parámetros en la lixiviación de In con ayuda de un diseño experimental. El control de pH se realizó con alícuotas de ácido sulfúrico diluido.

Para el análisis termodinámico se utilizó el software Medusa Chemistry® desarrollado por el KTH Royal Institute of Technology [22] de acuerdo con las condiciones presentes en el sistema estudiado.

Durante la lixiviación se midió el potencial oxido reducción (ORP), pH y se tomaron muestras de la solución lixiviada a diferentes tiempos, para el análisis del contenido de In, Cu y Fe, se utilizó el espectrómetro de absorción atómica.

Para el Análisis de Varianza (ANOVA) se realizó un diseño experimental fraccionado 3^{3-1} con los factores que afectan la lixiviación (pH, PPi y tiempo) con la finalidad de obtener una combinación representativa del comportamiento de los factores en la lixiviación del In, el diseño resultante fue de 27 pruebas con 3 factores y 3 niveles (tabla 1).

Tabla 1. Parámetros para las pruebas de lixiviación con 30 g/L de jarosita a diferente pH, concentración de pirofosfato (PPi) y tiempo de lixiviación a temperatura ambiente.

	Nivel		
	1	**2**	**3**
pH	5	6	7
PPi (M)	0.051	0.1	0.15
Tiempo (min)	30	60	120

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización

Mediante difracción de rayos X (figura 1) se determinó la especie de jarosita de sodio ($NaFe_3(SO_4)(OH)_6$) como especie mayoritaria, además de magnetita ($(ZnFe)Fe_2O_4$) presente en el residuo de una planta de refinación de zinc; por absorción atómica se determinó un contenido de 26.8 g/t In, 45.94% Fe, y 0.96% Cu.

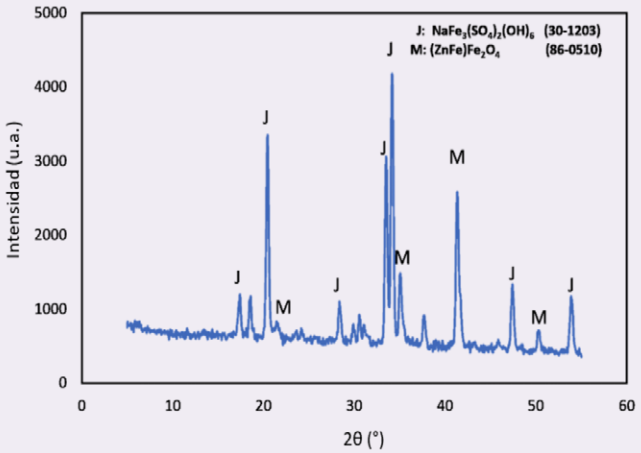


Figura 1. Difractrograma de rayos X (XRD) de la jarosita industrial estudiada.

Pruebas de lixiviación

Se realizaron 27 pruebas de lixiviación conforme al diseño experimental presentado en la tabla 1, los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2 donde se obtienen diferentes porcentajes de lixiviación de In, Cu y Fe de acuerdo con la concentración de PPi, el pH y el tiempo de lixiviación a temperatura ambiente.

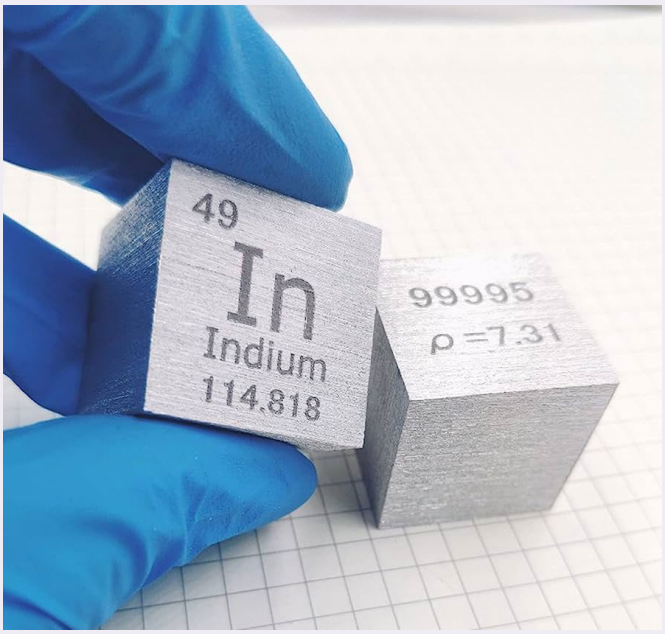


Tabla 2. Matriz de valores experimentales, disolución de In (%), hierro (%) y cobre (%) a temperatura ambiente.

Prueba	PPI (M)	pH	Tiempo (min)	In (%)	Cu (%)	Fe (%)
1	0.051	5	30	25.46	1.28	0.10
2	0.051	5	60	31.67	1.11	0.13
3	0.051	5	120	26.39	0.40	0.21
4	0.100	5	30	42.45	1.26	0.08
5	0.100	5	60	37.57	0.60	0.13
6	0.100	5	120	62.40	1.08	0.29
7	0.150	5	30	49.01	1.38	0.12
8	0.150	5	60	61.80	1.81	0.19
9	0.150	5	120	58.60	1.92	0.29
10	0.051	6	30	58.38	2.52	0.08
11	0.051	6	60	42.85	2.69	0.11
12	0.051	6	120	36.95	2.75	0.20
13	0.100	6	30	39.69	2.39	0.07
14	0.100	6	60	23.35	2.73	0.10
15	0.100	6	120	74.92	1.72	0.09
16	0.150	6	30	38.00	2.42	0.06
17	0.150	6	60	55.40	2.38	0.08
18	0.150	6	120	44.22	1.25	0.12
19	0.051	7	30	30.58	1.21	0.02
20	0.051	7	60	15.07	1.22	0.03
21	0.051	7	120	25.48	0.85	0.04
22	0.100	7	30	86.29	3.29	0.11
23	0.100	7	60	89.52	3.29	0.13
24	0.100	7	120	84.03	3.60	0.01
25	0.150	7	30	59.49	2.52	0.06
26	0.150	7	60	46.70	0.03	0.08
27	0.150	7	120	46.88	1.90	0.11

Análisis estadístico

Como se puede observar en la figura 2, la distribución de las métricas descriptivas, muestran que el valor mayor en la media es para el In (36.7); mientras que, el Fe y Cu, presentan valores relativamente bajos (0.15% y 8.58%, respectivamente). El In presenta una mayor desviación de los datos (20.39%), es decir, mayor será la variabilidad o dispersión de los datos en relación con su media debido a que los efectos en las pruebas tienen mayor impacto en el porcentaje de recuperación de In. Este comportamiento está relacionado a la concentración de In en el sistema de lixiviación (μ = 0.4 ppm). Para el Cu y Fe se obtienen una desviación de 1.76% y 0.08% respectivamente, existe baja variación respecto a la media debido a la formación de complejos estables con el PPi.

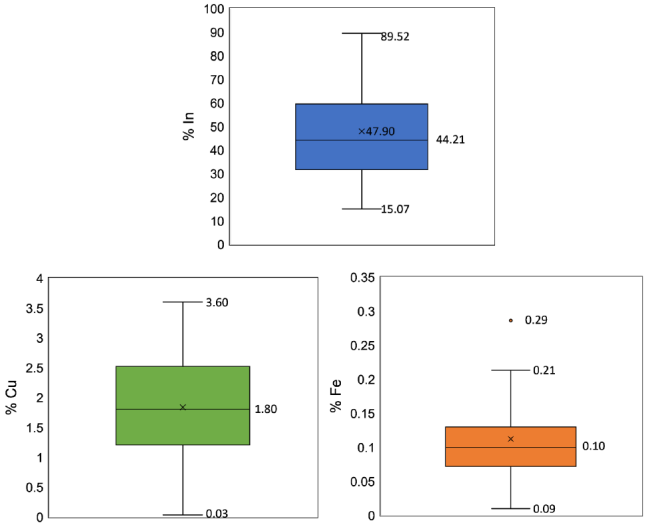


Figura 2. Diagrama de cajas, distribución de las métricas descriptivas para el In, Cu y Fe.

A diferencia del In, el Cu y Fe presentan distribución simétrica, donde se observa una distribución mayor entre los valores del máximo (89.52%) y mínimo (15.07%), los datos se encuentran más dispersos entre sí, además, de tener un porcentaje de lixiviación media 44.21% de In. Para el Cu y Fe se tiene un promedio del 1.80% y 0.10% respectivamente (figura 2, tabla 3).

Tabla 3. Métricas descriptivas del porcentaje de elemento en solución.

	In	Cu	Fe
Media (%)	47.90	1.84	0.11
Desviación estándar	19.84	0.93	0.07
Mínimo (%)	15.07	0.03	0.01
Q1 (25%)	31.67	1.21	0.07
Q2 (50%)	44.22	1.80	0.01
Q3 (75%)	59.49	2.52	0.13
Máximo (%)	89.52	3.60	0.29

Análisis de Varianza

Se consideró usar el efecto de pH (A), concentración de PPi (B) y tiempo (C) así como sus combinaciones (AB, BC, AC) para evaluar el porcentaje de lixiviación de In presente en la jarosita con un análisis de varianza (tabla 1). De acuerdo con el diagrama de pareto con los efectos estandarizados (figura 2) no todas las combinaciones resultaron significativas, solo el efecto de la concentración de PPi (B) y el

efecto combinado entre el pH y la concentración de PPi (A y B). Los demás efectos estandarizados individuales y en conjunto no tienen una relación significativa con la recuperación del In presente en la jarosita con un nivel de confianza del 95%.

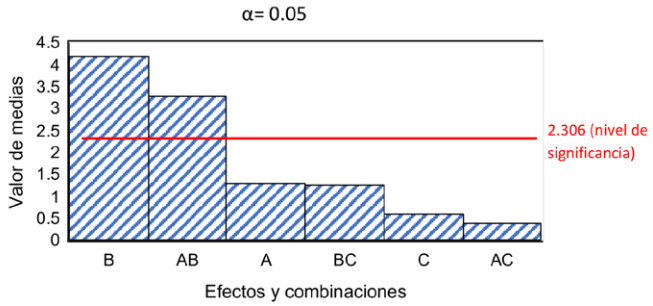


Figura 2. Diagrama de Pareto de los efectos estandarizados.

Por lo que para el análisis de varianza solo se tomaron en cuenta los términos de pH (A) y concentración de PPi (B), en la tabla 4 se presentan los grados de libertad (GL), suma ajustada de los cuadrados (SC Ajust.), cuadrados medios ajustados (MC Ajust.), estadístico F (valor F) y valor p. El valor p permite evaluar la relación de igualdad entre todas las medias de la población estudiada, la hipótesis planteada se relaciona con el valor p, al ser valores cercanos a 0 entre las medias de la población se afirma la hipótesis nula, la cual asume que no hay una diferencia significativa entre los grupos en términos de la variable de medición.

Tabla 4. Análisis de varianza con los factores, pH y concentración para In.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	7742.3	967.8	6.98	0
Lineal	4	4027.1	1006.8	7.26	0.001
pH	2	486.8	243.4	1.76	0.201
Concentración	2	3540.3	1770.2	12.77	0
Interacciones de 2 términos	4	3715.2	928.8	6.7	0.002
pH *Concentración	4	3715.2	928.8	6.7	0.002
Error	18	2495	138.6		
Total	26	10237.3			

Análisis de efectos

La figura 3, presenta el efecto del pH en la lixiviación de la jarosita, en la medida que el pH se incrementa de 5 a 7 la recuperación de In se favorece de 44 al 53.8% respectivamente, este comportamiento está relacionado a la formación del complejo $In(P_2O_7)_2^{5-}$ el cual permite que el In pase a solución (figura 4 y 5). Sin embargo, el efecto del pH está relacionado a la presencia del complejo Fe-PPi ($FeP_2O_7^-$) el cual limita la presencia de PPi necesario para la lixiviación de In (figura 6).

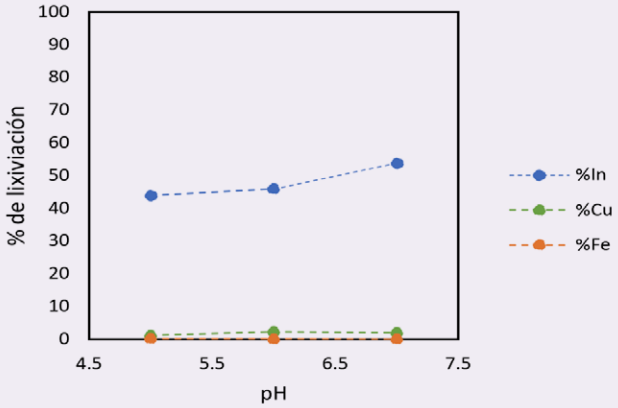


Figura 3. Efecto del pH en la lixiviación de In, Fe y Cu.

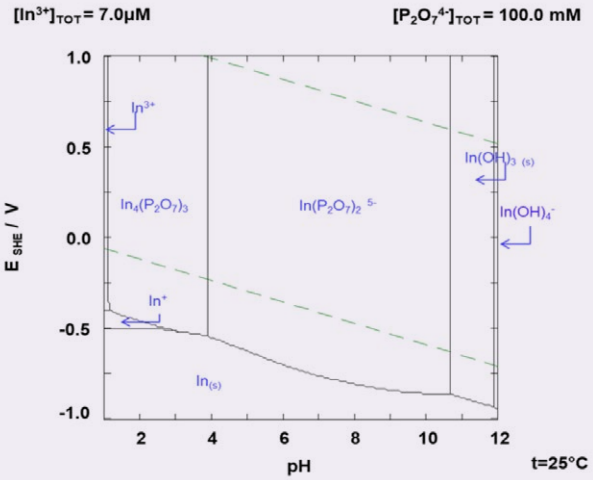


Figura 4. Diagrama Eh-pH para el sistema In-$P_2O_7^{4-}$, 0.10 M $P_2O_7^{4-}$, y 0.7x10^{-6} M In a 25°C.

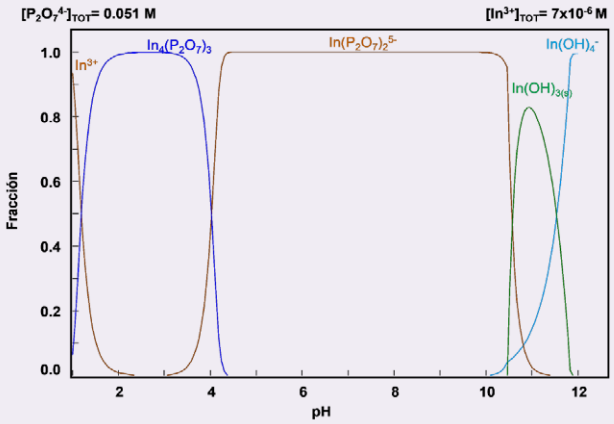


Figura 5. Diagrama de distribución de especies para el sistema In-$P_2O_7^{4-}$, 0.10 M $P_2O_7^{4-}$ y 0.7x10^{-6} M In a 25°C.

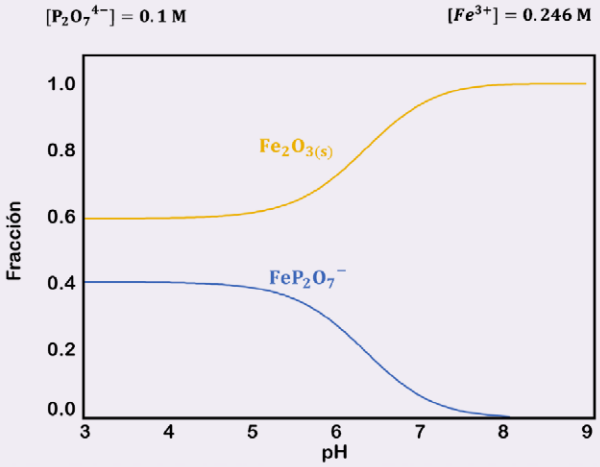
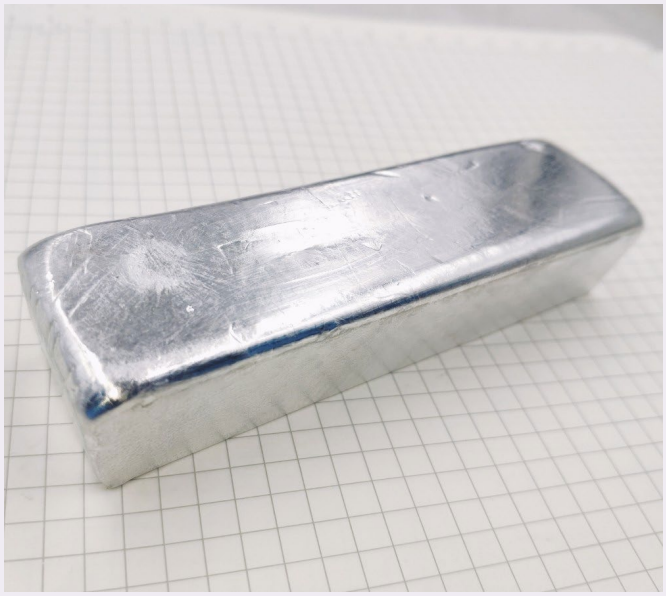


Figura 6. Diagrama de distribución de especies para el sistema Fe-$P_2O_7^{4-}$, 0.246 M Fe y 0.1 M $P_2O_7^{4-}$ a 25°C.

