



# TECNO CULTURA

Investigación · Ciencia · Tecnología · Cultura

Publicación cuatrimestral del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 10, No. 29, Septiembre-Diciembre de 2012

**El conocimiento científico en las aulas de clase**

**Biolixiviación y recuperación de cobre de un mineral de calcopirita de baja ley**

**Simulación de la producción de hidrógeno en la estabilización anaerobia de lodos residuales secundarios**

**Cambios químicos durante la descomposición de algunos productos de origen acuícola de importancia comercial**



GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO



GOBIERNO QUE TRABAJA Y LOGRA  
**enGRANDE**

El Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec cuenta con un sistema de gestión de calidad certificado bajo la norma ISO 9001:2008 en sus procesos de inscripción, reinscripción y titulación, con reconocimiento ante EMA, UKAS y ANAB.

# Información para los autores

La revista **TECNOCULTURA** es un órgano de difusión del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE); su publicación es cuatrimestral, el objetivo principal es la divulgación del pensamiento y los avances científicos, tecnológicos y humanísticos, ya sea que se generen en las diferentes áreas académicas del TESE o de origen externo, pero que puedan ser de interés general.

La información podrá presentarse en forma de artículo, ensayo, reportaje, reseña, traducción o monografía, incluyendo trabajos de divulgación. Los artículos deben ser producto de investigaciones de elevado nivel académico, contribuir al conocimiento en su materia y ser inéditos en español. Igualmente, las conferencias o presentaciones deberán adaptarse para su edición escrita. En todos los casos, se buscará que su contenido sea ameno y novedoso.

Se recomienda una extensión máxima de 10 cuartillas a doble espacio, incluyendo cuadros, notas y bibliografía. Deberá entregarse un archivo electrónico y una copia impresa, en tamaño carta, en letra Times New Roman de 12 puntos, con márgenes de 2.5 cm. por lado. De preferencia utilizar Microsoft Word, guardando el documento con la extensión .doc. Los materiales serán evaluados por el Consejo Editorial de la revista.

El lenguaje debe ser accesible a estudiantes de licenciatura, sin perjuicio de la información científica o académica contenida en el artículo. Cuando sea necesario el uso de tecnicismos, deberá explicarse su significado con la amplitud necesaria. Se recomienda la inclusión de recuadros que aclaren el significado de conceptos de difícil comprensión.

Dentro de lo posible, se evitará el uso de fórmulas y ecuaciones. Los artículos pueden tener subtítulos o incisos y un resumen introductorio, no mayor de cinco líneas, que atraiga el interés del lector .

Para las citas o referencias bibliográficas que aparezcan en el texto, se utilizará el sistema Harvard; deben ir entre paréntesis, indicando el apellido del autor, fecha de publicación y número de página(s). Ejemplo: (Sánchez Vázquez. 1991: 114-122). Dichas referencias bibliográficas se mencionarán completas al final del documento. Se debe revisar cuidadosamente que no existan omisiones ni inconsistencias entre las obras citadas y la bibliografía. Las obras de un mismo autor, se enlistarán en orden descendente por fecha de publicación (2004. 1999. 1987. etcétera). No deben integrarse notas o citas mediante alguna instrucción del procesador de palabras que las incorpore automáticamente al pie de texto o al final de la página.

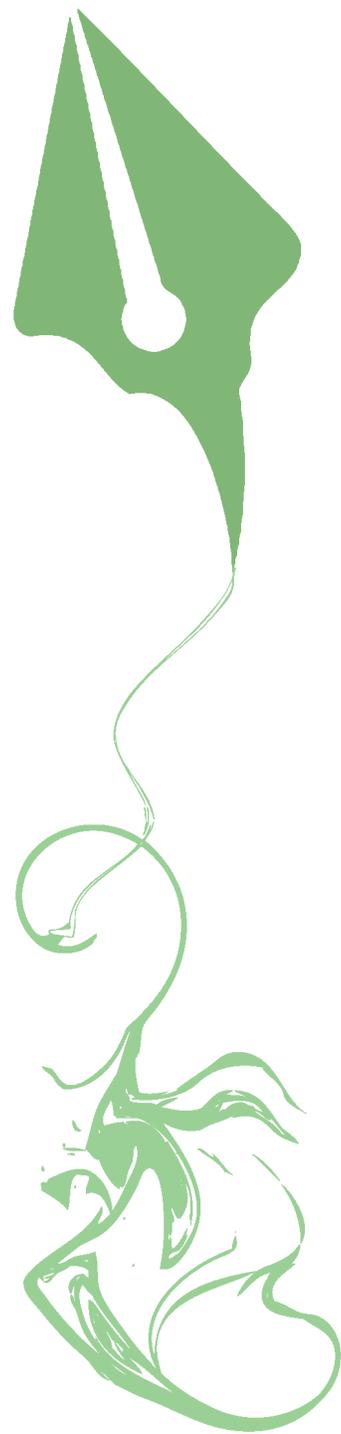
Deberán incluirse por separado los archivos correspondientes a las ilustraciones o fotografías que acompañen el artículo, indicando debidamente el lugar donde habrán de insertarse. El formato será TIFF o JPG con una resolución de 300 ppp. Las gráficas, esquemas, figuras, cuadros y similares se deben elaborar en computadora a línea, sin pantallas, o dibujos en tinta china sobre papel albanene, con buena calidad (no fotocopias). Los autores recibirán las pruebas de planas de sus artículos, con la debida anticipación para su visto bueno.

Para fines de registro, se solicita anexar una hoja que contenga datos del autor como nombre, grado académico, institución de procedencia, domicilio, teléfono, dirección electrónica y fax.

Los trabajos que se propongan para ser publicados en **TECNOCULTURA** deben enviarse a:

## Editor **TECNOCULTURA**

Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec  
Unidad de Relaciones Públicas y Difusión  
Av. Tecnológico s/n, esq. Av. Carlos Hank González (Av. Central) Col. Valle de Anáhuac,  
Ecatepec de Morelos.  
Estado de México. c.P. 5521 O  
Tel. 5000 2314  
correo electrónico: [difusion@tese.edu.mx](mailto:difusion@tese.edu.mx)



El Licenciado Enrique Peña Nieto, en su primer mensaje como presidente de la República, delineó su política para lograr la transformación del país. Describió cinco ejes de trabajo y anunció 13 primeras decisiones de gobierno:

- 1.- Promover un Programa Nacional de Prevención del Delito.
- 2.- Pedir a la Consejería Jurídica desistir de la controversia constitucional para que la Ley Federal de Víctimas sea aprobada por el Congreso.
- 3.- Iniciativa de reforma para tener un solo Código Penal de aplicación nacional y uno de procedimientos penales.
- 4.- Poner en marcha en los próximos 60 días la Cruzada Nacional contra el Hambre.
- 5.- Creación de seguro de vida para jefas de familia.
- 6.- Ampliar el programa 70 y más, para personas de 65 años en adelante.
- 7.- Iniciativa de reforma del artículo 3 y de la Ley Federal de Educación para eliminar las plazas vitalicias y heredadas, así como un censo de maestros, escuelas y alumnos.
- 8.- Impulsar el Programa Nacional de Infraestructura y Transporte 2012-2018.
- 9.- Construcción de trenes de pasajeros, ampliación de una red de metro en Monterrey y el tren eléctrico en Guadalajara.
- 10.- Iniciativa para impulsar el derecho al acceso a la banda ancha y licitar dos cadenas abiertas de Televisión.
- 11.- Proyecto de Ley de Responsabilidad Hacendaria y Deuda Pública, para ordenar las finanzas de los gobiernos locales.
- 12.- Presentar al Congreso de la Unión el Paquete Económico 2013 con cero déficit presupuestal.
- 13.- Presentar al Congreso un decreto que establezca medidas de austeridad en el ejercicio del gasto.

De igual forma, se comprometió a recuperar la paz, y anunció la creación de un Programa Nacional de Prevención del Delito. Esta acción deberá reflejarse en la propuesta de Presupuesto de Egresos del 2013”, que será enviada al Congreso de la Unión.

- 1) Cruzada Nacional contra el Hambre.
- 2) Recuperar el control de la Educación Pública mediante la reforma del Artículo Tercero Constitucional y la Reforma a la Ley General de Educación, donde se establezcan las bases para el Servicio Profesional de Carrera Docente. La reforma incluye la creación del Sistema Nacional de Evaluación Educativa,
- 3) Impulso a Infraestructura mediante el Programa Nacional de Infraestructura y Transporte 2012-2018, para incrementar la infraestructura carretera, ferroviaria y de puertos del país. Asimismo, contemplará obras de infraestructura para conectar e incorporar el Sur de México a la economía global.
- 4) Telecomunicaciones.

En este último punto, se enviará una iniciativa para reconocer en la Constitución, el derecho de acceso a la Banda Ancha y un conjunto de reformas para generar mayor competencia en telefonía, servicios de datos, televisión y radio; de igual forma, se licitarán dos nuevas cadenas de televisión abierta.

No cabe duda que el proyecto es ambicioso, pero con la participación de todos, cada quien en su área de acción, se hará posible. Con lo que respecta al TESE, nos estamos preparando para esta ardua empresa.