Para el efecto de la concentración del pirofosfato (figura 7), en la medida en que la concentración de PPi se incrementa, el porcentaje de lixiviación de In también se favorece, por ejemplo, a una concentración de 0.05 M se tiene una recuperación de 32.5% y si se incrementa la concentración a 0.1 M se alcanza una recuperación del 60% de In. Finalmente, a una concentración de 0.15 M la recuperación desciende, este comportamiento puede estar relacionado a la formación de un complejo entre el cobre y el hierro que se favorece a mayor concentración de PPi; si se comparan los diagramas a 0.1 M de PPi y 0.15 M de PPi del cobre (figura 8 y 9, respectivamente). Se observa que el área de predominancia del ion $Cu(P_2O_7)_2^{6-}$ es mayor en la concentración de 0.15 M a pesar de ser una diferencia pequeña podría ser la razón de la caída de recuperación a un pH 7 y 0.15 M de PPi.



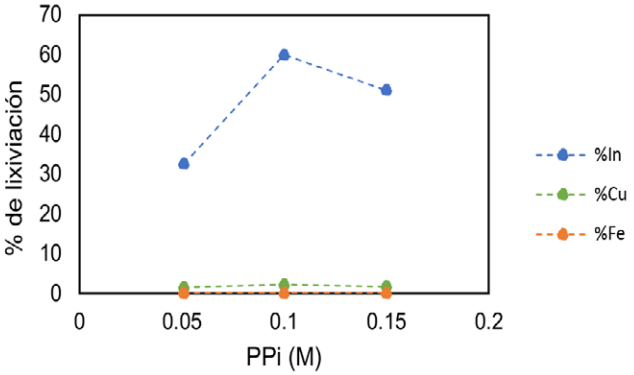


Figura 7. Efecto de la concentración de $P_2O_7^{4-}$ (PPi) en la lixiviación de In, Fe, y Cu.

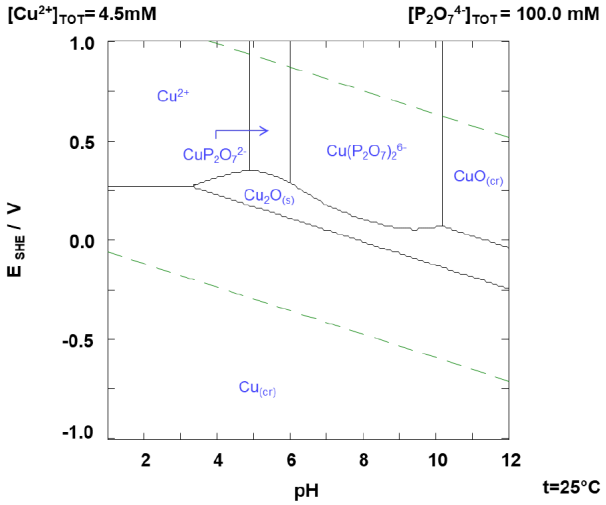


Figura 8. Diagrama de Eh-pH para el sistema Cu-$P_2O_7^{4-}$, a 0.10 M $P_2O_7^{4-}$, y 4.5x10^{-6} M Cu a 25°C.

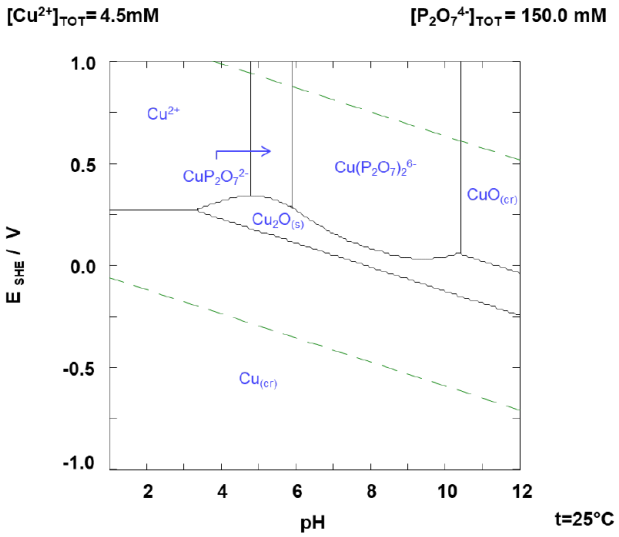


Figura 9. Diagrama de Eh-pH para el sistema Cu-$P_2O_7^{4-}$, a 0.15 M $P_2O_7^{4-}$, y 4.5x10^{-6} M Cu a 25°C.

El efecto del tiempo en lixiviación se presenta en la figura 10 donde en la medida que se aumenta el tiempo la lixiviación de In se favorece en la solución a partir de la jarosita a las condiciones ensayadas.

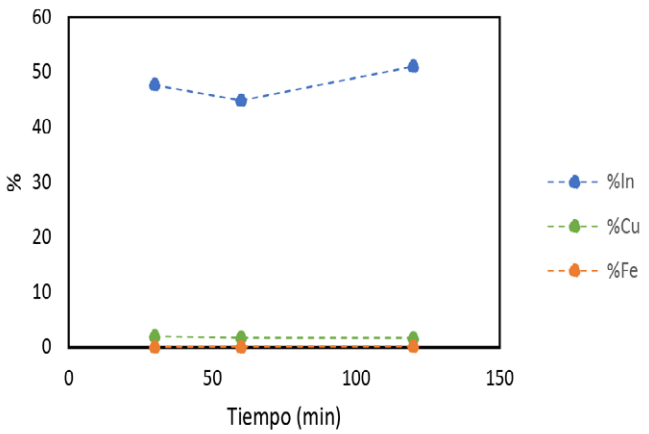


Figura 10. Efecto del tiempo de lixiviación en la recuperación de In y la disolución de Fe y Cu.

Para el caso del cobre y hierro en las condiciones estudiadas no se tienen disoluciones altas, el cobre tiene una disolución menor que 3.5% y el hierro menor que 0.28%; este comportamiento podría estar relacionado a la posible formación del complejo sólido $CuFeO_2$ y la baja descomposición de la jarosita en las condiciones estudiadas (figura 10) lo que permite que la mayor cantidad de cobre y el hierro permanezcan con el mineral.

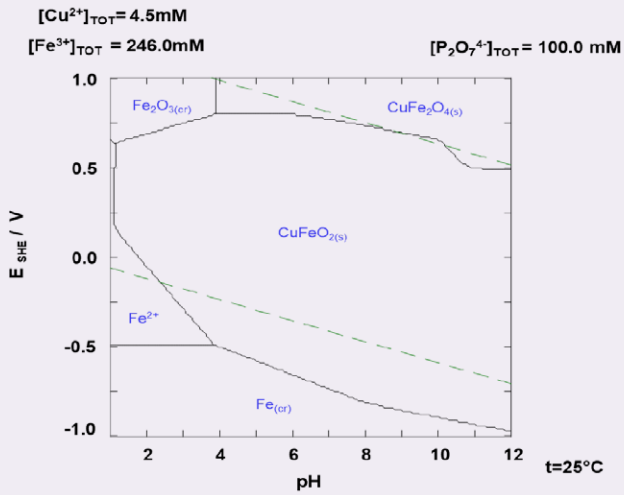


Figura 11. Diagrama Eh-pH para el sistema Cu-Fe-$P_2O_7^{4-}$, 0.10 M PPi, 4.5 x10^{-6} M Cu y 0.246 M Fe a 25°C.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados demuestran la posibilidad de extracción de In con pirofosfato a partir de la jarosita en un rango de pH de 5 a 7.

De acuerdo con los resultados estadísticos se tiene una correlación entre el pH y la concentración de pirofosfato asociados a la recuperación de In, este proceso permite una lixiviación selectiva del In, debido a la baja disolución

de hierro y cobre; se obtiene una lixiviación del 89.52% In, 0.1% Fe, y 3.3% Cu a pH 7 y 0.1 M de pirofosfato a temperatura ambiente.

RECONOCIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la Universidad Nacional Autónoma de México IA 106221.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Alfantazi, A. M. and R. R. Moskalyk. 2003. Processing of indium: a review. Minerals Engineering 16(8): 687-694. http://dx.doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00168-7

[2] Pradhan, D., Panda, S., & Sukla, L. 2017. Recent advances in indium metallurgy: A review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 39, 167–180. http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2017.1399887

[3] Goldfarb, R. J. "Critical Metals Handbook (Gus Gunn, ed.). 2014. "Economic Geology 109(6): 1801-1802. http://dx.doi.org/10.2113/econgeo.109.6.1801

[4] E. M. Harper, , Goksin Kavlak, Lara Burmeister, Matthew J. Eckelman, Serkan Erbis, Vicente Sebastian Espinoza, Philip Nuss, T. E. Graedel. 2015. Criticality of the Geological Zinc, Tin, and Lead Family. Journal of Industrial Ecology, 19(4), 628-644.http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12213

[5] Humpston, G., & Jacobson, D. M. 2005. Solders and Their Metallurgy In Principles of Soldering (pp. 0): ASM International. http://dx.doi.org/10.31399/asm.tb.ps.t62440049

[6] Nakamura, M., Yamaguchi, K., Kimoto, Y., Yasaki, Y., Kato, T., & Sugimoto, H. 2019. Cd-Free Cu(In,Ga)(Se,S)2 thin-film solar cell with record efficiency of 23.35%. IEEE Journal of Photovoltaics, 9, 1863-186 http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2937218

[7] Too, S., Touzelbaev, M., Khan, M., Master, R., Diep, J., & Keok, K.-H. 2009. Indium Thermal Interface Material Development for Microprocessors. http://dx.doi.org/10.1109/STHERM.2009.4810762

[8] Zhang, L., Chen, X., Wan, F., Niu, Z., Wang, Y., Zhang, Q., & Chen, J. 2008. Enhanced Electrochemical Kinetics and Polysulfide Traps of Indium Nitride for Highly Stable Lithium–Sulfur Batteries. ACS Nano, 12(9), 9578-9586. http://dx.doi.org/10.1021/acsnano.8b05466

[0] N. J. Cook, Sundblad, K., Valkama, M., Nygård, R., Ciobanu, C. L., & Danyushevsky, L. 2011.Indium mineralisation in A-type granites in southeastern Finland: Insights into mineralogy and partitioning between coexisting minerals. Chemical Geology, 284(1), 62-73. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.02.006

[10] Murakami, H., & Ishihara, S. 2013. Trace elements of Indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: A femto-second LA-ICPMS study. Ore Geology Reviews, 53, 223-243, Enero 2013, http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.01.010

[11] Schwarz-Schampera. 2013. U. Indium. In Critical Metals Handbook. http://dx.doi.org/10.1002/9781118755341.ch9

[12] Groat, L. A., Jambor, J., & Pemberton, B. 2003. The crystal structure of argentojarosite, AgFe3(SO4)(2)(OH)(6). Canadian Mineralogist - CAN MINERALOG, 41, 921-928. http://dx.doi.org/10.2113/gscanmin.41.4.921

[13] Das, G. K., Acharya, S., Anand, S., & Das, R. P. 1996. Jarosites: A Review. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 16(3), 185-210. http://dx.doi.org/10.1080/08827509708914135

[14] Wegscheider, S., Steinlechner, S., & Leuchtenmüller, M. 2016. Innovative Concept for the Recovery of Silver and Indium by a Combined Treatment of Jarosite and Electric Arc Furnace Dust. JOM, 69(2), 388-394. http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-2192-7

[15] Kerolli–Mustafa, M., Fajković, H., Rončević, S., & Ćurković, L. 2015. Assessment of metal risks from different depths of jarosite tailing waste of Trepça Zinc Industry, Kosovo based on BCR procedure. Journal of Geochemical Exploration, 148, 161-168. http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.09.001

[16] Maihatchi Ahamed, A., Pons, M. N., Ricoux, Q., Issa, S., Goettmann, F., & Lapicque, F. 2021. New pathway for utilization of jarosite, an industrial waste of zinc hydrometallurgy. 170, 107030. http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107030

[17] Li, S.-q., Tang, M.-t., He, J., Yang, S.-h., Tang, C.-b., & Chen, Y.-m. 2006. Extraction of indium from indium-zinc concentrates. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 16(6), 1448-1454. http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(07)60036-3

[18] Zhang, K., Wu, Y., Wang, W., Li, B., Zhang, Y., & Zuo, T. 2015. Recycling indium from waste LCDs: A review. Resources, Conservation and Recycling, 104, 276-290. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.015

[19] Toache-Pérez, A. D., Lapidus, G. T., Bolarín-Miró, A. M., & De Jesús, F. S. 2022. Selective Leaching and Recovery of Er, Gd, Sn, and In from Liquid Crystal Display Screen Waste by Sono-Leaching Assisted by Magnetic Separation. ACS Omega, 7(36), 31897-31904. http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.2c02729

[20] Ikotun, O. F., Marino, N., Kruger, P. E., Julve, M., & Doyle, R. P. 2010. Coordination complexes incorporating pyrophosphate: Structural overview and exploration of their diverse magnetic, catalytic and biological properties. Coordination Chemistry Reviews, 254(7), 890-915. http://dx.doi.org/10.1016/j.ccr.2009.12.015

[21] Peter Linstrom. 2017. NIST Chemistry WebBook - SRD 69, National Institute of Standards and Technology, 2022

[22] Puigdomenech, I. 2004. Make equilibrium diagrams using sophisticated algorithms (MEDUSA), inorganic chemistry. Stockholm, Sweden

Cómo citar este artículo:

Calla Choque, D., & Rodríguez-Aragón, J. M. (2023). Lixiviación de indio con pirofosfato a partir de una jarosita industrial. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.272

Lixiviación de plomo con citrato a partir de un mineral de galena, efecto del pH.

Lead Leaching with Citrate from a Galena Mineral, pH Effect

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

David Moisés Pantaleón Tolentino [1]
Dandy Calla Choque* [2]
José Enrique Santos Jallath [3]

Recibido: 20 / 11 / 2022
Aceptado: 14 / 04 / 2023
Publicado: 09 / 05 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.273

Autor de Correspondencia:
Dandy Calla Choque
Correo: dcalla@unam.mx

Resumen

La recuperación de metales a partir de minerales mediante procesos alternativos es apropiada para la reducción de contaminantes producidos en fundiciones y operaciones tradicionales; la lixiviación de metales con el uso de reactivos químicos a bajas concentraciones permite la reutilización de las soluciones, así como la reducción de problemas en el reciclaje de las soluciones. La lixiviación con reactivos orgánicos a temperatura ambiente reduce los problemas de generación de gases y consumo de reactivos, por lo que resulta ser una opción para la obtención de metales a partir de minerales. Este trabajo presenta una alternativa para la recuperación de plomo mediante la lixiviación de un mineral de galena utilizando citrato de sodio en una concentración de 0.2 M a temperatura ambiente. Se evalúa el efecto del pH en medio ácido, neutro y alcalino, donde se logra recuperar el 99.9% de plomo en medio alcalino.

Palabras clave: plomo, lixiviación, citrato, alcalino.

Abstract

The recovery of metals from minerals through alternative processes is appropriate for the reduction of pollutants produced in foundries and traditional operations; the leaching of metals with the use of chemical reagents at low concentrations allows the reuse of the solutions, as well as the reduction of problems in the recycling of the solutions. Leaching with organic reagents at room temperature reduces the issues in the generation of gases and consumption of reagents, which is why it turns out to be an option for obtaining metals from minerals. This work shows an alternative for lead recovery by leaching a galena mineral using sodium citrate in a concentration of 0.2 M at room temperature. The effect of pH in acid, neutral, and alkaline mediums is evaluated, where recovery of 99.9% of lead in alkaline media is achieved.

Keywords: *lead, leaching, citrate, alkaline.*

1 *Egresado de Ingeniería de Minas y Metalurgia, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, CDMX, México, davi963chu@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-5002-4594*
2 ** Doctor en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, dcalla@unam.mx, https://orcid.org/0000-0003-2848-4388*
3 *Doctor en Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Minas y Metalúrgica – Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, jesantos@unam.mx, https://orcid.org/0000-0002-1729-9382*

INTRODUCCIÓN

La recuperación de plomo mediante métodos alternativos a la fundición es una opción que debe ser considerada para la reducción de la demanda energética, los problemas ambientales y de salud pública relacionados con las técnicas tradicionales. Los procesos pirometalúrgicos utilizadas en la recuperación del plomo derivados de la refinación de minerales de zinc y plata requieren altas temperaturas y generan grandes cantidades de gases tóxicos y polvos contaminantes. Estos procesos implican varias fases de purificación, lo que aumenta la complejidad de mismo. Por otro lado, los polvos deben ser tratados de manera exhaustiva para evitar su liberación a la atmósfera y su deposición en aguas utilizadas para el consumo humano. Por estas razones, es importante evaluar métodos alternativos de recuperación del plomo que sean más eficientes y menos perjudiciales para el medio ambiente. Estos métodos alternativos pueden incluir tecnologías para la obtención de plomo a través de procesos hidrometalúrgicos o electrometalúrgicos, los cuales son considerados menos tóxicos y más eficientes para el aprovechamiento del plomo [1].

El plomo es uno de los metales con mayor demanda a nivel mundial [2] y se estima que más del 80% de este metal se aprovecha a partir del reciclaje de piezas y baterías de automóviles que se han desechado [3]; del restante solo se aprovechan minerales como la galena (PbS) y cerusita ($PbCO_3$) mediante procesos pirometalúrgicos donde es necesario el control de algunas variables operativas en la producción y tratamiento de gases peligrosos, así como el tratamiento y confinamiento de los residuos generados [4]. Los minerales de plomo, en algunos casos, se encuentran asociados a la plata, cobre, hierro, zinc, entre otros [5]; este tipo de asociaciones son de interés por sus contenidos de plata, cobre y zinc, dejando al plomo una operación secundaria; donde a partir de la concentración de plomo se decide si se trata o se envía a la presa de jales para su confinamiento. Otra vía de uso del plomo se encuentra en el tratamiento de residuos generados en diversas industrias y etapas de algunos procesos como, escorias de fundición [5] dónde se han reportado concentraciones altas derivado del mal control del proceso, y en el desecho de tubos catódicos que puede ser reprocesados para la recuperación de este metal por tratamientos piro e hidrometalúrgicos [6].