# Directorio



GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO

Tecnológico de Estudios  
Superiores de Ecatepec



## SUBCOMITÉ EDITORIAL:

Sergio Mancilla Guzmán  
Armando Alcalde Martínez  
Judith Cervantes Ruiz  
Carlos Cerra Del Valle  
Verónica Martínez Martínez  
Lizbet Guadalupe Soto Navarrete  
Daniel Cedillo Román  
Esther Acevedo Arcos  
José Juan León Rebollo

Corrección de estilo  
Rafael Ortiz Hernández

Diseño:  
Mara Brisa López Vargas

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN  
SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN MEDIA SUPERIOR Y SUPERIOR  
TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC



Tecnocultura, revista de divulgación del conocimiento científico, tecnológico y humanístico del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Año 10, No. 29, septiembre-diciembre de 2012. Número de autorización del Comité Editorial de la Administración Pública Estatal CE: 205/05/10/12-01. Edita y distribuye la Unidad de Relaciones Públicas y Difusión, domicilio: Av. Tecnológico s/n, Col. Valle de Anáhuac, C.P. 55210, Ecatepec, Estado de México. Teléfono 50 00 23 14. Correo electrónico: [difusion@tese.edu.mx](mailto:difusion@tese.edu.mx). Impreso en:

Número de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título ante el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública: 04-2006-090109555900-102, ISSN: 1870-7157. Certificados de Título y de Contenido en trámite. Se imprimen 2000 ejemplares. Se autoriza la reproducción total o parcial del material publicado en Tecnocultura, siempre y cuando cite la fuente. Los artículos son responsabilidad de los autores.

# Contenido

## **Cambios Químicos durante la Descomposición de Algunos Productos de Origen Acuícola de Importancia Comercial**

Soperanez-Ramírez M.  
Martínez-García, J.  
Caffarel-Méndez  
S. Barrientos-García R.  
Minor-Pérez, H.



6

## **El Conocimiento Científico en las Aulas de Clase**

Rafael Pedro Cruz Rodríguez



14

## **Biolixiviación y Recuperación de Cobre de un Mineral de Calcopirita de Baja Ley**

Martín R. Cruz Díaz  
Francisco C. Vidal Domínguez  
José Antonio Arcos Casarrubias  
Francisco J. Almazán Ruiza  
Ignacio González



21

## **Simulación de la Producción de Hidrógeno en la Estabilización Anaerobia de Lodos Residuales Secundarios**

Jéssica Samanta Hernández Gutiérrez  
Gabriela Zafra Jiménez  
Mayola García Rivero  
María Aurora Martínez Trujillo  
Sergio Esteban Viguera Carmona



31

# Cambios Químicos durante la Descomposición de Algunos Productos de Origen Acuícola de Importancia Comercial

Soperanez-Ramírez M.1, Martínez-García, J.1, Caffarel-Méndez, S.2 Barrientos-García, R.3 y Minor-Pérez, H.2

## Introducción

Los alimentos desde su cosecha, recolección, captura o sacrificio inician una serie de cambios en las características fisicoquímicas relacionadas a la descomposición, que pueden darse de manera lenta o rápidamente. Esta última condición se presenta en los productos de origen acuático, los cuales tienen un proceso de deterioro muy acelerado, lo que reduce su vida útil ((ICMSF, 2011).

Las principales causas de la descomposición de los alimentos son los microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) y las enzimas presentes en ellos (Jay, 2002). Los microorganismos y las enzimas intervienen en procesos fisicoquímicos de transformación de las sustancias que integran los alimentos.



### Acerca de los autores...

<sup>1</sup>Alumnas de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Bioquímica en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>2</sup>Profesor-investigador de la División de Ingeniería Química y Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>3</sup>Investigadora de la Universidad Politécnica de Tlaxcala (UPT), con estudios de doctorado en la UAM Iztapalapa y posdoctorado en el IPN.

Otros factores que pueden favorecer el deterioro químico o microbiológico de los alimentos son el uso incorrecto de parámetros como la temperatura, humedad relativa, atmósferas gaseosas, etcétera, durante el almacenamiento. Todos estos factores provocan diversos cambios químicos y microbiológicos, que se manifiestan por alteraciones del color, olor, sabor, consistencia o textura de los alimentos y la presencia de flora microbiana indeseable (Durazo, 2006).

Los productos acuáticos tienen la característica de ser muy perecederos. Esto se relaciona principalmente con su composición física, características biológicas y condiciones del medio ambiente, asimismo, factores como la manipulación pre y post-captura o la forma y condiciones de almacenamiento, entre otros (Primo, 1997). De acuerdo con las distintas características de los pescados, moluscos y crustáceos se tendrán diferentes procesos de descomposición.



Durante el inicio de este deterioro se producen una serie de cambios a nivel enzimático, lo cual conduce a modificaciones en el pH, temperatura, y producción de sustancias que influirán en las siguientes etapas; los microorganismos tendrán las condiciones óptimas para la proliferación y degradación del producto. El control de los factores que generan la descomposición de productos marinos y dulce-acuícolas retardará este proceso de deterioro (Guerrero, 2009).

En este artículo se hará una revisión general sobre los cambios químicos que se presentan en los alimentos de origen acuático (pescados, calamar y camarón) y su importancia comercial.

## Descomposición de productos de origen acuícola

### Pescado

El pescado fresco tiene una superficie brillante; sus ojos se conservan convexos (salientes) y brillantes. La textura del cuerpo es firme y elástica. El pH del músculo de un pescado recién capturado se encuentra entre 6.0 y 6.5 (Primo, 1997).

Después de su captura y muerte, el suministro de oxígeno al tejido muscular se interrumpe porque la sangre deja de ser bombeada por el corazón y no circula a través de las branquias donde, en los peces vivos, es enriquecida con oxígeno. Esta ausencia de oxígeno restringe la producción de energía a partir de los nutrientes (Huss, 1998).

Poco después de la muerte, en los peces se produce la llamada rigidez cadavérica o *rigor mortis* originada por la coagulación de la proteína contráctil que tienen los músculos, la miosina.

La descomposición del pescado se inicia después del *rigor mortis*, debido a una oxidación, a la autólisis favorecida por las enzimas naturales del pescado o de origen microbiano o a su combinación. El *rigor post mortem* en el pescado ocurre antes y dura menos tiempo que en la carne de vacuno; igualmente la reducción del pH es menor, debido a la composición química del pescado en el tejido muscular (baja concentración de carbohidratos y elevado contenido en

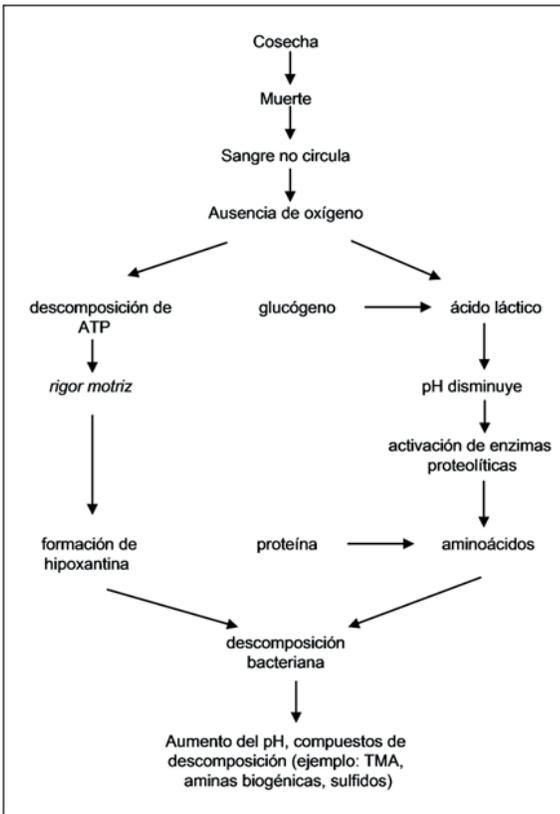
compuestos nitrogenados no proteicos). El pH final del pescado comúnmente es de 6.0 a 6.5 en los músculos blandos y de 5.5 a 6.0 en los músculos rojos (Primo, 1997). En la Tabla 1 se muestra un resumen de algunas características físicas del pescado en descomposición.

Características Organolépticas	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN		
	Muy Fresco	Fresco	Descomposición
Piel	Pigmentación brillante	Mucus ligeramente opalescente	La superficie de su cuerpo pierde el brillo y color. Se crea una mucosidad sobre el cuerpo para finalmente tomar una coloración amarilla o café.
Ojos	Convexos (salientes)	Córnea ligeramente opaca Pupila negra empañada	Los ojos se hunden y retraen gradualmente. La pupila se vuelve lechosa y la córnea se opaca.
Branquias	Color brillante	Menos coloreadas	Se tornan oscuras y grisáceas
Carne	Firme y elástica	Menos elástica	La carne se ablanda o se desprende fácilmente del esqueleto. Su elasticidad desaparece
Olor en branquias y cavidad abdominal	Algas marinas	Algas marinas u otro olor	Ligeramente ácido

**Tabla 1**

Características del pescado fresco y en descomposición

Cuando la descomposición avanza, se presentan cambios graduales en el olor del pescado fresco, hasta adquirir el olor intenso de la trimetilamina (olor amoniacal) y aminos biogénicos, como la histamina, causante de las reacciones alérgicas, La formación de TMA se muestra en la Figura 1. Se produce además, una textura limosa y blanda (Huss, 1998).



**Figura 1**

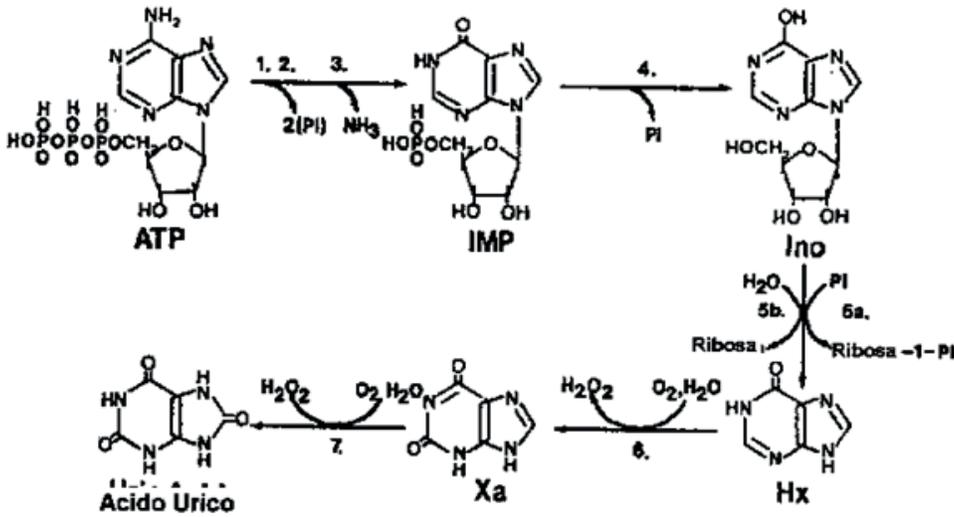
Cambios principales que se producen durante la descomposición del pescado

Otros cambios químicos que se presentan en la descomposición de los pescados están relacionados con la glucólisis, única ruta empleada para la producción de energía cuando el corazón deja de latir. En estas condiciones se genera principalmente ácido láctico y ácido pirúvico; el músculo anaeróbico no puede mantener su nivel normal de ATP. Cuando el nivel intracelular de esta molécula declina de 7-10 Qmoles/g a 1.0 Qmoles/g de tejido, el músculo entra en *rigor mortis*. La glucólisis post mortem resulta en la acumulación de ácido láctico y la disminución constante del pH en el músculo (Fennema, 2000).

Sin embargo, en alimentos marinos no se alcanzan valores de pH bajos como los observados en el músculo *post mortem* de mamíferos. Por ejemplo, el pH del músculo de vacuno generalmente disminuye a niveles de 5.1 durante el *rigor mortis*. La cantidad de ácido láctico producido está relacionada con la cantidad de carbohidrato almacenado (glucógeno) en el tejido vivo. En general, el músculo de pescado contiene un nivel relativamente bajo de glucógeno, comparado con los mamíferos y por esta razón se genera mucho menos ácido láctico después de la muerte (Chiba, 1991).

La disminución *post mortem* en el pH del músculo de pescado tiene un efecto en las propiedades físicas del músculo. A medida que el pH disminuye, se reduce la carga neta de la superficie de las proteínas musculares, causando su desnaturalización parcial y disminuyendo su capacidad de enlazar agua.

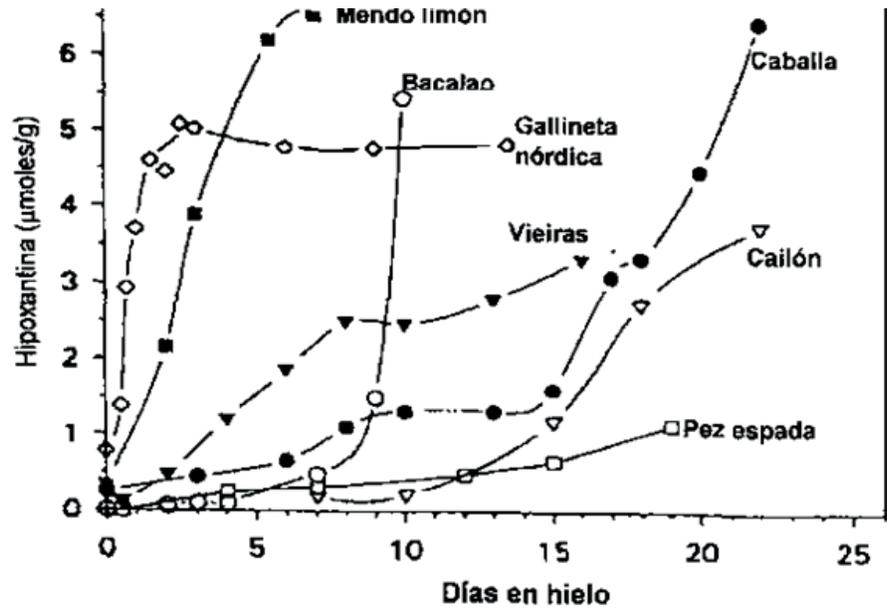
La resolución del rigor ocasiona el reblandecimiento (relajación) posterior del tejido muscular y se cree está relacionado con la activación de una o más enzimas musculares presentes en el pescado, las cuales digieren ciertos componentes del complejo *rigor mortis*. El reblandecimiento del músculo durante la resolución del rigor coincide con los cambios autolíticos. De estos cambios, el primero en ser reconocido de forma más o menos predecible después de la muerte, fue la degradación de los compuestos relacionados con el ATP (Sato, 1991), como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2**

Degradación del ATP para formar adenosina difosfato (ADP), adenosina monofosfato (AMP), inosina monofosfato (IMP), inosina (Ino) e hipoxantina (Hx).

La hipoxantina (Hx) tiene un efecto directo en el sabor amargo percibido en el pescado deteriorado. Actualmente, es ampliamente aceptado que la IMP es responsable del deseable sabor a pescado fresco (Surette, 1988). La Figura 3 muestra los cambios en Hx en distintas especies de pescado.



**Figura 3**

Cambios en la acumulación de Hx en varias especies de pescado durante el almacenamiento en hielo (Frazer y col. 1967).

## Catepsinas

Las enzimas provocan el ablandamiento del músculo del pescado. Un grupo importante de éstas son las catepsinas ácidas, que usualmente se encuentran empacadas en los lisosomas. En el tejido vivo, las proteasas lisosomales se cree son responsables de la degradación proteica. De esta forma, las catepsinas están generalmente inactivas dentro del tejido vivo, pero son liberadas dentro de los fluidos celulares luego de procesos como la congelación y descongelación *post mortem* del músculo (Fennema, 2000).

Una enzima característica de este grupo es la catepsina D; la cual generalmente es mucho menos activa en presencia de ATP. Esta condición sugiere que la enzima estaría activa sólo en el músculo de pescado *post mortem* (Reddi, 1972). Además, su actividad enzimática es fuertemente inhibida en presencia de la sal.

## Calpainas

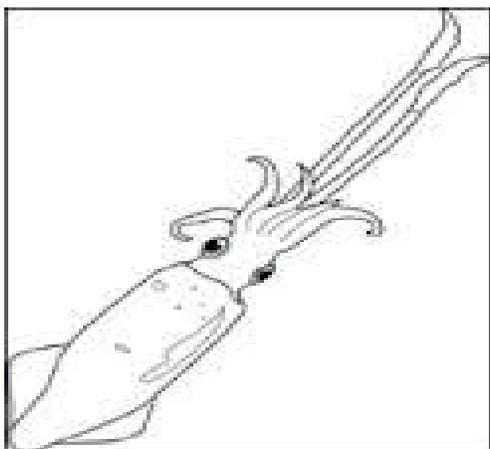
Otro grupo importante de proteasas intracelulares son las denominadas calpainas o Factor Activado por Calcio (FAC, por sus siglas en inglés) que han sido recientemente asociadas con la autólisis del músculo del pescado y se les encuentra en carnes, pescados de aleta y crustáceos (McMeekin, 1993).

## Colagenasas

El músculo de los peces teleósteos está dividido en bloques de células musculares separadas en escamas o miotomas, mediante tejido conectivo denominado miocomata. Cada célula muscular o fibra está rodeada por tejido conectivo que se une a la miocomata al final de la célula mediante finas fibrillas de colágeno. Son estas enzimas las que presumiblemente causan desgajamiento o ruptura de los miotomas (McMeekin, 1993).

## El Calamar

La porción comestible del calamar esta conformada por el manto, los brazos y los tentáculos, que representan el 80 a 85% de su peso corporal. El tejido muscular se degrada por acción de enzimas proteasas endógenas y bacterianas (Guerrero, 2009). La Figura 4 muestra algunas características del calamar.



Tiene un ciclo de vida corto y una elevada tasa de crecimiento.

Posee una alta tasa de recambio proteico y elevada actividad proteolítica endógena.

**Figura 4**

Características del Calamar

Por lo cual las proteasas endógenas son las principales causantes de la rápida autólisis, provocado la pérdida de firmeza del tejido (Guerrero, 2009).

En la Tabla 2 se muestran algunas características físicas del calamar fresco en comparación con uno en descomposición

Calamar Fresco	Calamar en Descomposición
Apariencia cremosa. Tejido muscular elástico firme. Olor característico.	Pérdida de firmeza y elasticidad. Se oscurece. Olor desagradable.

**Tabla 2**

Características físicas del Calamar

## Camarón

La pérdida de frescura en el camarón es debido a la multiplicación de las bacterias y se puede realizar por diferentes vías:

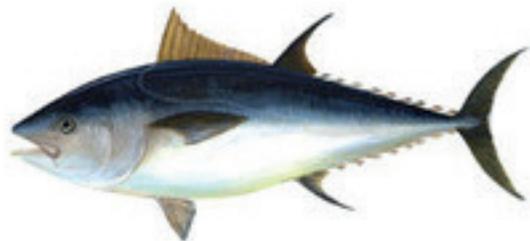
Uno se produce a temperaturas de refrigeración y el metabolismo de bacterias psicófilas y hace referencia común como deterioro. El otro es el resultado del metabolismo de bacterias mesófilas a temperatura ambiente y se refiere más apropiadamente como descomposición.

El deterioro del camarón generalmente es causado por bacterias Gramnegativas psicófilas en los grupos *Pseudomonas* sp. Estos microorganismos no son generalmente parte de la flora normal del camarón. Un subproducto principal del deterioro es el amoníaco. Como las bacterias de descomposición eliminan aminoácidos del aminoácido libre o proteína en el tejido de camarón, hay un aumento constante en el pH de los camarones. Generalmente el camarón fresco tendrá un pH 7.25-7.5, el camarón de calidad marginal entre 7.5-7.75 y el camarón deteriorado por encima de 7.75 (Ellis, 1984).

La descomposición es el resultado de la acción de organismos como *Klebsiella* y *Proteus*. Los principales productos de descomposición son cadaverina, putrescina, escatol y específicamente indol, que se produce a partir de la descarboxilación de la aminoácido triptófano.