La lixiviación de minerales es un método de disolución acuosa que requiere del control de la concentración de los reactivos químicos, pH y temperatura necesaria para llevar a cabo la disolución selectiva de ciertos elementos de interés a partir de minerales. Para la disolución del plomo en medio acuoso, el uso de agentes orgánicos como el citrato de sodio es una alternativa interesante debido a la formación de complejos estables con el plomo y puede ser usado en el tratamiento de materiales con contenido de este metal. En medio ácido, la lixiviación de cerusita ($PbCO_3$) alcanza el 80% de la disolución del plomo a las seis horas [7]; en medio alcalino [8] los materiales de reciclaje provenientes de baterías de automóviles de desecho, la lixiviación con citrato de sodio y ácido acético para la obtención pastas [9]. Por lo tanto, para la recuperación de metales a partir de minerales sulfurados y materiales refractarios de desecho es necesario la implementación de procesos de lixiviación a condiciones exhaustivas (concentración de reactivos y temperatura) [10]; además de la implementación de una etapa de pretratamiento del material para que el proceso de disolución se lleve a cabo. Este trabajo presenta una alternativa para la recuperación de plomo a través del

proceso de lixiviación a temperatura ambiente con citrato a temperatura ambiente con la finalidad de reemplazar los métodos convencionales; la recuperación de plomo se realiza mediante lixiviación de un mineral de galena con alto contenido de plomo usando como lixiviante al citrato de sodio a baja concentración (0.2 M) y evaluar el efecto del pH en medio ácido, neutro y alcalino, asimismo se presenta el efecto del peróxido de hidrógeno (0.1 M) cómo oxidante durante la disolución de plomo.

EXPERIMENTAL

Caracterización del mineral

El trabajo se realizó con un mineral de galena proveniente de una planta de tratamiento de minerales del estado de Zacatecas-México. Este mineral se redujo a una fracción de tamaño en un mortero de ágata. Las especies minerales presentes en la muestra se determinaron por difracción de rayos X (Advance D8), en un intervalo de 2° a 90° para un ángulo de 2θ a la velocidad de 8°/min, y el contenido metálico se determinó por digestión ácida. La muestra se redujo de tamaño menor que 53 µm en un mortero de ágata y una fracción representativa del todo el mineral de 0.1 g se pasó a digestión con agua regia (75% HCl y 25% HNO_3), la solución obtenida se analizó en un espectrómetro de absorción atómica (SpectrAA Varian AA220).

Materiales y equipos

Todas las soluciones utilizadas en este trabajo fueron preparadas con reactivos de grado químico, agua desionizada, citrato de sodio ($NaH_2(C_3H_5O(COO)_3)$), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH), marca Meyer.

Las pruebas se realizaron en un reactor de agitación orbital (SK-300, figura 1) con matraces Erlenmeyer de 250 mL (pyrex), en los cuales se tomaron los datos de pH y ORP; así como las muestras en los tiempos establecidos, estas muestras se filtraron con ayuda de filtro (PTFE 0.22 µm) para su análisis por absorción atómica. Los valores de pH y ORP fueron tomados con ayuda de un medidor multiparámetro Hanna S-5521, para las lecturas del potencial redox relativas al electrodo de hidrógeno estándar, Eh (SHE) se calculó con la lectura del electrodo de platino ORP/Redox (E) y el potencial desarrollado por la parte del electrodo de referencia relativo al SHE (E_{ref}) a 25 °C ($Eh = E + E_{ref}$).

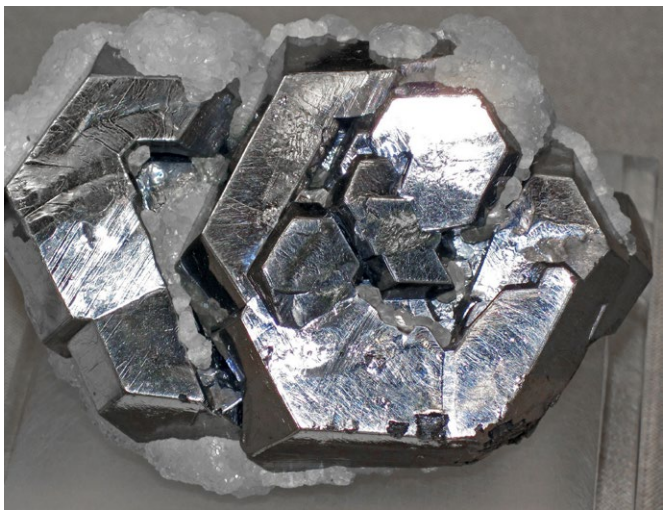


Figura 1. Reactor experimental con el multiparámetro para toma de datos y muestras.

Para el trabajo se realizaron una serie de pruebas, con el mineral de galena (PbS) y la solución de citrato de sodio a una relación sólido/liquido de 3 g/L, 0.2 M de citrato y se evaluó la presencia del peróxido de hidrógeno como agente oxidante en el sistema a 0.1 M a diferentes valores de pH 5, 6, 7, y, 8 a una velocidad de 250 revoluciones por minuto y temperatura ambiente de 25°C (tabla 1). El tiempo total de las pruebas de lixiviación fue de 10 horas, donde se tomaron muestras a intervalos de 1, 2, 4, 6, 8 y 10 horas, además se realizó el ajuste de condiciones pH con ácido sulfúrico diluido. Todas las pruebas se realizaron en el laboratorio de metalurgia en la Facultad de Ingeniería-Universidad Nacional Autónoma de México y en la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Tabla 1. Condiciones para las pruebas de lixiviación.

Parámetro	Valor
Volumen, mL	100
Peso del mineral, g/L	3
Concentración de citrato, M	0.2
Concentración de peróxido, M	0.1
pH	5, 6, 7, y 8
Tiempo, h	10
Velocidad de agitación, rpm	250

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Caracterización

La muestra proveniente del estado de Zacatecas fue pulverizada a una fracción de tamaño de partícula de -53/+44 µm y fue analizada en un equipo de difracción de rayos X, la figura 2 muestra el difractograma obtenido con la muestra, donde se observa la presencia los picos representativos de la galena (1-01-0880) y ruido asociado al tamaño de partícula; el contenido metálico determinado por digestión ácida se presenta en la tabla 2 donde se tiene un contenido metálico de plomo del 69.87% con pequeñas trazas de hierro (0.19%) y cobre (0.28%).

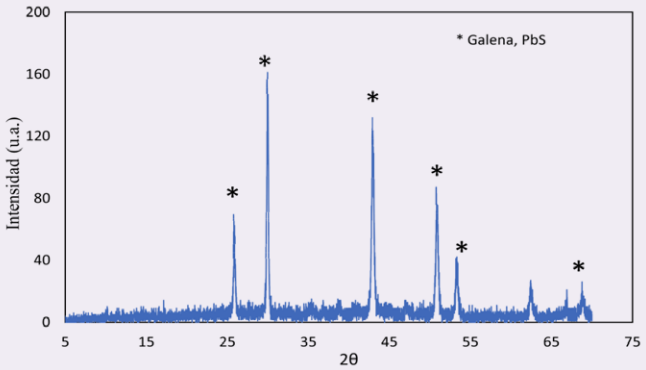


Figura 2. Difractograma de Rayos X de la muestra.

Tabla 2. Contenido metálico de la muestra.

Contenido Metálico (%)		
Pb	**Fe**	**Cu**
69.87	0.19	0.28

Lixiviación

Las pruebas de lixiviación se realizaron con la finalidad de evaluar la disolución del mineral de galena en presencia del citrato (0.2 M) a diferentes valores de pH en ausencia y presencia de peróxido de hidrógeno como oxidante.

Para estudio de las condiciones de las pruebas de lixiviación fue necesario la construcción de algunos diagramas de predominancia (Eh-pH, Pourbaix) por lo que se establecieron los equilibrios químicos presentados en la tabla 3.

Tabla 3. Constantes termodinámicas para las reacciones del sistema plomo-citrato at 25°C [11].

Reacción	Log K	Ecuación
$Pb^{2+} + H^{+} + cit^{3-} = Pb(Hcit)$	11.21	(1)
$Pb^{2+} + H^{+} + 2cit^{3-} = Pb(Hcit)(cit)^{3-}$	-12.75	(2)
$2Pb^{2+} + 2cit^{3-} = Pb_2(cit)_2^{2-}$	-14.06	(3)
$2Pb^{2+} + 2cit^{3-} = Pb_2(Cit)^2(OH)_2^{4-} + 2H^{+}$	-1.96	(4)

La figura 3, presenta el diagrama de distribución de especies para el sistema citrato-agua a 25°C, este diagrama permite establecer la zona de estabilidad de las especies de citrato presentes en el sistema evaluado, donde a los valores de pH ensayados en las pruebas de lixiviación (5, 6, 7 y 8) se tienen las especies de $HCit^{2-}$ y Cit^{3-}.

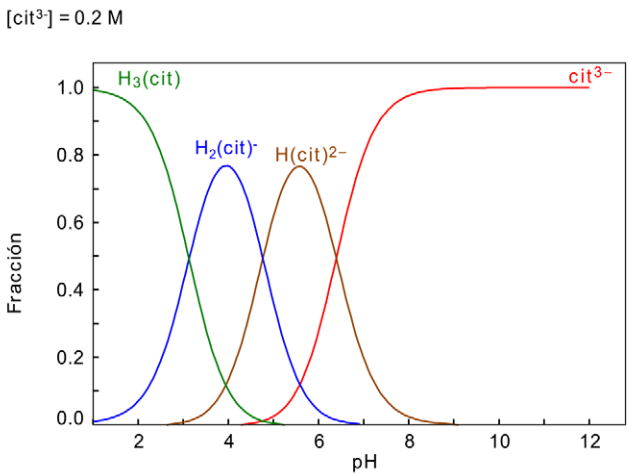


Figura 3. Diagrama de distribución de especies para el sistema citrato-agua, 0.2 M citrato a 25°C.

Finalmente, las zonas de predominancia de las especies del sistema citrato (Pb-cit) a 25 °C (figura 4) se determinaron con ayuda de los equilibrios electroquímicos y químicos presentes en el sistema a través de las ecuaciones (5 y 6), donde E y E° representan el potencial de celda y potencial estándar respectivamente (V), R es la constante de los gases ideales (8.314 J/mol·K), T es la temperatura en grados Kelvin (T, °C + 273.15), n es el número de electrones transferidos en la reacción, F es la constante de Faraday (96,485 C/mol).

$$E = E^{o} - \frac{2.303\ R\ T}{n\ F}\ Log\ K \qquad (5)$$

$$\Delta G^{\circ} = -2.303\ R\ T\ Log\ K \qquad (6)$$

La figura 4, muestra las zonas de predominancia para el sistema plomo-citrato calculados con las constantes presentadas en la tabla 3 y las Ecuaciones 5, 6 y la ecuación de Nernst (Ecuación 7), donde se puede observar que en el rango de pH ensayado se tienen la presencia de la especie $Pb(cit)^{-}$ por lo que se espera que la disolución del mineral se realice con toda facilidad, para poder obtener el complejo Pb-Cit^{-}.

$$E = E^{o} - \frac{2.303\,RT}{n} LogK \qquad a\ 25°C \qquad (7)$$

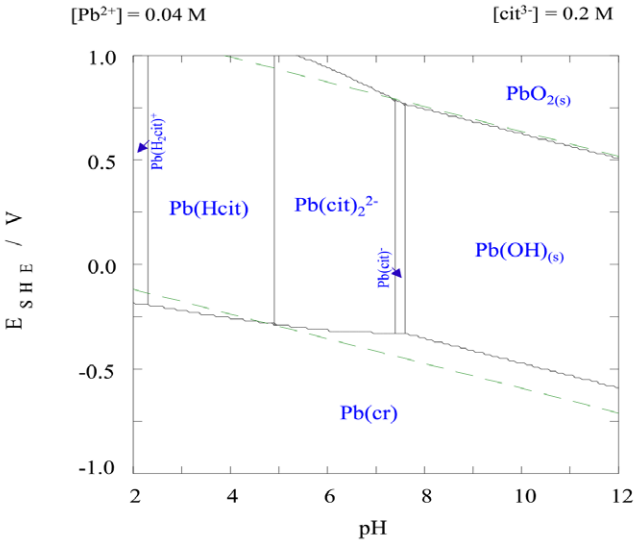


Figura 4. Diagrama de predominancia para el sistema plomo-citrato para 0.04 M Pb y 0.2 M citrato a 25°C [12].

Efecto del pH y H_2O_2

La figura 5, presenta los resultados de las pruebas de lixiviación del mineral a diferentes valores de pH y una concentración de 0.2 M de citrato; para estas pruebas, la recuperación de plomo presente en la muestra de galena tiene un comportamiento inestable durante el proceso de lixiviación del plomo contenido en la galena a pesar de la presencia del citrato. La recuperación del plomo es menor que 29%, el citrato tiene la capacidad de formar complejos estables con el plomo a los valores de pH ensayados (figura 4). Es importante mencionar que en estas pruebas no se utilizaron agentes oxidantes o reductores que faciliten el proceso de disolución de la galena.

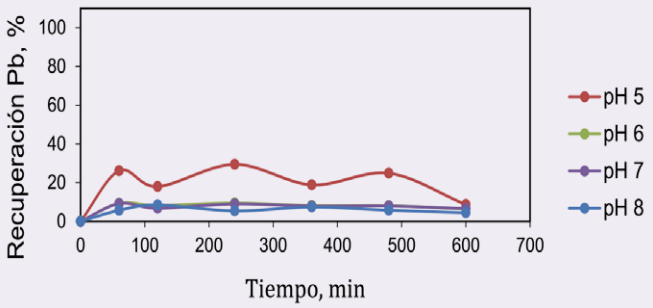


Figura 5. Recuperación de plomo en pruebas sin peróxido de hidrógeno a diferentes pH.

En la figura 5 se obtiene una recuperación de plomo menor que 30% a todos los valores de pH ensayados y un potencial menor que 400 mV (figura 6), este comportamiento confirma la importancia del uso del agente oxidante en el proceso de lixiviación de la galena.

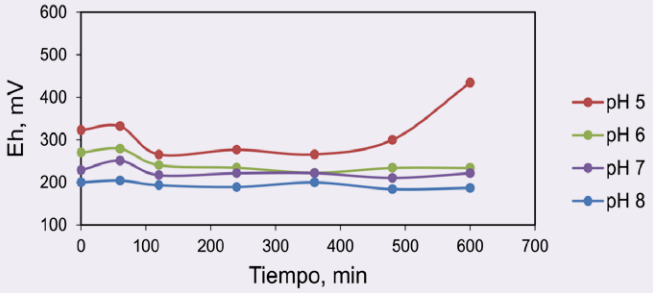


Figura 6. Potencial óxido-reducción para el sistema Pb-Cit sin oxidante a diferentes valores de pH.

La figura 7, muestra las zonas de predominancia para el sistema PbS-Cit a temperatura ambiente donde la estabilidad de PbS se extiende en todo el rango de pH y varia con respecto al potencial del sistema y el pH en la medida que el pH se incrementa de 6 a 8 la estabilidad de PbS disminuye.

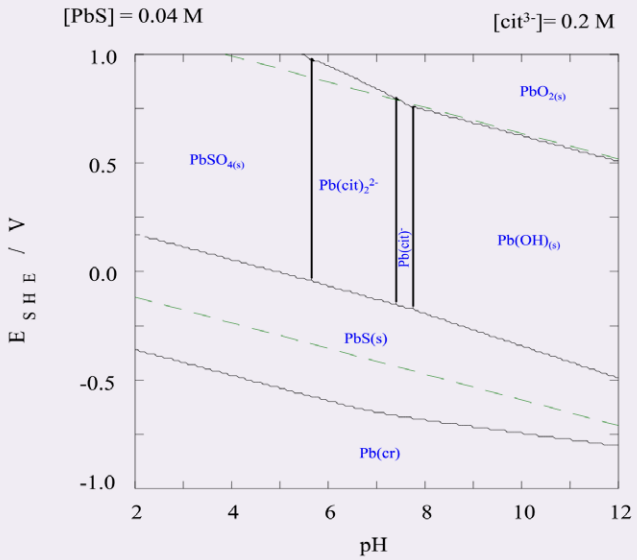


Figura 7. Diagrama de predominancia para el sistema PbS-Cit a diferentes valores de pH a 25 °C.

La figura 8, presenta la recuperación de plomo por lixiviación con citrato a diferentes valores de pH, a una concentración de 0.1 M de peróxido (H_2O_2) como agente oxidante. A estas condiciones en medio neutro y alcalino, pH 6, 7 y 8 se tienen altas disoluciones de plomo alcanzando 95.4, 99.7 y 99.9%, respectivamente; este comportamiento está relacionado a la formación del complejo plomo-citrato (Pb-cit, figura 6) esta zona de estabilidad del complejo se reduce en la medida que disminuye el valor del pH; por lo tanto, se tiene una menor recuperación a pH 6 (41.6 %) a los 600 min. A pH 8 se alcanza una mayor recuperación de plomo a tiempos menores de 60 min; sin embargo, este presenta un descenso en la recuperación de plomo a los 120 min este comportamiento pude estar relacionado a la formación de sólidos causando inestabilidad, en el sistema que a tiempos mayores de 500 min la recuperación de plomo se favorece debido a que se tiene una baja concentración de hierro en el sistema.

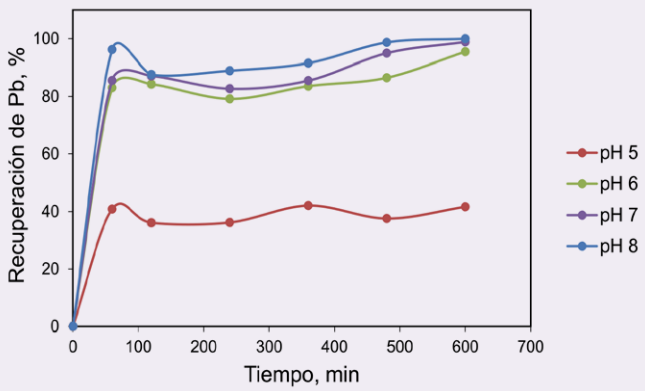


Figura 8. Recuperación de plomo para el sistema Pb-Cit a diferentes valores de pH con 0.1 M H_2O_2.

El efecto del oxidante (H_2O_2) juega un rol importante debido a que un incremento del potencial de óxido-reducción (ORP) permite la disolución de PbS, cuando este no está presente en el sistema el valor de potencial es menor que 400 mV vs SHE (figura 6); al adicionar 0.1 M H_2O_2 el potencial del sistema se incrementa a un valor mayor que 400 mV vs SHE (figura 9). En cuanto a la recuperación de plomo, en presencia del peróxido de hidrógeno se presenta en la (figura 8), donde se tiene una mayor recuperación en el sistema neutro y alcalino (pH 7 a pH 8) con un porcentaje de disolución cercano al 96% a la primera hora de iniciada la prueba; en la medida que se modifica el pH a un medio ácido, el porcentaje de recuperación es de 80% para pH 6 y finalmente a pH 5 la recuperación disminuye a un valor de 40%. De acuerdo a este comportamiento se puede asegurar que el sistema de lixiviación alcalino es el más eficiente para la recuperación del plomo presente en la galena bajo las condiciones ensayadas.

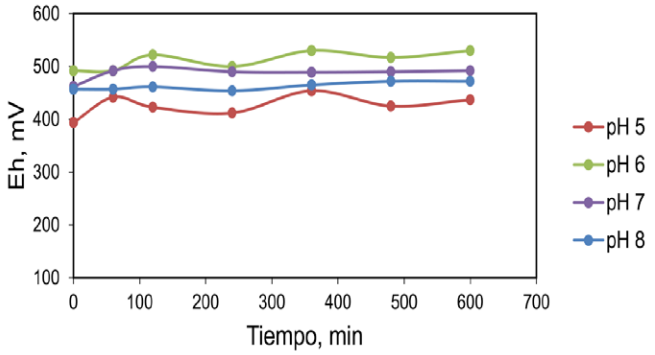


Figura 9. Potencial oxido-reducción para el sistema Pb-Cit con oxidante a diferentes valores de pH.

En cuanto al comportamiento de la disolución del hierro se presenta en la tabla 4, la disolución es menor que 2 ppm mostrando un comportamiento inestable por el contenido de la muestra y el valor de pH ensayado.

Tabla 4. Disolución de hierro a diferentes valores de pH y 0.2 M Cit, con 0.1 M H_2O_2 y sin H_2O_2 a 25 °C.

Disolución de hierro (ppm)		
pH	pruebas con peróxido	pruebas sin peróxido
5	2.10	0.6
6	0.89	1.2
7	1.40	0.3
8	0.03	0.8

La figura 10 presenta el diagrama de distribución de especies para el sistema hierro-citrato (Fe-Cit) donde a un pH mayor que 6 se tiene la presencia de Fe_2O_3 en forma sólida el cual es el posible responsable de la baja disolución del hierro en el sistema y promueve una mayor selectivi-

dad del citrato por el plomo. El comportamiento del cobre no forma parte del estudio debido a la baja concentración presente en el mineral.

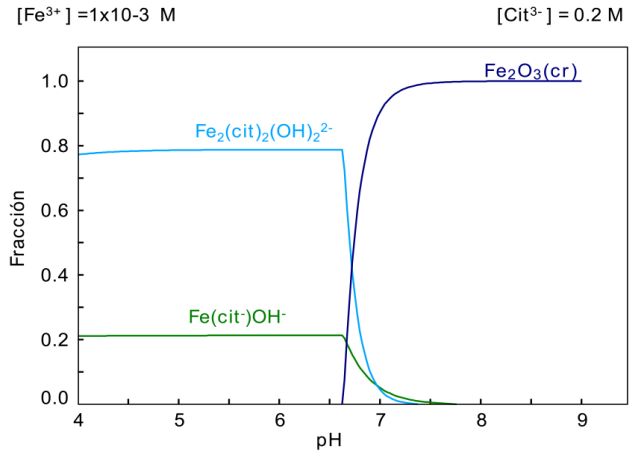


Figura 10. Diagrama de distribución de especies para el sistema Fe-Cit, 1x10^{-3} Fe^{3+}, 0.2 M Cit a 25°C.

En la figura 11A se puede observar el residuo generado del proceso de disolución de la galena con citrato sin peróxido donde este es incompleto para cualquier valor de pH (5, 6, 7, 8) al final de las pruebas se muestra casi la mitad en relación a la muestra inicial a diferencia la figura 11B muestra los residuos del proceso de lixiviación con oxidante donde disolución del mineral es completa para pH 8 y en medida que baja el valor del pH la disolución se ve afectada hasta llegar a un pH 5 donde queda una mayor cantidad del mineral sin disolver.

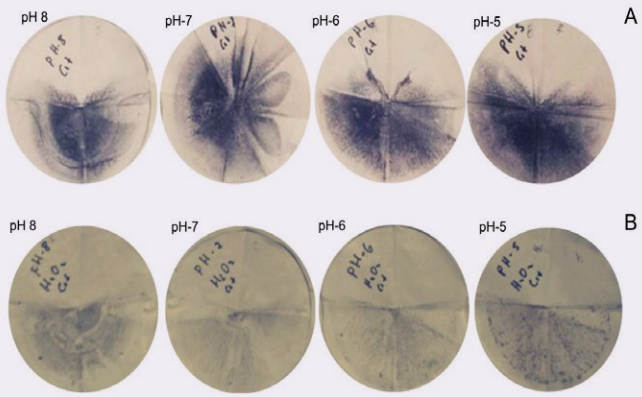


Figura 11. Residuos de la lixiviación, A sin oxidante, y B con oxidante

CONCLUSIONES

Para el sistema propuesto a pH 5, 6, 7 y 8 a temperatura ambiente 25 °C y a una velocidad de 250 rpm la disolución de plomo se lleva a cabo en presencia de citrato en una concentración de 0.2 M y peróxido de hidrógeno a 0.1 M, en medio alcalino se alcanza una mayor disolución de plomo en presencia del peróxido de hidrógeno, dónde se consiguen resultados favorables para el plomo (99.9%) antes de llegar a la primera hora de lixiviación a pH 8. La disolución de hierro presenta una menor disolución (0.03 ppm) debido al potencial de oxidación alcanzado (mayor que 400 mV vs SHE) donde se propicia a la lixiviación selectiva de la galena. El uso del peróxido es determinante para que se lleve a cabo el proceso de disolución del plomo.

RECOMENDACIONES

Es necesario integrar al proceso de lixiviación de plomo una etapa de recuperación de los valores presentes en la solución por precipitación o electrodeposición tomando en cuenta los resultados mostrados hasta el momento, concentración de citrato y pH, se requiere de un método que no demandé exceso de reactivos, energía y tiempo para que pueda ser adoptado en la industria.

AGRADECIMIENTOS.

Investigación y experimentación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) "lixiviación selectiva de cobre y plomo a partir de sulfuros en medio alcalino con tiourea (Tu) y otros agentes orgánicos". Clave del proyecto: IA 10622.

BIBLIOGRAFÍA

[1] David O'Connor, Deyi Hou, Jing Ye, Yunhui Zhang, Yong Sik Ok, Yinan Song, Frederic Coulon, Tianyue Peng, Li Tian, (2018). "Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications." Environment International 121: 85-101. https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.052.

[2] United States Geological Survey, USGS (2021). Mineral Commodity Summary. Series definitions. USGS Publications Warehouse.

[3] Chuh-Shun Chen, Yu-Jen Shih, Yao-Hui Huang (2016). Recovery of lead from smelting fly ash of waste lead-acid battery by leaching and electrowinning. Waste Management, 52, 212-220. doi:https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.056

[4] Y.S. Rammah, K.A. Mahmoud, M.I. Sayyed, F.I. El-Agawany, R. El-Mallawany (2020). "Novel vanadyl lead-phosphate glasses: P2O5–PbO–ZnONa2O–V2O5: Synthesis, optical, physical and gamma photon attenuation properties." Journal of Non-Crystalline Solids 534: 119944. https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119944

[5] John, J. J., De Houwer, V., Van Mechelen, D., & Van Gerven, T. (2020). Effect of ultrasound on leaching of lead from landfilled metallurgical residues. Ultrasonics Sonochemistry, 69, 105239. doi:https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105239

[6] Hou, Z., Peng, C., Guangyuan, M., Zhang, X., Zhang, L., & Lu, Z. (2022). Lead leaching behaviors during panel-funnel glass waste separation from cathode-ray tube glass using thermosol, acid etching or mechanical cutting methods. Journal of Saudi Chemical Society, 26(6), 101557. doi:https://doi.org/10.1016/j.jscs.2022.101557

[7] Zárate-Gutiérrez, R. and G.T. Lapidus (2014). "Anglesite (PbSO4) leaching in citrate solutions." Hydrometallurgy 144-145: 124-128. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.02.003

[8] Xie, H., Xiao, X., Guo, Z., & Li, S. (2022). One-stage ultrasonic-assisted calcium chloride leaching of lead from zinc leaching residue. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 176, 108941. doi:https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108941

[9] Xinfeng Zhu 1, Xiong He, Jiakuan Yang, Linxia Gao, Jianwen Liu, Danni Yang, Xiaojuan Sun, Wei Zhang, Qin Wang, R Vasant Kumar.(2013) "Leaching of spent lead acid battery paste components by sodium citrate and acetic acid," Journal of Hazardous Materials, vol. 250-251, pp. 387-396, 2013/04/15/ 2013.

[10] G. Han, P. Wang, C. Zhu, B. Liu, S. Su, and Y. Huang, "Synchronous extraction of Mn, Pb, Sn, and Se from hazardous electrolytic manganese anode slime (EMAS) via sulfidation transformation and leaching: Rapid separation and sulfidation mechanism," Minerals Engineering, vol. 184, p. 107657, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107657

[11] NIST (2004). Critically Selected Stability Constants of Metal Complexes. Version 8.0.

[12] Puigdomenech, I. (2004). Make equilibrium diagrams using sophisticated algorithms (MEDUSA), inorganic chemistry. Stockholm, Sweden

Cómo citar este artículo:

Pantaleón Tolentino, D. M., Calla Choque, D., & Santos Jallath, J. E. (2023). Lixiviación de plomo con citrato a partir de un mineral de galena, efecto del pH. EPISTEMUS, 17(34). https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.273

Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis

Removal of Zinc from a Synthetic Effluent by Electrodialysis

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

Lucia Hernández Lavalle [1]
Jaime Cristóbal Rojas Montes [2]
Luís Ramón Arellano Piña [3]
Víctor Jesús Martínez Gómez [4]
Diana Cristina Martínez Casillas [5]

Recibido: 14 / 11 / 2022
Aceptado: 12 / 05 / 2023
Publicado: 07 / 06 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.266

Autor de Correspondencia:
Jaime Cristóbal Rojas Montes
Correo: jrojas@itdurango.edu.mx

Resumen

La contaminación del agua con metales pesados representa una problemática para la salud humana y el medio ambiente. El zinc es uno de metales más comunes en la contaminación del agua, que se realiza en una amplia variedad de procesos industriales. La electrodiálisis es una técnica electroquímica utilizada para la eliminación de iones metálicos, en dónde, estos se separan de la solución acuosa mediante un proceso de transporte bajo la influencia de un campo eléctrico. Es una técnica prometedora debido a su alta eficiencia y bajo costo. A medida que la demanda de agua limpia aumenta, la electrodiálisis se convierte en una alternativa atractiva para la eliminación de contaminantes, especialmente en áreas donde los recursos hídricos son escasos o donde los métodos convencionales no son efectivos. En este artículo, se describirá el proceso de electrodiálisis y su aplicación en la remoción de zinc del agua en un efluente sintético.

Palabras clave: electrodiálisis, remoción de zinc, tratamiento de aguas.

Abstract

Water contamination with heavy metals represents a problem for human health and the environment. Zinc is one of the most common metals in water pollution, which is used in a wide variety of industrial processes. Electrodialysis is an electrochemical technique used for the removal of metal ions, where they are separated from the aqueous solution by a transportation process under the influence of an electric field. It is a promising technique due to its high efficiency and low cost. As the demand for clean water increases, electrodialysis becomes an attractive alternative for contaminant removal, especially in areas where water resources are scarce or where conventional methods are not effective. In this paper, the electrodialysis process and its application in the removal of zinc from water in a synthetic effluent will be described.

Keywords: *electrodialysis, removal, water treatment.*

1 *El Dr. Jaime Cristóbal Rojas Montes es Catedrático Investigador por CONACYT en el Programa de Posgrado de Sistemas Ambientales en la Unidad de Posgrado e Investigación de TecNM/IT Durango, Dgo. México. Email: crojas@itdurango.edu.mx ORCID: 0000-0003-4344-9046*
2 *Ing. Lucia Hernández Lavalle, actualmente estudiante en el Programa de Posgrados de Sistemas Ambientales, en la Unidad de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Durango, en la Cuidad de Durango, Dgo. México. Email: 13041317@itdurango.edu.mx ORCID: 0009-0005-3409-5778*
3 *El Dr. Luís Ramón Arellano Piña es profesor investigador de la UPIIZ Facultad en Flotación de minerales en Zacatecas, Zac. México. ORCID: 0000-0002-7620-1517*
4 *El Dr. Víctor Jesús Martínez Gómez es Catedrático Investigador por CONACYT en el Programa de Posgrado de Sistemas Ambientales en la Unidad de Posgrado e Investigación de TecNM/IT Durango, México. Email: v.martínez@itdurango.edu.mx ORCID: 0000-0002-5313-3494*
5 *La Dra. Diana Cristina Martínez Casillas es Profesora Investigadora en la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Juriquilla, en la Universidad Autónoma de México martinez.c.dian@gmail.com ORCID: 0000-0002-0128-3335*

INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento y desarrollo a nivel mundial, ha aumentado el consumo de recursos naturales, alterando el medio ambiente y provocando contaminación de diversos ecosistemas. Esta contaminación ha generado la acumulación de diversos compuestos que son tóxicos para los seres vivos, siendo este el caso de los metales pesados. Actualmente, hablar sobre metales pesados se ha convertido sin lugar a duda en uno de los temas de mayor importancia tanto a nivel medio ambiental como en salud. Mediante la implementación de normas se ha buscado minimizar el impacto de dichos metales, sin embargo, no hay manera de que exista una calidad de vida, así como desarrollo económico sin la minería y aunque la minería es necesaria para el desarrollo económico, es esencial proteger el medio ambiente para evitar consecuencias irreparables [1].

La industria minera es uno de los ejes económicos más importantes del país, que incluye operaciones de prospección, exploración, extracción, fundición y recuperación de minerales. Según la Secretaría de Economía en el 2021 a nivel mundial, México se ubica en la primera posición en producción de plata y en los diez primeros lugares en la producción de minerales metálicos que contienen bismuto, cadmio, molibdeno, plomo, zinc, oro y cobre. Asimismo, de minerales no metálicos como wollastonita, diatomita, sal, fluorita, celestita, barita, grafito y yeso [7] [8].

A pesar de la importancia económica de la industria minera, la contaminación del agua con metales pesados es un problema para la salud humana y el medio ambiente. El zinc, metal utilizado en diversas industrias, puede contaminar el agua a través de vertidos industriales y residuos mineros y su presencia puede ser perjudicial para la salud y la vida acuática. Para garantizar la calidad del agua y proteger el medio ambiente es crucial eliminar los iones de zinc del agua. La contaminación del agua con zinc se da principalmente de manera antropogénica, incluyendo efluentes municipales e industriales, actividades mineras y geológicas, así como algunas fuentes difusas secundarias. La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 establece

un límite máximo permisible de 10 mg/l promedio mensual para la descarga de aguas residuales y bienes nacionales con respecto al zinc en varias actividades, incluyendo uso público urbano, riego agrícola, protección de vida acuática en embalses naturales y artificiales, aguas costeras, explotación pesquera, navegación, recreación y estuarios [4][6].

La electrodiálisis es una técnica que ha demostrado ser efectiva en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados, ha sido ampliamente utilizada para eliminar contaminantes específicos como el zinc ya que es un método altamente selectivo. La electrodiálisis es un proceso que puede operar a bajas presiones, lo que reduce el consumo de energía y minimiza los costos operativos. También es una técnica que puede ser aplicada en continuo, lo que aumenta la eficiencia del proceso y reduce los tiempos de tratamiento. Es importante mencionar que la electrodiálisis no es la única técnica disponible para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales, sino que existen otras opciones como la precipitación química, la adsorción, la oxidación y la reducción, que también han demostrado ser efectivas en la eliminación de metales pesados del agua.

El objetivo de esta investigación es realizar una serie de pruebas con un efluente sintético, el cual tiene características muy similares a la de un efluente real, con la finalidad de evaluar la eficiencia del método y posteriormente, en una segunda etapa, poderlas implementarlas a un efluente real minero.