La Administración de Fármacos y Alimentos de los Estados Unidos (FDA, por sus siglas en inglés) ha establecido tres clases de descomposición del camarón: Clase 1, incluye camarón con aroma fresco y no hay pruebas de mal olor. Clase 2, los camarones poseen un olor ligero de descomposición. Clase 3, incluye camarones que son, evidentemente, descompuestos (Ellis, 1984).





## Conclusiones

A través de esta investigación se puede deducir que los productos de origen acuático son altamente perecederos, debido a su composición física y características biológicas, ya que en una mayor proporción contienen proteínas y éstas tienden a ser sensibles a cambios ambientales y por lo tanto a desnaturalizarse; otro factor que influye, son las enzimas endógenas, que debido a estos cambios ambientales tienden a aumentar su catálisis y de esta manera a actuar proteolíticamente. Tras esta serie de cambios, los microorganismos oportunistas aprovechan las condiciones para su proliferación.

Los microorganismos y las enzimas intervienen en la descomposición, actuando en procesos fisicoquímicos de transformación de las sustancias que componen a los productos de origen acuático. Otros factores externos que influyen en la velocidad de descomposición son: los excesos de temperatura, la humedad, la luz, el oxígeno o simplemente el tiempo. Todos estos factores provocan diversos cambios físicos y químicos en el producto, que se manifiestan por alteraciones del color, olor, sabor, consistencia o textura en los productos de origen acuático.

## Agradecimientos

Marcela Soperanez Ramírez y Janeth Martínez García, agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca económica otorgada para realizar sus estudios de posgrado. Asimismo, los autores agradecen al CONACyT por el financiamiento otorgado a través del proyecto No. 131988.

ICMSF. 2011. *Microorganismos de los alimentos: características de los patógenos microbianos*. Editorial Acribia, Zaragoza (España), 165-174 p.

Chiba, A., Hamaguchi, M., Kosaka, T. Tokuno, T. Asai, and Chichibu, S. 1991. Quality evaluation of fish meat by phosphorus-nuclear magnetic resonance. *Journal of Food Science*, 56, 660-664.

Durazo-Beltrán, E. 2006. *Aprovechamiento de los Productos Pesqueros*, Departamento de Editorial Universitaria, Universidad Autónoma de Baja California, Av. Reforma 1375 Col. Nueva Mexicali Baja California México, Selección Anual para el Libro.

Huss, H. 1998. *El Pescado Fresco: su Calidad y Cambios de su Calidad*, FAO Documento Técnico de Pesca 348, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Editado por H.H.

Fennema, O. R. 2000. *Química de los Alimentos*. Segunda Edición. Editorial Acribia. Zaragoza, España. 1258 p.

Guerrero Legarreta, I., Rosmini, Marcelo. 2009. *Tecnología de productos de origen acuático*, 1ª edición, Ed. Limusa, 524 p.

McMeekin, T.A., Oiley, J., Ross, T. y D.A. Ratkowsky. 1993. *Predictive Microbiology: Theory and Application*. *Research Studies Press Ltd.*, Taunton, England.

Primo, E. 1997. *Química de los alimentos*. Ed. Síntesis. Madrid, España. 461 p.

Ellis, D.K; Nickelson, B.L. Holt and T. Resinger. 1984. Developing vessel level grade standards for the shrimp industry. *Proc. Trop. Subtrop. Fish Technol.*

Sato, K., C. Ohashi, K. Ohtsuki, and M. Kawabata. 1991. Type V collagen in trout (*Salmo gairdneri*) muscle and its solubility change during chilled storage of muscle. *J. Agric. Food Chem.* 39, 1222-1225.

Surette, M.E., T.A. Gill, and P.J. Leblanc. 1988. Biochemical basis of post mortem nucleotide catabolism in cod (*Gadus morhua*) and its relationship to spoilage. *J. Agric. Food Chem.* 36, 19-22.

Frazer Hiltz, D., W.J. Dyer, S.C. Nowlan y J.R. Dingle. 1972. Variation of biochemical quality indices by biological and technological factors. En: Fish inspection and quality control. R. Kreuzer (Editor), *Fishing News, Ltd.* London, 191-195m p.

Reddi, P.K., M.M. Constantanides, and H.A. Dymaza. 1972. Catheptic activity of fish muscle. *Journal of Food Science*, 37, 643-48.

Jay, J.M. 1992. *Microbiología moderna de los alimentos*. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 804 p.

# El Conocimiento Científico en las Aulas de Clase

Por: Rafael Pedro Cruz Rodríguez



## Introducción

Con el aumento de las aplicaciones tecnológicas en los diversos sectores productivos, especialmente en áreas relacionadas con la producción de bienes de valor añadido, la demanda educativa ha flexibilizado a los sectores industriales y de servicios en tecnologías que exigen a los actuales

profesionistas un mayor nivel de conocimientos que superan en mucho a los recibidos en las aulas de clase, lo cual parece perfilar una tendencia con predominio hacia los aspectos aplicados más que a los de desarrollo en las empresas para mejorar sus actividades.

Lo anterior obliga al profesionista a poseer y manejar una visión multidisciplinaria para lograr la aplicación eficaz de estas tecnologías en los diversos sectores económicos, una necesidad de alternativas que den lugar a la búsqueda de nuevas tecnologías, que sean el producto de un perfil de egresados con tendencias hacia la investigación profesional en cada una de las diferentes áreas.

Hablar de conocimiento hoy día es algo muy común, sobre todo en las aulas de clase, pero el tipo de conocimiento que se vierte en los alumnos tendría la conceptualización de serlo y además serían los docentes actuales capaces, bajo un cinismo Diógenico (Diógenes de Sinope, 2013), de considerarlo científico.

Dos grandes problemas a entender: ¿Se transmite conocimiento en las aulas? ¿Cuándo se habla de conocimiento, se habla de verdades? y ¿Este conocimiento tiene la categoría de ser científico?

Lo anterior conlleva a una revisión pragmática del discurso en el quehacer docente dentro del aula, regido actualmente por los contenidos de las unidades de aprendizaje que vierten, en respuesta a un modelo educativo, los conocimientos mínimos necesarios para conocer en un sentido doxológico y no epistemológico, áreas de un campo de una ciencia, que de manera habitual recorren en un discurso docente, frases empíricas o exclusivamente normativas que los académicos denominan ciencia y tecnología.

Es posible, entonces, presuponer que lo vertido en las aulas de clase son opiniones o maneras de pensar de los profesores en la impartición de sus cátedras, o que es un saber riguroso que tiene que ser admitido en la postura aristotélica epistemológica como algo sabido.

El problema del conocimiento se ubica ahora en el campo epistemológico, y hasta donde se conoce al mundo, es una invitación a abordar la teoría del mismo como la reflexión compleja que intenta explicar por qué nuestro conocimiento es de carácter científico.

Las ciencias presuponen que sus objetos de estudio existen, lo que permite decir que en el tiempo hay entidades y en el espacio “particularidades”, o que también se tienen otras entidades fuera del tiempo y del espacio: “universalidades”.

El problema del conocimiento se muestra en dos niveles: primero, no hay una realidad objetiva que conocer, sino una realidad subjetiva construida mental o intelectualmente por el profesor en el aula, y segunda, no todo conocimiento está fundado sobre bases, cimientos y teorías que garanticen que efectivamente es conocimiento.

Si el conocimiento en sus diferentes posturas transita de forma análoga como lo que es “verdad”, entendida ésta como un conocimiento respaldado y descrito en un campo del conocimiento, este posicionamiento permite hablar de una verdad de coherencia, de realidad, de sentido o de reflexión, y si además tiene ésta que ser validada, se deberá encontrar los argumentos que le permitan tener ahora el grado de científica.

El presente ensayo pretende generar la reflexión en los docentes respecto al discurso de su práctica académica, cuando se atreven a considerar al mismo como un saber acabado y último, sin tomar en cuenta las necesidades de las distintas áreas del conocimiento al cual sirven, y sin reflexionar en si es considerado científico o no en los reclamos de las áreas que hoy día no están claramente definidas como ciencias.



## Desarrollo

Es común escuchar las siguientes expresiones de los docentes en las aulas de clase: “se revisaron las teorías conforme al programa de contenidos de las unidades de aprendizaje”, “se explicaron todos los contenidos” y “se dictaron y explicaron las ideas principales,” pero qué bases se tienen para sustentar lo dicho por ellos.

El discurso docente tiene la peculiaridad de asentar siempre lo dicho por las teorías que expresa en cada una de sus clases y les da el calificativo de teorías del conocimiento, ¿pero éstas terminan siendo en verdad conocimiento válido?

De acuerdo con Bachelard, la ciencia no emerge de la experiencia: “Una experiencia científica es aquella que contradice a la experiencia común. Por otra parte, la experiencia inmediata y usual mantiene siempre una especie de carácter tautológico, se desarrolla en el mundo de las palabras y de las definiciones y carece de la perspectiva de errores rectificables que se caracteriza, según nuestro modo de ver el pensamiento científico”. (Bachelard, G. 1979, p. 13)

Por otro lado, tampoco es un producto de la aplicación de la razón trascendente, sino una creación que no acepta verdades primeras; las ciencias construyen su objeto de estudio como perspectivas de ideas y lo realizan a partir de la destrucción de los objetos de la intuición “... se conoce en contra de un conocimiento anterior, que destruye conocimientos mal adquiridos o superar aquello que, en el espíritu, obstaculiza a la espiritualización”. (Bachelard, 1979, p. 15)

Para Toulmin “La búsqueda de un criterio de racionalidad imparcial ha generado dos posturas: la que ubica a la razón exclusivamente y la que lo cataloga en hechos de la naturaleza, en una palabra: por un lado los racionalistas (verdades coherentes) y por el otro lado los empiristas y positivistas (verdades de sentido). (Toulmin, S., 1977, p. 23)

Toulmin cree que las argumentaciones cotidianas no siguen el clásico modelo riguroso del silogismo y crea uno adecuado para analizar cualquier tipo de argumentación en el marco de los discursos sociales.