En una investigación realizada por Babilas y Dydo [3], llevaron a cabo un estudio en el que se evaluó la recuperación de zinc de aguas residuales de galvanoplastia, mediante electrodiálisis con membranas compuestas activadas. En el proceso se analizó la recuperación de zinc y hierro (impureza presente en este tipo de efluentes) mediante agentes quelantes (ácido láctico, málico y cítrico). Se utilizó un módulo de electrodiálisis de cinco compartimentos con un área de membrana de 16 cm^2. El experimento se llevó a cabo con una densidad de corriente eléctrica constante de 250 A/m^2, la duración de cada experimento fue de una hora. Como resultados, se observó un coeficiente

de retención de hierro del 92.36%. Se concluyó que el método permitió una recuperación de zinc del 86.6% con una eficiencia de corriente del 84.95%.

En un estudio, realizado por Noroozi y col. [8], titulado: *"Electrodialysis for removal of zinc ions from aqueous solutions: Optimization of operating conditions and electrode materials"* se reportó la eficacia de la técnica de electrodiálisis en la remoción de iones de zinc en soluciones acuosas. Evaluaron diferentes condiciones operativas y materiales de electrodo para optimizar el proceso de remoción de zinc en dónde, utilizaron diferentes densidades de corriente (50, 100, 150 y 200 A/m^2), como electrolito se preparó una solución sintética que contenía 100 mg/L de iones de zinc y otros iones. Se encontró que la densidad de corriente de 200 A/m^2 proporcionó la mayor eficiencia de remoción de zinc. El proceso de electrodiálisis fue capaz de eliminar efectivamente el zinc cuando aumentó con la densidad de corriente y la concentración inicial de zinc.

En otro estudio realizado por El-Naas y col. [4], los autores investigaron la separación de iones de zinc mediante la técnica de electrodiálisis usando una celda de dos compartimentos. Con una densidad de corriente constante de 25 A/m^2 durante todo el experimento y un electrolito sintético de cloruro de zinc con una concentración inicial de 1000 mg/L. Los autores encontraron que la eficiencia fue del 99.4% después de una hora de electrodiálisis y del 99.9% después de dos horas de tratamiento. Los autores también concluyeron que la electrodiálisis es una técnica efectiva para la eliminación de zinc, con el potencial de ser utilizada a escala industrial para el tratamiento de aguas residuales que contienen zinc.

DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Se evalúa el método de electrodiálisis como una alternativa para remover o disminuir la presencia del zinc en soluciones acuosas, esta técnica está representada por la figura 1. Las variables estudiadas en este proyecto son la densidad de corriente, la velocidad de recirculación y el pH. Las condiciones de operación se establecen en la tabla 1. Las pruebas fueron realizadas en una celda de electrodiálisis que contenía una placa de grafito como ánodo y una placa de acero inoxidable como cátodo, ambas con un área superficial expuesta de 68 cm^2. La celda de electrodiálisis está separada por una membrana de intercambio aniónico MA-7500 y una membrana de intercambio catiónico modelo CMI-7000. El suministro de energía eléctrica se realizó con una fuente de poder de corriente directa de la marca Tektronix DC (PWS4305) y la recirculación se llevó a cabo con una bomba peristáltica marca CONTRO1079.

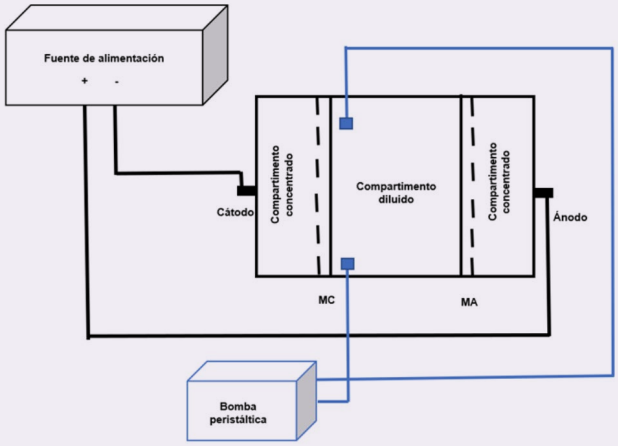


Figura 1. Esquema de electrodiálisis con recirculación

Tabla 1. Condiciones de operación establecidas para las pruebas de electrodiálisis.

Variable	Rangos de operación
Densidad de corriente (A/m^2)	10, 30, 60, 90, 120, 150
Velocidad de recirculación (ml/min)	10, 30, 50, 78, 107
pH	4, 5, 6, 7, 8

El primer paso para la metodología consistió en elaborar una celda de electrodiálisis de polimetilmetacrilato de tres compartimentos figura 2. La duración de las pruebas de electrodiálisis fue de 60 minutos, con una concentración inicial del efluente sintético de 50 ppm de zinc ($ZnSO_4$) y como solución auxiliar Cloruro de Sodio (NaCl) para los compartimentos concentrados, temperatura inicial de 25±2°C, pH y conductividad eléctrica, de acuerdo con la norma NMX-AA-008-SCFI-2000 *Análisis de agua – determinación del pH – método de prueba* y NMX-AA-007-SCFI-2013 *Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba*. Se tomaron muestras en los tiempos de 0, 5, 30, 45 y 60 minutos, las cuales se aforaron con agua destilada en un matraz volumétrico y posteriormente se determinó la concentración de zinc mediante análisis químico; el cual, se llevó a cabo por medio de un espectrofotómetro de absorción atómica Marca GBC Modelo AVANTA de acuerdo con la norma NMX-AA-051-SCFI-2016 *Análisis de agua – medición de metales por absorción atómica en aguas natu-*

rales, potables, residuales y residuales tratadas -método de prueba. Las variables de operación se tomaron con base en el estudio realizado por Arreola y Col. [2].

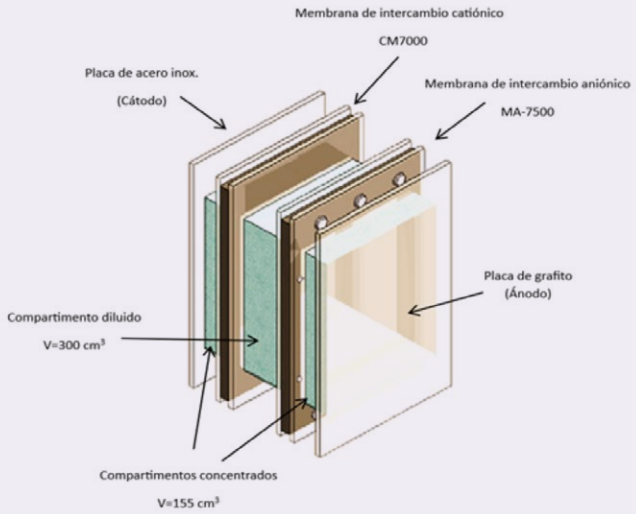


Figura 2. Esquema gráfico de la celda de electrodiálisis.

Con base en los valores obtenidos en el análisis químico, se realizaron los cálculos correspondientes para determinar los porcentajes de remoción alcanzados en cada intervalo de tiempo. Finalmente, se realizaron gráficos de acuerdo con los resultados obtenidos mismos que representan el porcentaje de remoción total y la cinética de remoción para determinar los mejores resultados. La primera variable estudiada fue la densidad de corriente, con una concentración de zinc en el efluente fue de 50 ppm, durante estas primeras pruebas se trabajó con el valor intermedio de pH inicial (pH_i) de 6, mismo pH que la solución sintética presentaba inicialmente, por lo que no fue necesario modificarlo, de igual manera se propuso una velocidad de recirculación de 50 mL/min. Cabe mencionar que estos valores se encuentran dentro de los rangos de operación propuestos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Densidad de corriente en la remoción de zinc.

Los resultados que se alcanzaron en las pruebas de electrodiálisis se muestran en la figura 3, en dónde la cinética de remoción de zinc está función de la densidad de corriente, obteniendo que la eficiencia en la remoción aumenta a medida que aumenta la densidad de corriente. Además, se puede observar que la eficiencia de remoción llega a un punto máximo para cada densidad de corriente; esto quiere decir, que ya no hay una mayor remoción porque la reacción está limitada por la disponibilidad de iones de zinc en la solución. El punto máximo, es aquel en el que la cantidad de iones de zinc que se disuelven en la solución alcanza su límite, debido a que la velocidad de la reacción de disolución de los iones en la superficie del electrodo se iguala a la velocidad de la reacción de precipitación de iones de zinc en la solución. En este punto, no importa cuánto se aumente la densidad de corriente, la cantidad de iones de zinc en la solución permanecerá constante y no habrá un aumento adicional en la eficiencia de remoción de zinc. Por lo que aumentar más allá de 120 A/m^2, no sería tan viable, esto de acuerdo con el estudio realizado por Noroozi y col. [8], que explican, que una densidad de corriente demasiado alta podría provocar problemas como la polarización del electrodo y la disminución de la eficiencia de remoción por lo que se sugiere un equilibrio cuidadoso al seleccionar la densidad de corriente óptima.

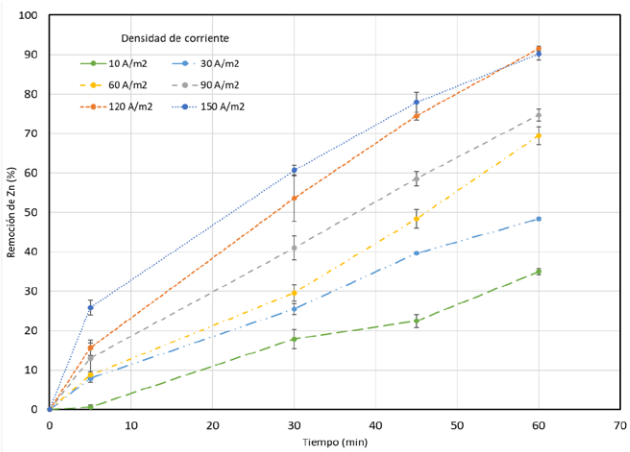


Figura 3. Cinética de Remoción de zinc en función de la densidad de corriente. Velocidad de recirculación: 50 ml/min; pH_i=6, t=60 min.

En la figura 4 se muestran las remociones finales en función de la densidad de corriente desde otra perspectiva. La representación gráfica de ésta se realizó con los mismos valores de operación que la figura 3; se puede observar que de igual manera cuando la densidad de corriente es baja no se obtienen buenas remociones y conforme aumenta el valor de operación de esta, aumenta también el porcentaje de remoción llegando a valores de 91.55% con una densidad de 120 A/m^2,en un tiempo de 60 minutos; siendo este el máximo alcanzado para estas condiciones de operación.

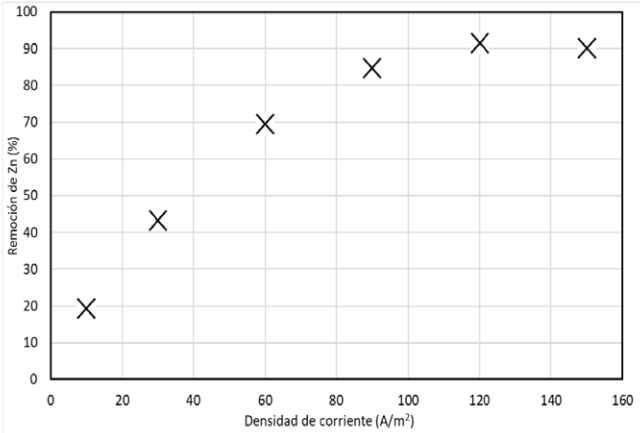


Figura 4. Comparación de la densidad de corriente en el porcentaje de remoción de zinc a pH_i=6; velocidad de recirculación 50 ml/min, t=60 min.

Los resultados alcanzados se relacionan con los voltajes de celda obtenidos, como se observa en la figura 5, a mayor densidad de corriente se presentan mayores valores en el voltaje de celda; consecuentemente, a mayor valor de densidad de corriente se prevé que se tenga una mayor fuerza impulsora para la difusión de iones entre los compartimentos. La gráfica muestra que, a medida que aumenta la densidad de corriente, también aumenta el voltaje necesario para mantener la corriente constante. En otras palabras, la relación entre la densidad de corriente y el voltaje no es lineal, sino que muestra una curva ascendente.

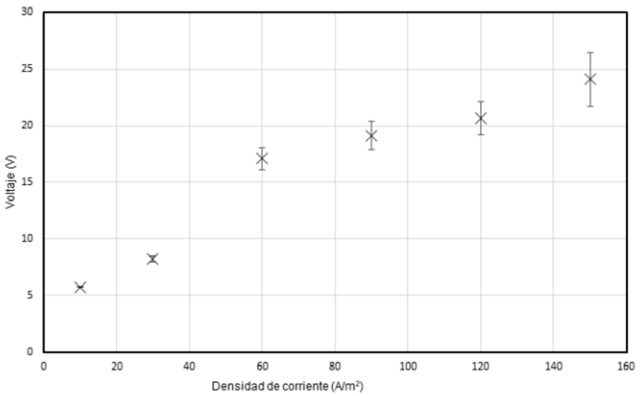


Figura 5. Voltaje de celda en función de la densidad de corriente. velocidad de recirculación: 50 ml/min; ph_i=6; t=60 min.

Este comportamiento se debe a la resistencia inherente del sistema, que aumenta con la densidad de corriente. A medida que se incrementa dicha densidad , la corriente que fluye a través del sistema también aumenta, lo que produce un aumento en la resistencia y, por lo tanto, en el voltaje necesario para mantener la corriente constante. Es decir, la gráfica muestra que hay una relación no lineal entre la densidad de corriente y el voltaje en un proceso electroquímico, con un aumento significativo en el voltaje necesario a medida que se incrementa la densidad de corriente debido a la resistencia del sistema.

Velocidad de recirculación en la remoción de zinc.

La segunda variable estudiada fue la velocidad de recirculación, durante estas pruebas se trabajó con un pH inicial (pH_i) de 6 y una densidad de corriente en un valor de 120 A/m^2, ya que representó la mejor condición para la remoción en las cinéticas anteriores. Los resultados obtenidos para esta variable se muestran en la figura 6 en la cual se puede observar que a medida que se aumenta la velocidad de recirculación, también aumenta la remoción de zinc. Las mayores remociones se obtienen a partir de velocidades de recirculación de 10 mL/min, donde se logra una remoción del 85%, y a partir de 30 mL/min, se logran remociones superiores al 90%.

La densidad de corriente de 120 A/m^2 proporciona una alta eficiencia en la remoción de zinc debido a que se genera una cantidad suficiente de iones metálicos que migran hacia el cátodo, donde se depositan y se pueden retirar del sistema. En segundo lugar, el pH inicial de 6 es un valor adecuado para la remoción de zinc, ya que a este pH el zinc se encuentra mayormente en su forma iónica, lo que favorece su transporte hacia el cátodo. En cuanto a la velocidad de recirculación, se observa que a medida que esta aumenta, también lo hace la eficiencia de remoción de zinc, lo que sugiere que el proceso es dependiente de la velocidad de flujo. Este comportamiento puede ser explicado por la mejora en la transferencia de masa y la disminución de la difusión de concentración en la interfaz líquido-sólido.

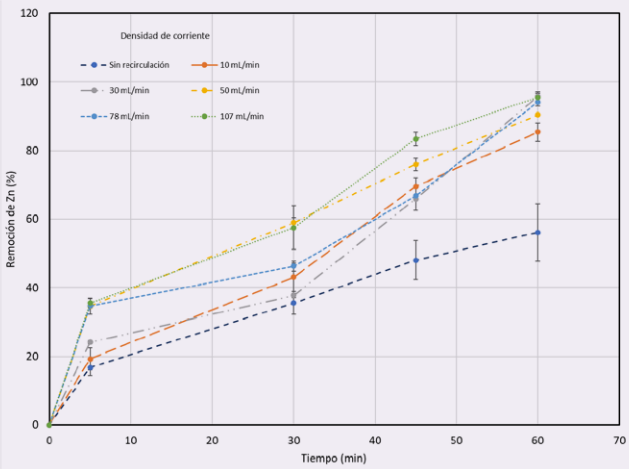


Figura 6. Cinética de Remoción de zinc en función de la velocidad de recirculación. Densidad de corriente:120 A/m^2; pH_i=6; t=60 min.

En la figura 7 es importante tener en cuenta que, aunque se haya logrado una remoción sin recirculación, esta eficacia es relativamente baja en comparación con

las remociones logradas con velocidades de recirculación mayores; ya que la recirculación permite que el agua se someta a un tratamiento continuo y a un mayor tiempo de exposición al proceso de electrodiálisis. Lo que podría explicar la mayor eficacia de remoción observada en las pruebas con velocidades de recirculación mayores.

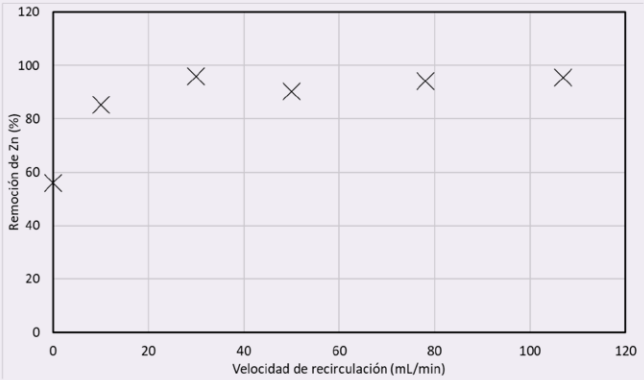


Figura 7. Porcentaje de Remoción Final de zinc en función de la velocidad de recirculación. Densidad de corriente:120 A/m^2; pH$_i$=6, t=60 min.

En este caso las densidades de corriente podrían estar permitiendo que los iones de zinc se muevan a través de la solución y se depositen en el electrodo, incluso sin la ayuda de la velocidad de recirculación. En resumen, la combinación de la densidad de corriente, un pH inicial adecuado y una velocidad de recirculación óptima son los factores clave que explican el comportamiento de la cinética de remoción de zinc en este proceso de electrodiálisis.