La racionalidad científica no depende de los sistemas teóricos, sino de los procedimientos de indagación y los cambios intelectuales en el transcurso del tiempo. Distingue entre argumentos sustanciales, en los cuales la conclusión no trasciende el contenido de premisas universales y argumentos analíticos, en los que se infiere a partir de los datos del contexto. El razonamiento analítico es el formal y lógico usado por matemáticos y hombres de ciencia, basado en tesis preexistentes. El práctico, sustancial, no se mide con base en criterios de corrección o validez, sino de relevancia o irrelevancia, fortaleza o debilidad. (Toulmin, 1977, p. 29)

En el discurso docente resulta fácil afirmar que el término “teoría” tiene tres cosas distintas a analizar: un ámbito de conocimientos considerados al margen de sus aplicaciones prácticas (verdades empíricas), un orden sistemático de proposiciones legales que explican la naturaleza de cierta clase de fenómenos (verdades del sentido), e hipótesis con respecto a una interrogante planteada en la investigación científica (verdades de reflexión).

Con base en lo anterior, las teorías estarían conformadas por tres clases principales de elementos conceptuales: los términos del idioma del lenguaje humano de expresión del docente (verdades empíricas); los conceptos disciplinarios y culturales que enriquecen a las teorías, con la crueldad que implica la jerga técnica o especializada de su campo de conocimiento, apropiadas en su práctica docente (verdades del sentido), y los conceptos fundamentales de las propuestas relacionadas directamente con los problemas y reflexiones filosóficas propias de su área de conocimiento (verdades de reflexión).

Las primeras dos verdades, empíricas y del sentido, no garantizan que el conocimiento sea acompañado del vocablo científico, ya que se encuentran afectadas por el léxico o la terminología ordinaria a la que recurre el docente, con sus respectivos vocablos y reglas sintácticas o por los conceptos de que hecha mano y que se derivan de un aprendizaje y una práctica disciplinaria o inclusive de la situación y el desempeño sociocultural de quien cultiva la teoría.

El tercer tipo, verdad reflexiva, tendrían que ser conocimientos fundamentados en procesos y demostraciones que describan al menos las características de los objetos de estudio, en las aplicaciones nacidas de las necesidades de las ciencias estudiadas por los alumnos.

Si el discurso docente en la práctica educativa se sustenta con la validación de algunas teorías, éstas no deben tener su base en la retórica del lenguaje semántico expresado por el docente, sino en una lógica práctica y aplicada a través del uso argumentativo del lenguaje (Toulmin, 1977, p. 31).

Las argumentaciones no deben sólo quedarse en los sistemas lógicos, deben ser procedimientos que utilicen sustentaciones para llevar a cabo indagaciones y cambios intelectuales adaptables en el transcurso del tiempo.

Para Toulmin, los diversos conceptos de la disciplina científica no son generados como un único sistema lógico, por el contrario, los diferentes conceptos y teorías son introducidos, por lo general, en forma independiente,





en situaciones y momentos distintos únicamente para cumplir diferentes objetivos de las unidades de aprendizaje donde cada una de ellas responde a conceptos históricos en las ciencias, y a teorías lógicamente independientes, en las que cada uno tendrá su propia historia, estructura y implicaciones en términos de verdad.

Un elemento central en la epistemología de Reichenbach (Reichenbach, H., 2005, p. 48) es el “postulado”, o sea una proposición que se trata como si fuera cierta, por lo menos temporalmente, aunque no se sabe que lo sea; normalmente se postulan los eventos que poseen la máxima probabilidad, o sea que se apuesta a que lo más probable es lo que ocurrirá.

Distingue entre el “contexto del descubrimiento” y el “contexto de la justificación”, señalando que aunque el primero de ellos pudiera ser irracional, el segundo habitualmente coincide con la forma en que los científicos presentan sus resultados al público, o sea con una estructura compacta y coherente, en la que ha desaparecido toda incongruencia y arbitrariedad.

La aplicación de los conceptos teóricos en toda expresión racional depende de una disciplina entendida como tradición, procedimientos y técnicas para abordar los problemas teóricos o prácticos, y una profesión, que es el conjunto organizado de instrucciones y personas para mejorar los procedimientos o las técnicas.

Lo anterior deja manifiesto el desfase que se presenta cuando el docente, en su discurso, no considera la continuidad de su preparación en su área profesional, puesto que los conocimientos de su disciplina responden a un devenir cambiante, pero sobre todo a la aplicación a necesidades entendidas como verdades en el campo formativo de los alumnos.

Para Bachelard, las verdades científicas son producto de una construcción y verdades construidas, el problema del conocimiento es que siempre la realidad se hace en oposición a un conocimiento anterior, el conocimiento científico es una producción histórica, el desarrollo de la ciencia son rupturas históricas y superaciones de los errores y reconsideraciones del pensamiento humano cada vez más preciso de la realidad. (Bachelard, 1979, p. 32)

Con el enfoque de Bachelard, el discurso docente debería estar ubicado en lo que él llamó “racionalismo aplicado”, esto es, no racionalismo abstracto sino atento a la realidad para aprender de ella, y representa el diálogo que el investigador científico instaura con sus experimentos: teoría matemática por un lado, e instrumentos precisos por el otro. A este racionalismo aplicado, completa, por la parte opuesta, un “materialismo instruido”, de modo que sólo la experiencia que aprende de la teoría constituye el verdadero conocimiento científico, además encuentra elementos en el interior del intelecto que dificultan el conocimiento certero de lo real y no permiten la adecuada evolución del espíritu para que pueda pasar de un estado pre-científico caracterizado por lo objetivo, lo inmediato, lo dado por los sentidos, a un estado de conocimiento científico por las ciencias.

Hablar sólo del significado epistemológico de lo considerado como verdad en el discurso docente, conlleva a problemas del propio conocimiento, donde hablar de la apropiación de éste como algo acabado es un riesgo, sobre todo si el discurso se vuelve el multiplicador de lo considerado como conocimiento, y un verdadero riesgo si lo calificamos de científico, por lo que resulta urgente un nuevo significado de las posibles verdades del campo del conocimiento.

Un saber es aquello de lo que se puede hablar en una práctica discursiva, el dominio constituido por los diferentes objetos que adquirirán o no un estatus de científico; el docente entonces funge como representante y portador de este saber, que a su vez le da identidad prestigio y autoridad.

La autoridad que le da el saber, se funda en el supuesto que le da la “verdad del saber”, entendida como una verdad en ese espacio y tiempo de significación de lo enunciable y lo visible en un momento histórico determinado.

## Conclusiones

Todo lo expuesto permite plasmar conclusiones que terminan desacreditando el discurso docente, cuando está encaminado a plasmar verdades que actualmente pertenezcan de forma exclusiva a un campo del conocimiento y que dentro del mismo adquieran la conceptualización de verdad.

Las verdades tienen un carácter de transición entre las diferentes ciencias teóricas científicas con saberes formales y empíricos, o ciencias teóricas no científicas con saberes metafísicos y críticos, pero las necesidades de las actuales ciencias han conformado una flexibilidad en sus campos del conocimiento que superan con mucho esta simple división.

Las ciencias actualmente hacen una conjunción de verdades consideradas teorías, las cuales para ser llevadas a la solución de problemas, no distinguen tan fácilmente la separación entre ellas, y conforme a sus propias necesidades apilan elementos que sin darnos cuenta transitan entre lo que hemos llamado particularidades y universalidades.

Si esto ocurre entre los diferentes campos de conocimiento, el discurso docente no escapa en su práctica de esta ambigüedad de conceptualizaciones.

Es necesario entender que el devenir histórico conforma cambios que superan la realidad de los campos del conocimiento, los cuales al entenderse como elementos cognitivos no acabados en una espiral científica, al encontrarse ante las verdades coherentes, reales, de sentido o de reflexión, enfrentan la parte subjetiva del docente, justificada por la voz de experto, del propio académico.

Para concluir, es preciso también reflexionar en la vigencia que reclaman los nuevos modelos educativos para categorizar a los conocimientos o verdades como científicos, basta con preguntarse si la profesión que ostentamos ha evolucionado y superado esta adecuación para estar considerada como verdad



y poder postular, a partir de ella, una teoría que acepta la comprobación o refutación para ser científica.

Existen verdades que son independientes de las ciencias, pero no hay verdades sin una práctica discursiva definida en las teorías que la forman, por lo que el discurso termina siendo el acto del lenguaje que se define a través del sistema de relaciones materiales que lo estructuran y lo constituyen.

Todo discurso sólo se puede definir en la relación que tiene con otros discursos dentro de la práctica, que obedece a normas de relación y regulación que terminan siendo elementos significantes remitidos a contenidos y representaciones de prácticas que forman objetos y son conformados por sujetos reconocidos como docentes por los propios alumnos.

Para los alumnos, la verdad significa conocer los significados y aprender a usar lo que ve en los pizarrones o en los materiales que se le proporcionaron, con la dirección discursiva del docente, las cuales terminan siendo las reglas implícitas que rigen la formulación de procesos llenos de frases aceptables para la solución de problemas.

El saber si lo aprendido en el aula es o no un conocimiento científico, es validado y aceptado como tal cuando el alumno en su propia práctica profesional comprueba que los métodos y la teorías aprendidas bajo el discurso del docente, le permiten en el tiempo y espacio, aplicar una verdad con carácter de coherencia, de sentido, de realidad y de reflexión, este último ahora en su carácter de profesional dentro de una disciplina, por lo que termina aceptándolo como científico.

## Bibliografía

Bachelard, Gastón. (1979). *La formación del espíritu científico. Contribución a un psicoanálisis del conocimiento objetivo*. México: Siglo XXI Editores.

Reichenbach, Hans. (2005). *Objetivos y métodos del conocimiento físico*. México: FCE.