Es importante tener en cuenta que la velocidad de recirculación también puede tener otros efectos sobre el sistema, como la mezcla de la solución y la eliminación de productos de desecho; por lo que es probable que la combinación de la densidad de corriente y velocidad de recirculación haya producido una mayor remoción de zinc como se observa en las pruebas.

El pH en la remoción de zinc.

Los resultados que se alcanzaron en cada una de las pruebas de electrodiálisis para la variable de pH se muestran en la figura 8, la gráfica muestra la cinética de remoción de zinc en función del pH en el tiempo de 0 a 60 minutos. Se evaluaron cinco valores de pH diferentes para determinar el efecto del mismo en la eficiencia de la remoción de zinc. Se observó que la mayor remoción de zinc se logró a un pH inicial de 6, alcanzando una remoción final del 90.35%.

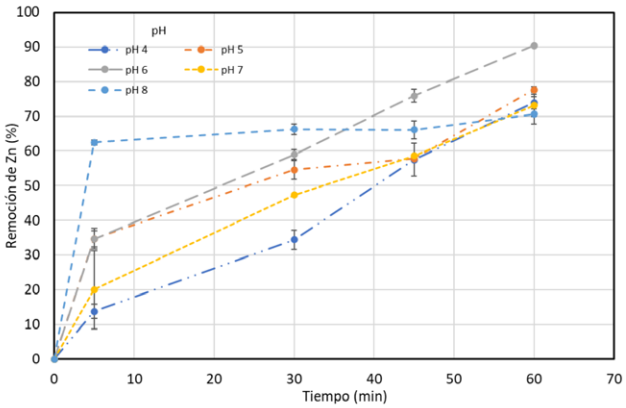


Figura 8. Cinética de Remoción de zinc en función del pH, densidad de corriente:120 A/m^2; velocidad de recirculación: 30 ml/min y t=60 min.

Este comportamiento puede explicarse por la distribución de las especies químicas del zinc en solución en función del pH, en soluciones ácidas, el ion Zn^{+2} es la especie predominante; mientras que, en soluciones alcalinas, los hidróxidos de zinc ($Zn(OH)_2$ y $Zn(OH)^{-3}$) son las especies predominantes. En este caso, la mayor remoción de zinc en un pH inicial de 6 se debe a la formación de $Zn(OH)_2$, ya que esta especie es menos soluble que el ion Zn^{+2}. Por otro lado, se observó que el pH inicial de 8 logró una mayor remoción durante los primeros 5 minutos. Esto podría deberse a la formación de $Zn(OH)^{-3}$, ya que esta especie es más soluble y más fácilmente removible mediante electrodiálisis. En general, los resultados de la gráfica sugieren que el pH es un factor crítico para la eficiencia de la remoción de zinc

por electrodiálisis y que el pH óptimo para la remoción de zinc en este efluente sintético es de alrededor de 6. Estos hallazgos pueden ser de gran utilidad para diseñar y optimizar procesos de tratamiento de aguas residuales que contengan zinc y otros metales pesados.

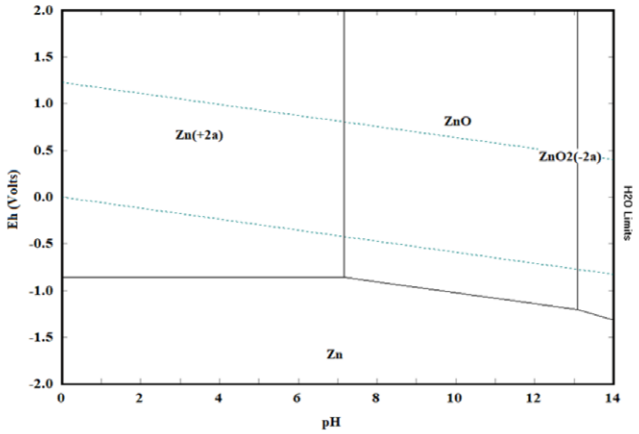


Figura 9. Diagrama de Pourbaix del sistema Zn-S-H_2O

Para poder tener una evaluación más completa y acertada de esta variable fue necesario realizar una simulación de diagrama de Eh-pH (Pourbaix) con ayuda del software HSC Chemistry 6.1. La simulación fue elaborada de acuerdo con las condiciones de la solución y la concentración de esta (50 mg/L de zinc). En la figura 9, se presenta un diagrama de Pourbaix dónde se representan las principales áreas de estabilidad termodinámica de la especie de interés (zinc) en función del potencial y del pH. En dicha figura, se puede observar que la especie predominante en este sistema es el zinc II (Zn^{+2}) para la mayoría de los valores (4 a 7) de pH estudiados y el óxido de zinc (ZnO) el cual comienza a aparecer en el pH de 8, por lo que de acuerdo con estos resultados la variable de pH sí tiene efecto sobre el proceso de electrodiálisis. En el diagrama de Pourbaix del sistema Zn-S-H2O, se puedo observar varias regiones que corresponden a diferentes especies químicas del zinc en función del pH y del potencial redox. En general, el diagrama muestra que el zinc y el sulfuro pueden formar una amplia variedad de especies químicas, dependiendo de las condiciones del medio. Sin embargo, este tipo de diagramas solo nos proporciona una visualización general, por lo que fue necesario realizar un diagrama de distribución de especies.

La simulación del diagrama de especiación (distribución de especies) fue realizada con ayuda del mismo software, dicho diagrama se encuentra representado por la figura 10. En este diagrama, se puede observar que se encuentra la presencia de nuevas especies, las cuales no aparecían en el diagrama de Pourbaix, como es el caso de algunos cloruros ($ZnCl^{+1}$ y $ZnCl3^{-1}$), así como de hidróxidos ($Zn(OH)_2$ y $ZnOH^{+1}$). Analizando con más cuidado este diagrama se puede observar que a medida que el valor del pH aumenta (valores mayores a 7), el óxido de zinc (ZnO) aumenta su concentración, por lo que la concentración de los iones de zinc II comienza a disminuir.

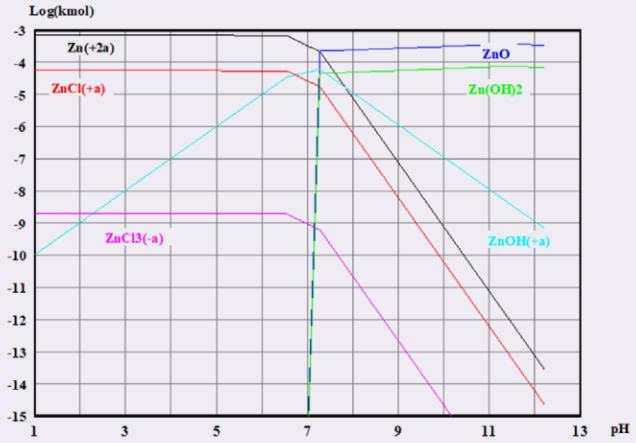


Figura 10. Diagrama de distribución de especies para C_{Zn}= 50 mg/L.

Realizando un análisis más profundo sobre los resultados obtenidos en el estudio de la variable del pH en la remoción de zinc, en la figura 7 mostrada anteriormente se puede observar que el pH de 6 fue el que obtuvo mejores porcentajes en la remoción de zinc con un valor de 90.35% y pese a que el pH de 8 durante los primeros cinco minutos alcanza buenas remociones. Esto se debe a que los iones de zinc tienden a precipitarse debido al rango de pH con el que se está trabajando inicialmente, de acuerdo con el análisis termodinámico. Lo anterior quiere decir que, este porcentaje de remoción se debe principalmente al proceso de precipitación y no al proceso de electrodiálisis, por lo que no se recomienda trabajar con este rango de pH para esta técnica. Lo antes mencionado queda respaldado con el diagrama de distribución de especies.

CONCLUSIONES

Densidad de corriente en función de la remoción de zinc:

Como resultados de las pruebas y en base a las cinéticas obtenidas se puede concluir que existe una relación directa entre la densidad de corriente y la remoción de zinc en el proceso de electrodiálisis. Ya que medida que se aumenta la densidad de corriente, se observa un incremento en la remoción de zinc. Esto se debe a que una mayor densidad de corriente produce una mayor velocidad de transferencia de iones, lo que conduce a una mayor remoción de iones de zinc. Sin embargo, es importante destacar que a medida que se aumenta la densidad de corriente, también se incrementa la energía consumida en el proceso, lo que puede resultar en un aumento en los costos operativos.

Velocidad de recirculación en función de la remoción de zinc:

En la segunda variable estudiada se puede concluir que la velocidad de recirculación tiene un efecto directo en la remoción de zinc en el proceso de electrodiálisis. A medida que se aumenta la velocidad de recirculación, se observa un incremento en la remoción de zinc. Esto se debe a que una mayor velocidad de recirculación aumenta el flujo de la solución a través de las membranas, lo que conduce a una mayor remoción de iones de zinc. Además, una velocidad de recirculación más alta permite una mayor eficiencia del proceso en términos de tiempo, lo que puede resultar beneficioso en términos de productividad y rendimiento del proceso.

pH en función de la remoción de zinc:

Se puede concluir que el pH de la solución tiene un efecto significativo en la remoción de zinc en el proceso de electrodiálisis. Ya que se pudo observar que la remoción de zinc es más efectiva en un ambiente alcalino, con un pH alrededor de 8 solo al inicio de las pruebas. Esto se debe a que, a pH más alto, se produce una mayor solubilidad de los iones de zinc, lo que permite una mayor transferencia de iones a través de las membranas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que a pH muy alto se puede producir una disminución en la eficiencia del proceso debido a la formación de precipitados o al daño a las membranas. Por lo tanto, se debe buscar un equilibrio entre la remoción de zinc y las condiciones óptimas del proceso en términos de pH.

Como conclusión general, el mayor porcentaje de remoción alcanzado fue de 95.80% y las mejores condiciones de operación están representadas por de densidad de corriente de 120 A/m^2, una velocidad de recirculación de 30 mL/min y un pH de 6.

En conclusión, se obtienen en este trabajo de investigación hallazgos similares al estudio realizado por Noroozi y col. [8], en dónde los resultados del estudio mostraron que la electrodiálisis fue efectiva en la eliminación de iones de zinc de soluciones acuosas, logrando una remoción de zinc del orden del 70-90% en diferentes condiciones de operación. Sin embargo, esta investigación resultó en mejores resultados ya que Noroozi obtuvo su mejor eficiencia de remoción de zinc (90%), con una densidad de corriente de 200 A/m^2, mientras que en esta investigación se obtuvo un 95.45% de remoción de zinc con una densidad de corriente menor (120 A/m^2), lo que indica también un menor consumo de energía. Mientras que el estudio realizado por El-Naas y col. [4], logró una remoción de zinc del orden del 85-95% también diferentes condiciones de operación, sin embargo, en comparación con la esta investigación la duración de las pruebas de este autor (El-Naas) fue de dos horas, por lo que también indica un mayor consumo de energía, es decir, el presenta trabajo obtuvo porcentajes similares en la remoción de zinc, pero usando un menor consumo de energía.

RECONOCIMIENTO

Reconocimiento al Programa de Maestría en Sistemas Ambientales (MSA) del I.T. Durango y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

BIBLIOGRAFÍA

[1] Alvarado, Julio. 2017. "Impactos económicos y sociales de las políticas nacionales mineras en Ecuador (2000-2006)". Revista de Ciencias Sociales 23 (4): 53-64. DOI: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28055641005

[2] Arreola C. y Col., R.M.J.C., Pérez C. R., Martínez G. V.J y Rodríguez R. J., 2020. Electrodiálisis aplicada a la remoción de iones de hierro en un efluente sintético.

[3] Babilas, D. y Dydo, P., 2018. Selective zinc recovery from electroplating wastewaters by electrodialysis enhanced with complex formation. Separation and Purification Technology, 192: 419-428 DOI: https:// doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.013

[4] El-Naas, M. H., Al-Zuhair, S., Alhaija, M. A., & Bashir, M. J. (2015). Removal of zinc ions from aqueous solution using electrodialysis. Desalination and Water Treatment, 53(9), 2429-2439. DOI: 10.1080/19443994.2013.879406

[5] National Center for Biotechnology Information. "Zinc". Fecha de acceso: Feb. 26, 2023. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Zinc

[6] NMX-AA-008-SCFI-2000 Análisis de agua – determinación del pH – método de prueba: Secretaría de Economía. (2000). NMX-AA-008-SCFI-2000 Análisis de agua – determinación del pH – método de prueba. México: Diario Oficial de la Federación.

[7] NMX-AA-051-SCFI-2016. Análisis de agua - Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - Método de prueba. Secretaría de Economía, México. 2016.

[8] Noroozi, R., Ghasemi, M., Ale-Ebrahim, M., & Eikani, M. H. (2018). Electrodialysis for removal of zinc ions from aqueous solutions: Optimization of operating conditions and electrode materials. Chemical Engineering Research and Design, 129, 152-162. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.11.010

[9] SEMARNAT (2021). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF (Diario Oficial de la Federación).

[10] Secretaria-de-Economía, 2021. Minería. Acciones y Programas.

[11] Secretaría-de-Economía, 2017. Contexto de México en la Minería.

[12] Secretaría de Economía. (2013). NMX-AA-007-SCFI-2013. Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

[13] Xiao, C., Yu, S., Xu, L., & Xu, B. (2019). Removal of zinc ion by electrodialysis: Effects of applied voltage and pH. Separation and Purification Technology, 215, 669-677. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.01.008

Cómo citar este artículo:

Hernández Lavalle, L., Rojas Montes, J. C., Arellano Piña, L. R., Martínez Gómez, V. J., & Martínez, D. C. (2023). Remoción de zinc a partir de un efluente sintético por electrodiálisis. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.266

Tecnología de Bioflóculos: Un camino hacia la acuacultura sustentable

Biofloc Technology: A Way for Sustainable Aquaculture

EPISTEMUS
ISSN: 2007-8196 (electrónico)

María Elena Ochoa-Hernández [1]
Emmanuel Villanueva-Guitérrez [2]
Luis Rafael Martínez-Córdova [3]
Kadiya Calderón [4]

Recibido: 06 / 12 / 2022
Aceptado: 09 / 06 / 2023
Publicado: 16 / 08 / 2023
DOI: https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.282

Autor de Correspondencia:
Dra. Kadiya Calderón
Correo: kadiya.calderon@unison.mx

Resumen

La acuacultura se ha convertido en el sector alimentario con la más alta tasa de crecimientos en los últimos años. Sin embargo, esta actividad tiene un importante impacto ambiental principalmente por el uso de grandes cantidades de agua y la alta cantidad de efluentes contaminados. La tecnología de bioflóculos (BFT) ofrece una alternativa sustentable que, a través de la actividad metabólica de una comunidad de microorganismos, puede ayudar a mantener la calidad del agua, permite ser utilizada como alimento por los organismos de cultivo y beneficia el sistema inmune de los organismos acuáticos. En este artículo se presenta a la BFT como una potencial herramienta que permita obtener alimentos de calidad y dirija la acuacultura hacia un camino sustentable.

Palabras clave: bioflóculos; Acuacultura; Sustentable.

Abstract

Aquaculture has become the food producer sector with the highest growth rate in the last years. Nevertheless, this activity has an important environmental impact, mainly due to the use of great quantities of water and polluted effluents. Biofloc technology (BFT) offers a sustainable alternative that through the metabolic activity of a microbial community can help to maintain water quality and be used as food by aquaculture organisms, offering benefits to the immune system of the aquatic organisms. This article presents the BFT as a potential tool to obtain quality food that can lead aquaculture into a sustainable path.

Keywords: *bioflocs; Aquaculture; Sustainable.*

1 *M en C (Maestra en Biociencias), Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la UNISON, Hermosillo Sonora, México, aneleochoa@gmail.com, Orcid: 0000-0001-5294-8213.*
2 *Doctorado (Doctorado en Biociencias), Comité de Sanidad Acuícola del Estado de Sonora, A.C. (COSAES), Hermosillo, Sonora, México, emmanuel.villanuevagz@gmail.com, 0000-0001-8347-8680*
3 *Dr. (Doctor en Ciencias), Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la UNISON, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, luis.martinez@unison.mx, Orcid. 0000-0002-3684-3398.*
4 *Dr. (Doctor en Ciencias), Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la UNISON, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México, kadiya.calderon@unison.mx, Orcid. 0000-0003-3502-6449.*

INTRODUCCIÓN

Al cultivo de animales y plantas acuáticas se le conoce como acuacultura [1]. Esta actividad ha tenido un importante desarrollo en los últimos años, convirtiéndose en el sector alimentario con la mayor tasa de crecimiento en la última década [2]. Especialmente en países en desarrollo, la acuacultura contribuye a la satisfacción de la creciente demanda alimentaria, tiene un relevante impacto económico y coadyuva a la generación de empleos [3].

Las proyecciones estiman que para el año 2050, la producción acuícola mundial alcance las 140 millones de toneladas, el doble de la producción mundial del año 2010 [4]. Sin embargo, aunado al crecimiento de la acuacultura, surgen algunos problemas ambientales, principalmente por la contaminación del agua [5].

En los últimos años, se ha reportado que los efluentes provenientes de la industria acuícola suelen tener altas concentraciones de nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, materia orgánica y alta Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO); además, de agentes patógenos y residuos provenientes de fármacos [6].

Los efluentes acuícolas sin tratamiento alguno, que son dispuestos en cuerpos de agua pueden causar graves problemas ambientales como la eutrofización [7]. No obstante, la mala calidad del agua afecta también a los organismos de cultivo provocando condiciones de estrés que los vuelven más susceptibles a contraer infecciones y otras enfermedades [8].

Debido al rápido crecimiento de la producción acuícola y a los efectos negativos ambientales de los cultivos intensivos, es necesario emprender la búsqueda de herramientas que permitan técnicas de cultivo sustentables; es decir, se requiere buscar estrategias para lograr una acuacultura sustentable.

En 1987, la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo definió el concepto de desarrollo sostenible como "aquel que utiliza el ambiente y sus recursos para asegurar las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de asegurar las necesidades de las futuras generaciones". Entonces, es posible decir que las estrategias sostenibles deben estar enfocadas a un correcto uso de los recursos disponibles.

En este sentido, la tecnología de bioflóculos (BFT, por sus siglas en inglés) representa una alternativa sustentable para el cultivo de organismos acuáticos. Dicha tecnología es un sistema de cultivo en el que se promueven comunidades microbianas que llevan a cabo el reciclaje de nutrientes, el cual se ilustra en la Figura 1.

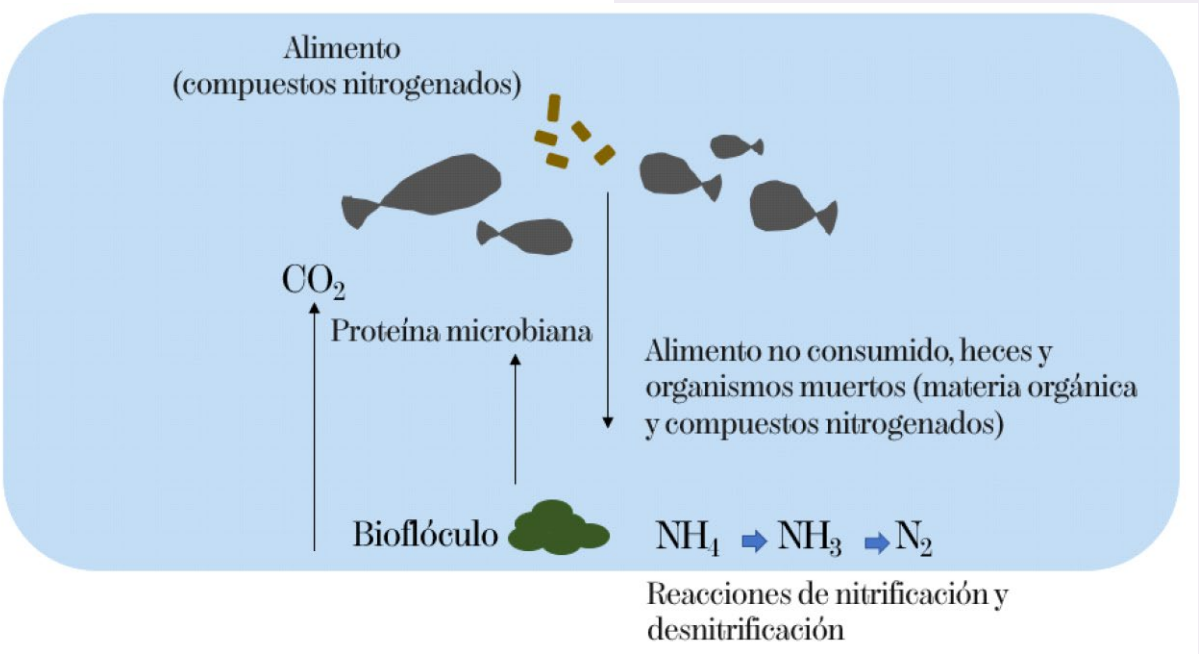


Figura 1. Reciclaje de nutrientes en Sistema de Bioflóculo (Adaptado de Kamboj *et al.* 2021).

Este sistema fue desarrollado para obtener una tecnología de cultivo de bajo costo, sin necesidad de recambios de agua [9,10,11,12]. Los bioflóculos están conformados por una amplia variedad de microorganismos, los cuales pueden incluir: microalgas, protozoarios, anélidos, nematodos, bacterias, rotíferos y copépodos; estos en conjunto forman una comunidad microbiana que se adhieren a una matriz orgánica y están presentes como flóculos flotantes en la columna del agua [13].

El bioflóculo resulta de las secreciones bacterianas y de la mezcla entre microorganismos filamentosos y materia orgánica particulada y tiene el potencial de mantener la calidad del agua a través del reciclaje de nutrientes. Además, posee un gran valor nutricional ya que funciona como una fuente alternativa de proteína y beneficia al sistema inmune de los organismos acuáticos cultivados [14].

Para promover la formación de bioflóculos a través de la proliferación microbiana, se debe preparar el agua que se torna visiblemente de color marrón y adquiere una textura grumosa. Previo a la siembra de los organismos de cultivo, el agua debe ser acondiciona por un período de aproximadamente 15 días. Conforme se da la engorda de los organismos de cultivo, se deben de añadir sustancias que contengan nutrientes adecuados, que sean fuente de carbono y nutrientes inorgánicos, como melaza y fertilizantes, además de mantener condiciones óptimas para lograr crear una diversa comunidad de microorganismos. Así, esta tecnología resulta ser una forma de acuacultura sustentable aportando numerosas ventajas para los organismos de cultivo.

Contribución de los Bioflóculos a la Inmunidad de los Organismos Acuáticos

A la comunidad microbiana que vive en simbiosis con su respectivo huésped se le conoce como microbiota. Los microorganismos que conforman la microbiota pueden interactuar con otros microorganismos ajenos en su propio ambiente, ya sean patógenos o benéficos; esto resulta en un incremento en la habilidad de los microorganismos benéficos para eliminar microorganismos patógenos [15].

Esto puede lograrse a través de distintos mecanismos, como lo es la liberación de sustancias bactericidas como exoenzimas que generen ambientes inhóspitos para las bacterias patógenas, por competencia por espacio y nutrientes, o inclusive mejorando la respuesta inmune y el estado de estrés oxidativo en los organismos de cultivo [16,45].

Como se mencionó anteriormente, los bioflóculos están conformados por una gran comunidad de microorgan-

ismos que, en conjunto con sus componentes celulares y metabolitos, pueden actuar como inmunoestimulantes y proveer protección contra microorganismos patógenos [15]. La identidad y actividad de los microorganismos presentes en los bioflóculos es de gran importancia, debido a que los organismos de cultivo están en constante contacto con su medio ambiente [19].

Este efecto inmunoestimulante ha sido investigado en diferentes organismos acuáticos de cultivo. En el caso del camarón, se considera que el efecto inmunoestimulante de la BFT contribuye a mantener altos niveles de supervivencia bajo infecciones virales y bacterianas [20]. Algunas de las bacterias presentes en los bioflóculos aportan lipopolisacáridos y peptidoglicanos, ayudando a activar la inmunidad innata de los peces [16].

El mantenimiento de la salud de los organismos acuáticos no sólo es una cuestión económica importante, sino que las infecciones suelen conducir al uso de medicamentos antimicrobianos o antibióticos. Los agentes antimicrobianos son aquellos que pueden inhibir el desarrollo microbiano o bien, eliminar los microorganismos patógenos que provocan la infección; estos pueden ser aplicados por metafilaxis, que consiste en medicar a un grupo de organismos, incluyendo a los enfermos y a los expuestos que no presentan la enfermedad o puede ser administrado como un tratamiento profiláctico, que resulta preventivo [21].

Independiente de la manera en que el tratamiento sea aplicado, restos de antibióticos quedan en las heces de los organismos de cultivo y en el alimento no consumido; estos desechos forman parte del agua residual de las granjas acuícolas, que al ser descartadas en suelos y cuerpos de agua tendrán un importante impacto ambiental y causarán problemas de resistencia bacteriana a los antibióticos [22].

Los restos de antibióticos alteran el microbioma natural de los ecosistemas acuáticos, tienen consecuencias en la regulación y soporte de estos, alterando el ciclo de nutrientes, el secuestro de carbono y el mantenimiento de la biodiversidad. Además, estos entornos se convierten en reservorios de genes de resistencia a los antimicrobianos que pueden entrar en la cadena alimenticia afectando a otros animales y a los humanos [23, 24].

Por otra parte, se ha reportado que la BFT juega un papel importante en proveer compuestos bioactivos como carotenoides y vitaminas solubles que pueden estimular la respuesta inmune de peces cultivados [25]. El efecto inmunoestimulante es una indudable ventaja de esta tecnología; principalmente si se considera que las condiciones ambientales a las que los organismos de cultivo se ven sometidas suelen ser muy estresantes; consecuentemente, promoviendo infecciones y enfermedades que se diseminan rápidamente en los sistemas de cultivo y causan severas pérdidas económicas [26,27].

Mantenimiento de la Calidad del Agua

La acuacultura utiliza grandes cantidades de agua en el cultivo de diversas especies acuáticas; así mismo, una gran cantidad de aguas residuales son generadas por este sector, conteniendo altas concentraciones de nutrientes como carbono, nitrógeno y fósforo [28].

Estos nutrientes provienen del alimento no consumido, desechos y animales muertos en los sistemas de cultivo, y cuando se acumulan en concentraciones muy altas, causan procesos de eutrofización (agotamiento de oxígeno disuelto) que impactan en la supervivencia de los organismos acuáticos [29].

Siendo el principal propósito de la BFT el mantenimiento de la calidad del agua, los microorganismos presentes en los bioflóculos convierten el nitrógeno inorgánico (el cual es tóxico y tiene un impacto negativo en el medio ambiente) en biomasa microbiana a través de la adición de

fuentes de carbono económicas (para mantener una adecuada tasa carbono-nitrógeno); por su parte, la biomasa es utilizada como una fuente de alimento para los organismos del sistema de cultivo [30].

En otras palabras, en el sistema de BFT se lleva a cabo el reciclaje de nutrientes, donde los microorganismos presentes en el sistema toman la materia orgánica y nutrientes disponibles, heces de los peces. Por ejemplo, para sintetizar biomasa bacteriana (bioflóculo), se provee un alimento complementario alto en nutrientes para los organismos de cultivo lo que incrementa la calidad del agua, y por ende, se reduce la necesidad de recambios de agua [31,32].

En una investigación realizada por Rodrigues de Lima y col. (2018) se implementó BFT para cultivo de Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), se encontró una reducción del volumen de agua utilizada 11.8 veces menor en comparación a un sistema de cultivo convencional. Esto es realmente importante si se considera que la cantidad de agua utilizada en estanques de cultivo es de aproximadamente 45 m^3 por kg producido [34].

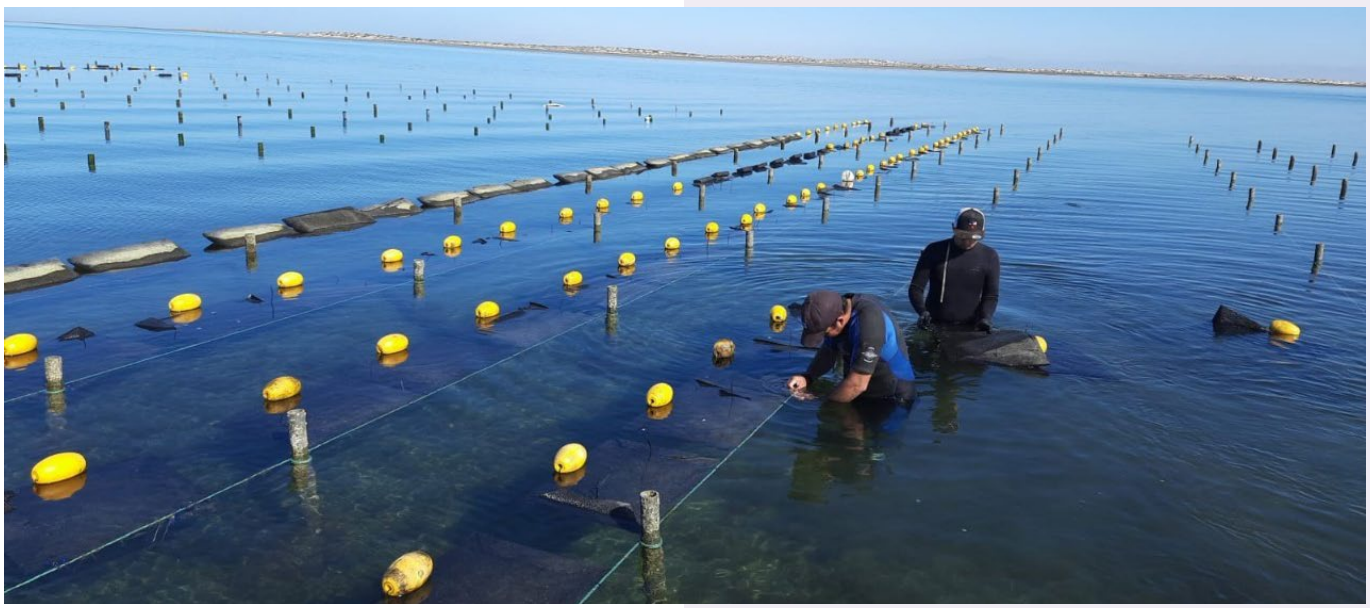
Uno de los principales procesos por los que se lleva a cabo la remoción de nutrientes en los sistemas BFT son la nitrificación y la desnitrificación. La nitrificación es el proceso biológico en el que las formas tóxicas del nitrógeno (como los nitritos y el nitrógeno amoniacal) son transformadas por medio de la acción microbiana a nitratos (compuestos de menor toxicidad), y posteriormente, los nitratos son reducidos a nitrógeno gaseoso (compuesto no tóxico) [38],[39].

Estos procesos reducen significativamente las concentraciones de contaminantes en el agua, mejorando la calidad de esta y por consiguiente reduciendo el impacto ambiental y beneficiando también a los organismos de cultivo; ya que la mala calidad del agua impacta directamente en su salud, causando estrés e incrementando las posibilidades de adquirir infecciones [37].

Sin embargo, es necesario considerar que no todas las especies acuáticas son cultivables mediante la BFT. Las especies que si lo son, son aquellas capaces de tolerar altas concentraciones de materia orgánica en el agua. Entre las que se han cultivado con más éxito se encuentran la tilapia y el camarón. Se considera pues, que las conocidas como filtradoras son las más apropiadas para desarrollarse mediante BFT.

Un punto importante de esta tecnología es que deben mantenerse con aireación todo el tiempo, incluso se recomienda tener un sistema que provea oxígeno en caso de emergencia. En este punto radica una importante inconveniencia de esta tecnología, ya que un fallo en el suministro eléctrico que por ende cause un fallo en el suministro de aire a los tanques, puede causar la pérdida de los organismos en poco tiempo, aumentando también la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) sobre los valores normales establecidos [34], [38].

Por lo anterior, es de suma importancia la capacitación previa del personal encargado de trabajar en los cultivos con BFT. La formación debe incluir el saber cómo desarrollar esta tecnología y cuáles son elementos principales de la misma, de igual forma saber cómo responder en caso de algún fallo en el sistema [34], [36].



Los Bioflóculos como Alimento y sus ventajas

La harina de pescado es la fuente proteica más utilizada en la acuacultura, independientemente de la especie cultivada y según el hábito alimenticio del organismo, sean herbívoros, omnívoros o carnívoros [38]. Esto se debe a su alta calidad proteica, puesto que contiene los aminoácidos esenciales y no esenciales necesarios para los organismos de cultivo, además de ser una buena fuente de ácidos grasos, vitaminas y minerales [39].

Se ha estimado que aproximadamente el 68% de la producción a nivel mundial de harina de pescado va directamente al sector acuícola para alimento de organismos de cultivo [36]. Las estadísticas de producción de harina de pescado a nivel mundial son de 5 millones de toneladas al año; sin embargo, su producción se considera severamente afectada por diversos factores como la variabilidad climática, sobrepesca, y la contaminación [40].

Debido a las dificultades de la producción, el impacto ambiental que representa y el alto precio de este producto hace que sea indispensable la búsqueda de fuentes proteicas alternativas para la alimentación de los organismos acuáticos [42]. Como consecuencia de la abundancia de microorganismos que conforman el consorcio microbiano de los bioflóculos, éstos resultan ser ricos en carbohidratos, proteínas y lípidos, siendo un complemento alimentario que permite reducir el costo de la alimentación [43].

Las bacterias, son uno de los principales componentes de las comunidades microbianas de los bioflóculos, tienen un abundante contenido de proteína, que es aproximadamente 65% de su peso seco, además de tener un mayor contenido de nucleótidos que la harina de pescado [44]. Por otra parte, las microalgas suelen tener un papel importante en la BFT. *Scenedemus spp* por ejemplo, suele proliferar bien en cultivos de agua dulce. El valor nutricional reportado de *Scenedesmus* spp. está compuesto por 52% de proteína cruda, 12% de grasa cruda, 10% de carbohidratos, 8.8% de ceniza y contiene vitaminas B6, B12 y E, así como de los aminoácidos alanina, serina, leucina, glicina y ácido aspártico que conforman 50% del total del contenido seco de esta microalga y de un 67% del total de ácidos grasos insaturados [45]. Esto es importante debido a que las dietas que contienen niveles superiores de ácidos grasos, aminoácidos, vitaminas y minerales a los requerimientos esenciales, pueden tener un impacto positivo en el bienestar y en la resistencia a enfermedades de los organismos de cultivo [39].

Los bioflóculos poseen propiedades importantes como aporte de bacterias probióticas a los organismos cultivados, además de los compuestos bioactivos producidos por las mismas, como los carotenoides, clorofilas, fitoesteroles, bromofenoles, entre otros.

Estos compuestos bioactivos tienen una función importante en el crecimiento de peces y camarones, e incluso se ha considerado que tienen efectos potenciadores en la salud de los organismos cultivados, proveyendo una alternativa interesante para mantener un sano desarrollo de peces y camarones.