Toulmin, Stephen. (1977) *La comprensión humana. Vol.1, El uso colectivo y la evolución de los conceptos*. Madrid: Alianza Editorial.

Universidad de Puebla. (2012). *Antología, Área I. Epistemología y de Investigación, Seminario de Epistemología de la Ciencia*.

## Cibergrafía

Diógenes de Sinope, el cínico o el perro, Miguel G. Macho, Enero 03, 2013, YouTube, TribunaVirtual.com, España, en <http://www.youtube.com/watch?v=744xpGL8QbY>



# Biolixiviación y Recuperación de Cobre de un Mineral de Calcopirita de Baja Ley

Martín R. Cruz Díaz<sup>a\*</sup>, Francisco C. Vidal Domínguez<sup>a</sup>,  
José Antonio Arcos Casarrubias, Francisco J. Almazán Ruiza<sup>ab</sup>, Ignacio González<sup>b</sup>.



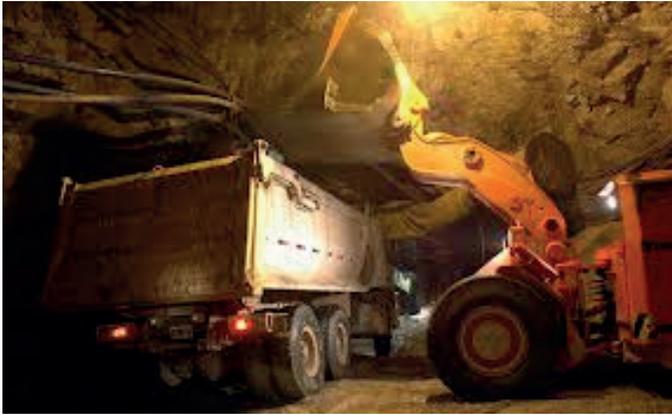
## Acerca de los autores...

<sup>a</sup> Académico de la División de Química y Bioquímica, del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

<sup>b</sup> Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana

## Resumen

Este trabajo describe el estudio experimental de la biolixiviación de cobre de un residuo mineral de calcopirita en un Biorreactor de Lecho Escurrecido (BLE), utilizando un consorcio de microorganismos nativos del mineral, principalmente del género *Acidithiobacillus ferrooxidans*; posteriormente a la etapa de biolixiviación, se recuperó el cobre biolixiviado empleando un reactor de cilindro rotatorio (RCE). El estudio experimental se



realizó en un BLE a escala de laboratorio (0.075 m de diámetro interno  $\times$  0.49 m de longitud) que operó en co-corriente descendente de las fases gas y líquida (medio de cultivo). El diseño de la columna junto con el estudio de la caracterización de la hidrodinámica, permitieron encontrar las condiciones de operación óptimas del BLE, lo cual ayudó a reducir de manera considerable el tiempo de biolixiviación de cobre. El flujo de aire pre-humidificado fue de 10 LPM mientras que el flujo de recirculación del líquido fue de 1.89 LPM; el pH del medio de cultivo se mantuvo en un valor de 1.5 durante 85 días de operación. La biolixiviación de cobre del mineral de sulfuro (calcopirita) por acción microbiana en el BLE, se realizó en un tiempo menor respecto a los reportados en las pilas o botaderos (91.34% de tasa de biolixiviación). El Cu(II) contenido

en el licor biolixiviado, se recuperó en forma metálica en el RCE (350 ml de capacidad) en presencia de otros iones (Fe, Pb, Zn y silicatos), y la tasa de recuperación del cobre vía electroquímica fue del 93%.

## Introducción

La recuperación de metales a partir de residuos mineros es un proceso económicamente atractivo, y al mismo tiempo contribuye a la limpieza del medio ambiente. Sin embargo, la tecnología de lixiviación de “residuos mineros en pilas o columnas de escurrimiento” son procesos considerablemente lentos, debido a que no se tiene una buena interacción entre las fases sólido-fluido (mineral-líquido). Actualmente se han desarrollado distintos diseños de biorreactores para asistir la lixiviación de los metales, entre éstos se encuentran los biorreactores de tambor giratorio, biorreactores de lecho fluidizado y biorreactores en columna de lecho percolado.

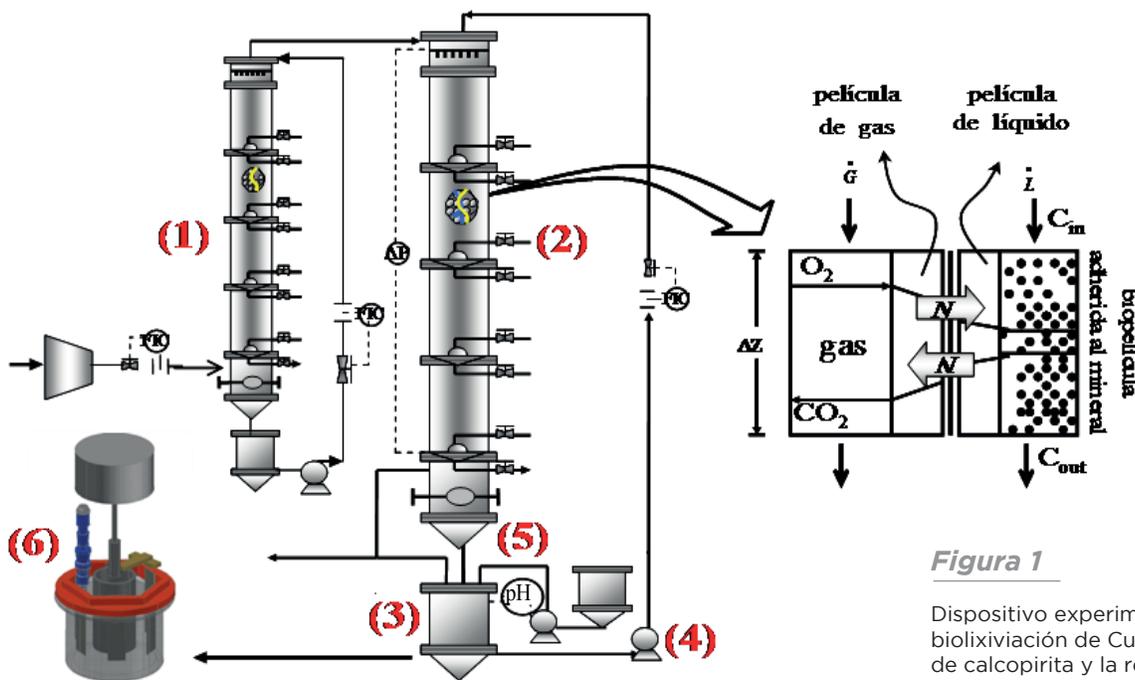
Los biorreactores de lecho escurrido pueden ser una alternativa para acelerar la lixiviación de los metales de estos residuos. Asimismo, en ellos se incrementa el contacto entre las fases, tanto del gas al líquido, como del líquido a la biopelícula de microorganismos adherida a la superficie del mineral; en esta última se lleva a cabo la biolixiviación del metal por el suministro constante a los microorganismos de nutrientes y oxígeno disuelto, así como una acidez adecuada de la fase líquida (Conc.  $H^+$ ), que permiten desprender el metal (i. e.  $Cu^{+2}$  y  $Fe^{+3}$ ) incorporado en la matriz sólida al seno de la fase líquida, en donde se concentra hasta el final del proceso [1-2]. En particular, la biopelícula está constituida por microorganismos de la especie *Acidothiobacillus ferrooxidans*, denominado el microorganismo principal de la biolixiviación, pues crece en ambientes ácidos ( $pH < 3$ ), con alta concentración de iones metálicos y utiliza iones ferroso o compuestos de azufre reducido como fuente de energía. Una vez que se obtiene el licor lixiviado, es importante implementar un método que permita la recuperación de metales en su forma más valiosa, estado de oxidación cero. Los reactores de electrodos de cilindro rotatorio, han mostrado altas eficiencia y rendimientos en la recuperación de iones metálicos a nivel laboratorio y piloto [3-5].

Sobre este contexto, en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE) en colaboración con la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa (UAM-I) se diseñó y construyó un BLE para la biolixiviación de Cu(II) de un mineral de calcopirita, que operó con y sin controlador de pH en condiciones óptimas de las fases fluidas gas-líquido, las cuales se determinaron a partir de un estudio hidrodinámico. El objetivo es disminuir los tiempos de

biolixiviación de metales y alcanzar las tasas de recuperación exigidas por la industria. Posterior a la biolixiviación, se utilizó un reactor electroquímico RCE para evaluar la factibilidad de la recuperación del Cu(II) biolixiviado en su forma más valiosa “Cu metálico” en presencia de otros iones, silicatos y biomasa.

## 1. Metodología

El dispositivo experimental (Figura 1) consistió de una columna de pre-humidificación (1), el flujo de aire pre-humidificado (10 LPM) se alimentó a la columna de biolixiviación (2) en la parte superior de ésta; el medio de cultivo con bacterias quimiolitotróficas que pertenece a una especie de *Thiobacillus*, contenido en un tanque reservorio (3), se hizo recircular por medio de una bomba magnética (4) por el domo de la columna a un flujo de 1.89 LPM; el pH del medio de cultivo se mantuvo en un valor de 1.5 por medio de un controlador de pH (5). El Cu(II) presente en el licor biolixiviado se recuperó en forma metálica Cu (0) utilizando un reactor electroquímico de cilindro rotatorio de 350 ml de capacidad (6). Para alcanzar el objetivo planteado, la estrategia experimental consistió de cuatro partes: a) caracterización de la hidráulica del BLE, b) tasa de biolixiviación de metales del residuo de mineral de calcopirita en el BLE, c) caracterización fisicoquímica y electroquímica del efluente biolixiviado, y d) recuperación de Cu(II) del efluente biolixiviado empleando un reactor electroquímico de electrodo de cilindro rotatorio (RCE).



**Figura 1**

Dispositivo experimental para la biolixiviación de Cu(II) de un mineral de calcopirita y la recuperación de Cu(0) en un RCE. (1) Columna de pre-humidificación, (2) Columna de biolixiviación BLE, (3) Tanque reservorio, (4) Bomba centrífuga, (5) Controlador de pH, (6) Reactor electroquímico de cilindro rotatorio.

### 1.1 Caracterización de la hidrodinámica del BLE

Un biorreactor de cuatro fases “gas-líquido-biopelícula-mineral en régimen de escurrido o régimen de baja interacción” en operación co-corriente



descendente de la fase gas y líquida, se caracteriza porque el gas se desplaza como una fase continua, mientras que el líquido se desplaza entre los intersticios como películas, riviuletos, chorros y gotas. Un exceso de líquido formara bolsas (flujo estancado) de agua o fluiría por las paredes como una desviación (by-pass), llevando a una mala distribución del fluido (DTR). Los espacios ocupados por el líquido desviado o estancado provocarán una disminución en el diámetro hidráulico, cambios en la área superficial específica, la fracción vacía, el factor de rugosidad de la superficie, un incremento de la caída de presión gas-líquido y un incremento en la fracción del volumen de retención de líquido dinámico, este último es de vital importancia, ya que de él depende el mojado de la fase biopelícula-mineral, así como del suministro y retiro constante de nutrientes y productos, respectivamente.

En el presente trabajo se realizó la caracterización hidrodinámica con tres diferentes relaciones de flujo G/L: se caracterizó el lecho empacado sin biopelícula (inicio) y con biopelícula (al final de cada biolixiviación); el estudio consistió en la determinación de los siguientes parámetros: a) la fracción vacía por la técnica de inundación y cuantificación del volumen de líquido drenado; b) la caída de presión, utilizando manómetros digitales en el domo y fondo de la columna; c) la distribución de tiempos de residencia (DTR) por la técnica de pulso-respuesta, para ello se utilizó una solución de NaCl a una concentración de 0.85 M como trazador; d) la fracción del volumen de retención dinámica, la cual se determinó por el método de drenado; e) la fracción del volumen de retención total, se estimó a partir del flujo de líquido multiplicado por el tiempo de residencia promedio; f) Finalmente, la eficiencia de mojado de la biopelícula-mineral se calculó de acuerdo con la expresión propuesta por *Pironti et al.* (1999).

## 1.2 Biolixiviación del mineral de baja ley en un Biorreactor de Lecho Empacado

La experimentación para determinar la tasa de biolixiviación de Cu(II) de un residuo minero de calcopirita, se realizó en un BLE escala laboratorio de acrílico en operación co-corriente descendente de las fases fluidas, la columna consistió de dos módulos de 24.5 cm de longitud y diámetro de 7.5 cm (Figura 1); entre cada módulo se instalaron re-distribuidores de gas-líquido para eliminar el efecto de pared. Los módulos se empacaron con residuos minerales de calcopirita de tamaño de partícula de 1.25–1.5mm (Cu = 0.57%, Fe = 3.78%, Zn = 3.69% Pb = 0.267%). El estudio experimental de biolixiviación en columna constó de dos ensayos: el primero se realizó “sin controlador de pH”, donde las oscilaciones del valor de pH estuvieron entre 1.0 a 3.0; mientras que la segunda biolixiviación se realizó “utilizando un controlador de pH” a un valor constante de 1.5; el tiempo de operación de cada ensayo fue de 85 días. En el efluente biolixiviado se determinó la concentración de iones metálicos: Fetotal y Cu(II), así como Zn y Pb mediante espectrofotometría de absorción atómica (Varian<sup>TM</sup> Modelo 220 FS).

## 1.3 Caracterización electroquímica del efluente biolixiviado

En la recuperación electroquímica de cobre de efluentes provenientes de un proceso de biolixiviación, se deben considerar algunos aspectos importantes del proceso, como son: a) la cantidad de iones metálicos (Fe, Pb, Zn, Cu)

presentes en el biolixiviado, b) así como la presencia de especies como silicatos y biomasa, que suelen afectar el proceso de deposición de metales. Por lo antes descrito, la caracterización electroquímica del biolixiviado consistió de estudios de microelectrólisis; mediante voltamperometría a “circuito abierto y cíclica”, con la finalidad de conocer el potencial donde se reduce el cobre en presencia de los iones presentes, silicatos y microorganismos en suspensión. Para este propósito se implementó una celda de tres electrodos: a) un electrodo de acero inoxidable S316 como cátodo, b) un electrodo de grafito como contra-electrodo y c) un electrodo saturado de sulfatos como referencia (Hg/HgSO<sub>4</sub>/K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(sat),SSE). Los experimentos se llevaron con agitación controlada, utilizando un sistema de disco rotatorio PINE™ modelo AFCPRB ROTATOR y un Potenciostato-Galvanostato PARSTAT® 2273 con capacidad de 2 A, acoplado al software de adquisición de datos PowerSUITE® Electrochemistry.

## 1.4 Recuperación de Cu en un RCE escala laboratorio

A partir de las condiciones energéticas encontradas en la caracterización electroquímica por medio de microelectrólisis, se establecieron las condiciones para la recuperación de Cu (II) en un reactor electroquímico RCE escala laboratorio (350 ml). El RCE consistió de un cilindro de acero inoxidable S316 utilizado como cátodo, seis placas de DSA como ánodos, un motor de revolución variable marca CAFRAMO™ y un Electrodo de Sulfatos Saturados (SSE) como electrodo de referencia. La operación se llevó en régimen controlado por transporte de masa a dos diferentes velocidades de rotación (700 y 900 rpm) y a control potencioestático (-9.0 V vs SSE); para ello se usó un potencioestato-galvanostato Princeton Applied Research™ modelo VMP3, a este potencioestato se acopló una fuente de poder Princeton Applied Research™ de 20 A y 20 V de capacidad.

## 2. Resultados y Discusión

Los resultados de la caracterización hidrodinámica del BLE se muestran en la siguiente Tabla I. En ella se presentan los parámetros hidrodinámicos

Parámetro	Relación G/L					
	2.6		5.3		7.0	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
$\varepsilon$	0.49	0.40	0.49	0.44	0.49	0.41
$\Delta P_G$ (Pa)	117.7	136	117.7	130	117.7	128
$\Delta P_{G-L}$ (Pa)	3530	5884	883	2740	294	1961
$t_R$ (s)	7.12	7.37	11.64	12.55	14.54	20.34
$h_T$	0.299	0.238	0.244	0.241	0.239	0.235
$h_d$	0.156	0.142	0.126	0.118	0.117	0.107
$h_{est}$	0.139	0.099	0.117	0.124	0.116	0.129
$f_W$	0.98	-----	0.87	-----	0.75	-----
$D_{ax}$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$8.8 \times 10^{-4}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$5.9 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-4}$	$5.2 \times 10^{-4}$	$3.3 \times 10^{-4}$

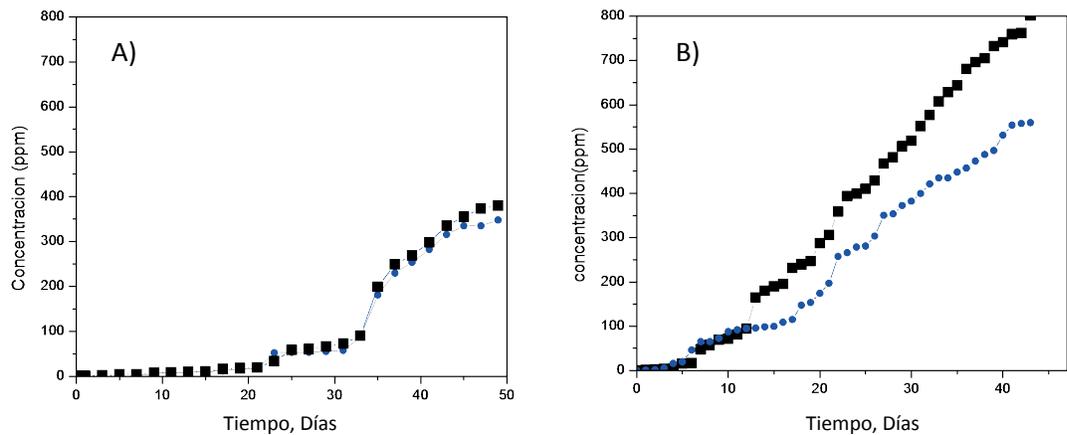
**Tabla 1**

Parámetros hidrodinámicos antes y después de la operación a las diferentes relaciones de flujo G/L.

al inicio y final de la biolixiviación. Se observa que al final de cada ensayo de biolixiviación la  $\epsilon$  disminuye, mientras que la caída de presión del gas ( $\Delta P_g$ ) y gas-líquido ( $\Delta P_{g-l}$ ) se incrementa. Por otro lado, al aumentar la relación de flujos gas-líquido (G/L) y disminuir  $\tau$ , se amplía el tiempo de residencia,  $t_R$ , mientras que el valor de volumen de retención total  $h_T$  disminuye. El comportamiento de dichos parámetros, proporciona información referente al crecimiento de la biopelícula sobre el mineral, al grado que modifica estos parámetros, pues los espacios intersticiales entre las partículas decrecen. Respecto al valor de  $f_w$  se observa que conforme se incrementa el valor de G/L este parámetro disminuye, esto nos informa que al disminuir el flujo líquido existen zonas del mineral que no están mojadas (no activas), lo cual repercute en el valor de  $h_T$  y a su vez repercutirá en la eficiencia de biolixiviación. Por último, el valor de  $D_{ax}$  para el caso de un valor de G/L de 5.3, prácticamente permanece constante al inicio y final de la biolixiviación, lo cual es favorable, pues durante la operación de la columna no existirán desviaciones fuertes del patrón de flujo y el BLE estará trabajando de forma eficiente.