Diversos estudios han reportado resultados alentadores sobre la adición de bioflóculos a la dieta de organismos de cultivo. Según lo reportado por Monroy-Dosta y col. (2013), la utilización de BFT puede reducir el costo de la alimentación en un 25%. Tongsiri y col. (2020), reportaron que el costo de alimentación en un sistema de cultivo de tilapia se vio reducido al utilizar BFT, y que en el bioflóculo se encontró un contenido nutricional apropiado (proteínas, lípidos y carbohidratos) para el desarrollo de los organismos de cultivo.

De manera similar, también se ha reportado para alevines de *O. niloticus* cultivados en un sistema biofloc tiene un efecto benéfico sobre el desempeño biológico, estado inmune y resistencia al estrés [50]. En otros estudios se ha reportado que la suplementación de la dieta con bioflóculos para camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei)* tuvo un efecto benéfico sobre el estado el desarrollo y la salud de los organismos [51].

CONCLUSIONES

Empleando el reciclaje de nutrientes mediante la acción de microorganismos ambientales, la BFT tiene gran potencial de dirigir a la acuacultura hacia un camino sustentable. Sin duda la acuacultura se está convirtiendo en una actividad económica cada vez más importante, aunque aún faltan cuestiones por investigar acerca de la aplicación de BFT, las ventajas de esta tecnología son indudables y puede contribuir a la implementación de sistemas de cultivo con una menor huella ecológica, desarrollando sistemas que permitan satisfacer las necesidades del presente, sin poner en riesgo la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. Con la adecuada investigación, la BFT podrá ser aplicada de forma segura cada vez a una mayor escala.

BIBLIOGRAFÍA

[1] A. G. Tacon, "Trends in global aquaculture and aquafeed production: 2000–2017," *Reviews in Fisheries Science & Aquaculture,* vol. 28, no. 1, pp. 43-56, 2020. https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1649634

[2] K. Yue and Y. Shen, "An overview of disruptive technologies

for aquaculture," *Aquaculture and Fisheries,* vol. 7., no. 2, p. 111-120, 2022. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2021.04.009
[3] M. Martinez-Porchas and L. R. Martinez-Cordova, "World Aquaculture: Environmental Impacts and Troubleshooting Alternatives," *The Scientific World Journal,* vol. 2012, p. 389623, 2012. https://doi.org/10.1100/2012/389623
[4] M. N. Henares, M. V. Medeiros, and A. F. Camargo, "Overview of strategies that contribute to the environmental sustainability of pond aquaculture: rearing systems, residue treatment, and environmental assessment tools," *Reviews in Aquaculture,* vol. 12, no. 1, pp. 453-470, 2020. https://doi.org/10.1111/raq.12327
[5] C. B. Carballeira Brana, K. Cerbule, P. Senff, and I. K. Stolz, "Towards environmental sustainability in marine finfish aquaculture," *Frontiers in Marine Science,* p. 343, 2021. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.666662
[6] L. Ruelas, G. E. López, and M. V. Canela, "Uso y disposición del agua en la acuicultura: ¿falta o exceso de regulación?," *Teoría y Praxis,* no. 29, pp. 26-46, 2020.
[7] A. P. Tom, J. S. Jayakumar, M. Biju, J. Somarajan, and M. A. Ibrahim, "Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review," *Energy Nexus,* vol. 4, p. 100022, 2021. https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022
[8] World Commission on Environment and Development. "Our common future". Oxford, England: Oxford University Press, 1987.
[9] A. B. Dauda, "Biofloc technology: a review on the microbial interactions, operational parameters and implications to disease and health management of cultured aquatic animals," *Reviews in Aquaculture,* vol. 12, no. 2, pp. 1193-1210, 2020. https://doi.org/10.1111/raq.12379
[10] Kumar, V., Roy, S., Behera, B. K., Swain, H. S., & Das, B. K. Biofloc microbiome with bioremediation and health benefits. *Frontiers in Microbiology*, 12, 741164, 2021.
[11] Zafar, M. A., & Rana, M. M. Biofloc technology: an eco-friendly "green approach" to boost up aquaculture production. *Aquaculture International,* 30(1), 51-72, 2022.
[12] Singh, J., Sarma, K., Kumar, T., Ahirwal, S. K., & Keer, S. R. N. R. Bio-floc Technology (BFT): An Intensive Eco Sustainable and Cost-Effective Tool for Aquaculture. *Food Sci*. Rep, 10, 11-14, 2020.
[13] J. A. Pérez-Fuentes, C. I. Pérez-Rostro, M. P. Hernández-Vergara, and M. d. C. Monroy-Dosta, "Variation of the bacterial composition of biofloc and the intestine of Nile tilapia Oreochromis niloticus, cultivated using biofloc technology, supplied different feed rations," *Aquaculture Research,* vol. 49, no. 11, pp. 3658-3668, 2018. https://doi.org/10.1111/are.13834
[14] P. Yuvarajan, "Study on floc characteristics and bacterial count from biofloc-based genetically improved farmed tilapia culture system," *Aquaculture Research,* vol. 52, no. 4, pp. 1743-1756, 2021. https://doi.org/10.1111/are.15030
[15] M. A. Dawood, S. Koshio, M. M. Abdel-Daim, and H. Van Doan, "Probiotic application for sustainable aquaculture," *Reviews in Aquaculture,* vol. 11, no. 3, pp. 907-924, 2019. https://doi.org/10.1111/raq.12272
[16] S. Elayaraja *et al.*, "Potential influence of jaggery-based biofloc technology at different C: N ratios on water quality, growth performance, innate immunity, immune-related genes expression profiles, and disease resistance against Aeromonas hydrophila in Nile tilapia (Oreochromis niloticus)," *Fish & Shellfish Immunology,* vol. 107, pp. 118-128, 2020. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.09.023
[17] M. d. C. Monroy-Dosta, R. De Lara-Andrade, J. Castro-Mejía, G. Castro-Mejía, and M. G. Coelho-Emerenciano, "Composición y abundancia de comunidades microbianas asociadas al biofloc en un cultivo de tilapia," Rev. biol. mar. Oceanogr, vol. 48, pp. 511-520, 2013. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572013000300009
[18] F. Bakhshi, E. H Najdegerami, R. Manaffar, A. Tokmechi, K. Rahmani Farah, and A. Shalizar Jalali, "Growth performance, haematology, antioxidant status, immune response and histology of common carp (Cyprinus carpio L.) fed biofloc grown on different carbon sources," *Aquaculture Research,* vol. 49, no. 1, pp. 393-403, 2018. https://doi.org/10.1111/are.13469
[19] R. Rajeev, K. Adithya, G. S. Kiran, and J. Selvin, "Healthy microbiome: a key to successful and sustainable shrimp aquaculture," *Reviews in Aquaculture,* vol. 13, no. 1, pp. 238-258, 2021. https://doi.org/10.1111/raq.12471
[20] M. R. Pilotto *et al.*, "Environmental rearing conditions are key determinants of changes in immune gene expression patterns in shrimp midgut," *Developmental & Comparative Immunology,* vol. 106, p. 103618, 2020. https://doi.org/10.1016/j.dci.2020.103618
[21] J. Romero, C. G. Feijoó, and P. Navarrete, "Antibiotics in aquaculture–use, abuse and alternatives," *Health and environment in aquaculture,* vol. 159, pp. 159-198, 2012. https://doi.org/10.5772/28157
[22] F. C. Cabello, "Heavy use of prophylactic antibiotics in aquaculture: a growing problem for human and animal health and for the environment," *Environmental microbiology,* vol. 8, no. 7, pp. 1137-1144, 2006. https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2006.01054.x
[23] D. Schar, E. Y. Klein, R. Laxminarayan, M. Gilbert, and T. P. Van Boeckel, "Global trends in antimicrobial use in aquaculture," *Scientific Reports,* vol. 10, no. 1, p. 21878. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78849-3
[24] E. O. Ogello, N. O. Outa, K. O. Obiero, D. N. Kyule, and J. M. Munguti, "The prospects of Biofloc Technology (BFT) for sustainable aquaculture development," *Scientific African,* vol. 14, p. e01053, 2021. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01053
[25] M. H. Khanjani and M. Sharifinia, "Biofloc technology as a promising tool to improve aquaculture production," *Reviews in aquaculture,* vol. 12, no. 3, pp. 1836-1850, 2020. https://doi.org/10.1111/raq.12412
[26] J.-Y. Jung *et al.*, "Autotrophic biofloc technology system (ABFT) using Chlorella vulgaris and Scenedesmus obliquus positively affects performance of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)," *Algal research,* vol. 27, pp. 259-264, 2017. https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.09.021
[27] H. Van Doan et al., "Host-associated probiotics: a key factor in sustainable aquaculture," Reviews in fisheries science & aquaculture, vol. 28, no. 1, pp. 16-42, 2020. https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1643288
[28] L. G. Cardoso et al., "Spirulina sp. as a Bioremediation Agent for Aquaculture Wastewater: Production of High Added Value Compounds and Estimation of Theoretical Biodiesel," BioEnergy Research, vol. 14, no. 1, pp. 254-264, 2021. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10153-4
[29] V. Hlordzi et al., "The use of Bacillus species in maintenance of water quality in aquaculture: A review," Aquaculture Reports, vol. 18, p. 100503, 2020. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100503
[30] M. E. Azim and D. C. Little, "The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)," *Aquaculture,* vol. 283, no. 1-4, pp. 29-35, 2008. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2008.06.036
[31] E. C. Rodrigues de Lima, R. Liano de Souza, P. J. Montes Girao, Í. F. Mascena Braga, and E. de Souza Correia, "Culture of Nile tilapia in a biofloc system with different sources of carbon," *Revista Ciência Agronômica,* vol. 49, pp. 458-466,

2018. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20180052
[32] A. T. Mansour and M. Á. Esteban, "Effects of carbon sources and plant protein levels in a biofloc system on growth performance, and the immune and antioxidant status of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)," *Fish & shellfish immunology,* vol. 64, pp. 202-209, 2017. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.03.025
[33] L. G. Manduca *et al.*, "Effects of a zero exchange biofloc system on the growth performance and health of Nile tilapia at different stocking densities," *Aquaculture,* vol. 521, p. 735064, 2020. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2020.735064
[34] M. Verdegem, R. Bosma, and J. Verreth, "Reducing water use for animal production through aquaculture," *Water resources development,* vol. 22, no. 1, pp. 101-113, 2006. https://doi.org/10.1080/07900620500405544
[35] G. Abakari, G. Luo, and E. O. Kombat, "Dynamics of nitrogenous compounds and their control in biofloc technology (BFT) systems: A review," *Aquaculture and Fisheries*, vol. 6, no. 5, pp. 441-447, 2021. https://doi.org/10.1016/j.aaf.2020.05.005
[36] G. L. Cárdenas Calvachi and I. A. Sánchez Ortiz, "Nitrógeno en aguas residuales: orígenes, efectos y mecanismos de remoción para preservar el ambiente y la salud pública," *Universidad y Salud,* vol. 15, no. 1, pp. 72-88, 2013.
[37] C. E. Boyd *et al.*, "Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges," *Journal of the World Aquaculture Society,* vol. 51, no. 3, pp. 578-633, 2020. https://doi.org/10.1111/jwas.12714
[38] R. Luthada-Raswiswi, S. Mukaratirwa, and G. O'Brien, "Animal protein sources as a substitute for fishmeal in aquaculture diets: A systematic review and meta-analysis," *Applied sciences,* vol. 11, no. 9, p. 3854, 2021. https://doi.org/10.3390/app11093854
[39] P. da Silva Dias *et al.*, "Alternative Ingredients for Nile Tilapia (Oreochromis niloticus)-Bibliographical Review," *Brazilian Journal of Development,* vol. 6, no. 2, pp. 5767-5785, 2020. https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-033
[40] R. Rajeev, K. Adithya, G. S. Kiran, and J. Selvin, "Healthy microbiome: a key to successful and sustainable shrimp aquaculture," *Reviews in Aquaculture,* vol. 13, no. 1, pp. 238-258, 2021. https://doi.org/10.1111/raq.12471
[41] H. S. Galkanda-Arachchige, A. E. Wilson, and D. A. Davis, "Success of fishmeal replacement through poultry by-product meal in aquaculture feed formulations: a meta-analysis," *Reviews in Aquaculture,* vol. 12, no. 3, pp. 1624-1636, 2020. https://doi.org/10.1111/raq.12401
[42] W. Malcorps *et al.*, "The sustainability conundrum of fishmeal substitution by plant ingredients in shrimp feeds," *Sustainability,* vol. 11, no. 4, p. 1212, 2019. https://doi.org/10.3390/su11041212
[43] S. Egerton *et al.*, "Replacing fishmeal with plant protein in Atlantic salmon (Salmo salar) diets by supplementation with fish protein hydrolysate," *Scientific reports,* vol. 10, no. 1, pp. 1-16, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-60325-7
[44] T. Sgnaulin, S. M. Pinho, E. G. Durigon, M. C. Thomas, G. L. de Mello, and M. G. C. Emerenciano, "Culture of pacu Piaractus mesopotamicus in biofloc technology (BFT): insights on dietary protein sparing and stomach content," Aquaculture International, vol. 29, no. 5, pp. 2319-2335, 2021. https://doi.org/10.1007/s10499-021-00748-9
[45] C. Wang, J. Chuprom, Y. Wang, and L. Fu, "Beneficial bacteria for aquaculture: nutrition, bacteriostasis and immunoregulation," *Journal of Applied Microbiology,* vol. 128, no. 1, pp. 28-40, 2020. https://doi.org/10.1111/jam.14383
[46] T. M. Badwy, E. Ibrahim, and M. Zeinhom, "Partial replacement of fishmeal with dried microalga (Chlorella spp. and Scenedesmus spp.) in Nile tilapia (Oreochromis niloticus) diets," in *8th International Symposium on Tilapia in Aquaculture*, 2008, vol. 2008, pp. 801-810.
[47] A. Oliva-Teles, "Nutrition and health of aquaculture fish," *Journal of fish diseases,* vol. 35, no. 2, pp. 83-108, 2012. https://doi.org/10.1111/j.1365-2761.2011.01333.x
[48] H. Van Doan *et al.*, "Host-associated probiotics: a key factor in sustainable aquaculture," *Reviews in fisheries science & aquaculture,* vol. 28, no. 1, pp. 16-42, 2020. https://doi.org/10.1080/23308249.2019.1643288
[49] S. Tongsiri, N. Somkane, U. Sompong, and D. Thiammueang, "A cost and benefit analysis of Nile tilapia culture in biofloc technology, the environmental friendly system: the case of selected farm in Chiang Mai, Thailand," *Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication,* vol. 2, no. 1, pp. 45-49, 2020. https://doi.org/10.54279/mijeec.v2i1.244952
[50] A. T. Mansour and M. Á. Esteban, "Effects of carbon sources and plant protein levels in a biofloc system on growth performance, and the immune and antioxidant status of Nile tilapia (Oreochromis niloticus)," *Fish & shellfish immunology,* vol. 64, pp. 202-209, 2017. https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.03.025
[51] C. Lee, S. Kim, S.-J. Lim, and K.-J. Lee, "Supplemental effects of biofloc powder on growth performance, innate immunity, and disease resistance of Pacific white shrimp Litopenaeus vannamei," *Fisheries and Aquatic Sciences,* vol. 20, no. 1, p. 15, 2017/07/25 2017, doi: 10.1186/s41240-017-0059-7. https://doi.org/10.1186/s41240-017-0059-7
[52] Kamboj, P., Dahiya, T., Singh, G., & Verma, R. Physico-Chemical Properties of Water in Biofloc Supplemented with Probiotics: a Review. *Journal of Experimental Zoology,* 24, 843-854, 2021.

Cómo citar este artículo:

Ochoa-Hernández, M. E., Villanueva-Gutiérrez, E., Martínez-Córdova, L. R., & Calderón Alvarado, K. del C. (2023). Tecnología de Bioflóculos: Un camino hacia la acuacultura sustentable. EPISTEMUS, 17(34).

https://doi.org/10.36790/epistemus.v17i34.28

EPISTEMUS

CIENCIA, TECNOLOGÍA Y SALUD

UNIVERSIDAD DE SONORA

La Universidad de Sonora, a través de las Divisiones de Ingeniería, de Ciencias Exactas y Naturales, así como de Ciencias Biológicas y de la Salud emite la presente invitación para partipar en la

Convocatoria para recepción de manuscritos

No. 35

La revista *Epistemus* (ISSN: 2007-8196) publica artículos originales e inéditos de proyectos de investigació o difusión sobre ciencia y tecnología y salud, dirigida a investigadores, profesores, estudiantes y profesionales en diversas áreas.

Áreas de conocimiento:

(no limitadas a los siguientes campos)

- Ingenierías: materiales, metalurgia, civil, minas, industrial, ambiental, hidráulica, sistemas de información, mecatrónica, alimentos, energía, agua, entre otras.
- Ciencias exactas y naturales: geología, física, matemáticas, electrónica y ciencias de la computación.
- Ciencias biológicas y de la salud: investigación en alimentos, desarrollo regional, acuacultura, salud, biología, agricultura, entre otras.

Fechas Importantes:

Límite de envío de manuscritos para el No. 35	Octubre 15, 2023.
Publicación electrónica	Continua..

RECIBIMOS ARTÍCULOS DURANTE TODO EL AÑO

Envío de manuscritos: www.epistemus.uson.mx

Mayores informes: epistemus@unison.mx

SÍGUENOS

RevistaEpistemusCTyS

Rosales y Blvd. Luis encinas Johnson, Hermosillo, Sonora, 83000, México

SciELO latindex catálogo 2.0 DOAJ DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS PERIÓDICA biblat Bibliografía Latinoamericana Google Académico y más...