## 2.2 Biolixiviación de mineral (residuo) en un Biorreactor de Lecho Ecurrido

Con base en la caracterización hidrodinámica de la columna, se estableció trabajar en una relación de G/L=5.3. Las figuras 2a-b muestran la concentración de Cu(II) y  $F_{e\text{total}}$  biolixiviado como función del tiempo de operación del BLE; dichas biolixiviaciones se realizaron sin y con controlador de pH (figuras 2a y 2b, respectivamente).



**Figura 2**

Concentración de Cu(II) y  $F_{e\text{total}}$  como función del tiempo de biolixiviación en el BLE. ● Concentración de Cu(II); ■ Concentración de  $F_{e\text{total}}$ . (a) Sin control de pH; (b) Con control de pH.

En la Figura 2A (sin controlador de pH) se observa que al inicio de la biolixiviación, la concentración de cobre y hierro en solución son muy bajas, y hasta después de 20 días de operación empieza aparecer Cu(II) y  $F_{e\text{total}}$  de forma simultánea; posterior a este tiempo, la concentración de ambos iones se incrementa en forma exponencial hasta llegar un valor constante después de 70 días (etapa no mostrada en la gráfica). Por otro lado, en la figura 2B se observa que la concentración de Cu(II) y  $F_{e\text{total}}$  aparece después de seis días de operación; con alrededor de 12 días de operación, la tasa de biolixiviación del hierro es mayor respecto a la de Cu(II) y así se mantienen hasta los 70 días de operación.

Por lo tanto, cuando se mantiene un valor constante de pH=1.5 y condiciones hidrodinámicas óptimas, la tasa de biolixiviación de ambos iones metales se incrementa en comparación cuando el pH oscila entre 1.5 a 2.5; este comportamiento podría estar relacionado con lo siguiente: cuando se pone en contacto la fase líquida ácida (pH entre 1.5 a 2.5) con un mineral sulfurado metálico en presencia de oxígeno y microorganismos, se incrementa el valor del pH de la solución, producto de la oxidación del mineral de sulfuro para producir ión férrico y Cu(II); entonces cuando la fase líquida oscila entre pH=1.5 a 2.5 posiblemente la tasa de reacción decrece, permitiendo la formación de una capa pasivante de azufre elemental que cubre la superficie de las partículas de calcopirita, limitando el contacto y la difusión de los nutrientes, así como el transporte iónico a través de dicha capa, que no hace posible la disolución del metal. Esto se puede correlacionar con la cantidad de silicatos depositados en el fondo del tanque de recirculación, donde a pH controlado de 1.5 se observó una mayor cantidad de silicatos (inspección visual), lo cual estaría indicando que la partícula se estaba desgastando.

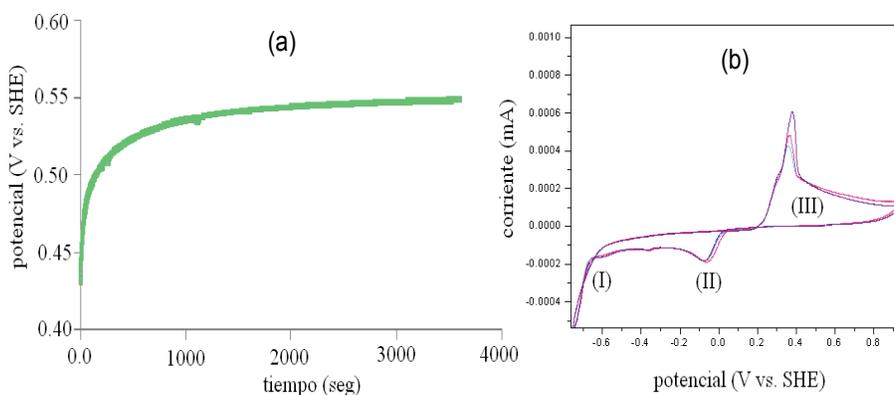
## 2.3 Caracterización fisicoquímica y electroquímica

En la Tabla II se muestra la especiación fisicoquímica del biolixiviado determinada por absorción atómica, en ésta se observa que la concentración de Zn y Pb lixiviado es muy baja, mientras que la concentración de Cu(II) y FeTotal lixiviado es mayor, lo cual confirma que el consorcio microbiano de bacterias quimiolitotróficas del género Thiobacillus es selectivo a la lixiviación de hierro y cobre. En la Figura 3 se muestran los estudios de la caracterización electroquímica del efluente biolixiviado por medio de las técnicas de potencial de circuito abierto (Fig. 3a) y voltamperometría cíclica (Fig. 3b).

Muestra	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Pb (ppm)
Biolixiviado (sin control de pH)	335.117	315.7	32.5	1.72
Biolixiviado (Control pH)	801.6	681.2	33	1.55

**Tabla 2**

Caracterización fisicoquímica del biolixiviado.



**Figura 3**

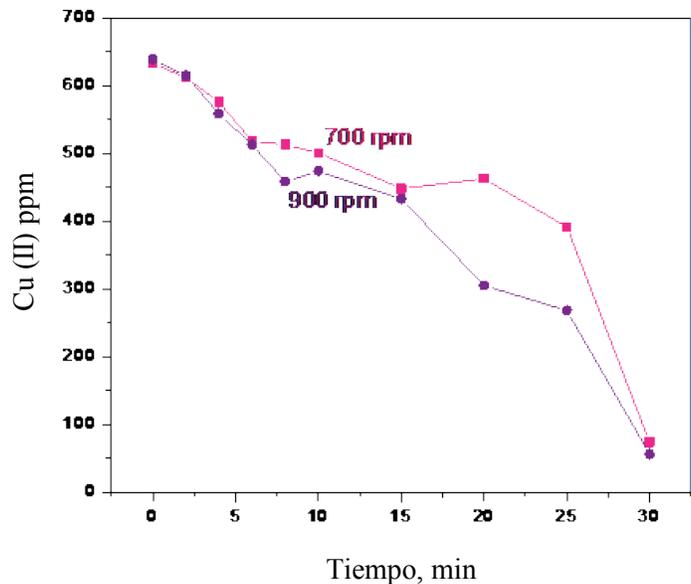
Estudio de la caracterización electroquímica del efluente biolixiviado sobre un electrodo de acero inoxidable S316 con área de 0.312 cm<sup>2</sup>. a) potencial de circuito abierto (OCP). b) voltamperometría cíclica (V= 50 mVs<sup>-1</sup>).

En la Figura 3a se observa que en los primeros segundos existe una caída de potencial muy marcada en la dirección negativa, esto se debe a un cambio en la superficie del electrodo, producido por las interacciones entre la interfase electrodo-solución. Inmediatamente a esa caída, el potencial se incrementa, debido a la formación de una capa protectora en el acero inoxidable, típico en este material. El tiempo de inmersión donde la interfase metal-solución presenta un comportamiento estable y reproducible es después de 1000 segundos.

En la Figura 3b se muestra la voltamperometría cíclica realizada en la solución biolixiviada sobre un electrodo de acero inoxidable a  $50 \text{ mV s}^{-1}$  desde el potencial de circuito abierto (OCP) hasta un potencial  $E = -0.6 \text{ V vs. SSE}$  en la dirección negativa, y regresando a  $E = -0.6 \text{ V vs. SSE}$  en barrido de potencial inverso. Se observa que el pico de reducción (II) está asociado al proceso de electrodeposición del  $\text{Cu(II)}$ , por otro lado, la zona (I) a un potencial de  $-0.95 \text{ V vs. SHE}$  está asociada con la reducción de iones  $\text{H}^+$  en solución, que es favorecida por el depósito de  $\text{Cu}$ . Los picos (III) observados en la dirección positiva están asociados al mecanismo de oxidación del cobre depositado en el electrodo.

## 2.4 Recuperación de Cu en un RCE escala laboratorio

En la Figura 4 se muestran las curvas de decaimiento de la concentración de  $\text{Cu(II)}$  en función del tiempo de electrólisis a 700 rpm y 900 rpm, a control potencioestático ( $-0.9 \text{ V vs SSE}$ ) durante 30 minutos de electrólisis. Es importante mencionar que el  $\text{Cu(II)}$  en su estado metálico  $\text{Cu(0)}$ , se recupera sin hacer tratamientos adicionales al efluente biolixiviado. Del análisis de la Figura 4, se observa que ambas electrólisis presentan un comportamiento muy similar hasta un tiempo de 25 minutos, posterior a éste la concentración de cobre a 700 rpm de velocidad angular es menor que la de 900 rpm. El porcentaje de recuperación de cobre alcanzado a 700 rpm fue de 73%, mientras que a 900 rpm la tasa se incrementó hasta 93%.



**Figura 4**

Decaimiento de la concentración de  $\text{Cu(II)}$  en función del tiempo de electrólisis en el RCE de acero inoxidable, a velocidades angulares: ■ 700 rpm, ● 900 rpm.



## Conclusiones

La biolixiviación de mineral de sulfuro (calcopirita) por acción microbiana controlando el  $\text{pH}=1.5$ , permitió la obtención de  $\text{Cu(II)}$  en un tiempo menor a las obtenidas en las pilas o botaderos, por lo que la utilización de un biorreactores de lecho escurrido es una alternativa viable, ya que las condiciones de operación permiten tener un control adecuado de las variables del proceso. La tasa de recuperación de cobre en el lixiviado fue de 83% con respecto al porcentaje en composición de mineral. La recuperación de  $\text{Cu(II)}$  en el licor biolixiviado a  $\text{Cu(O)}$  utilizando un reactor RCE en presencia de iones como Fe, Pb, Zn y silicatos fue selectiva, alcanzando un 93% de recuperación a 900 rpm. Por lo tanto, el uso de un RCE es una alternativa viable en la recuperación de cobre biolixiviado, ya que fue posible recobrarlo en su estado más valioso: como metal, sin hacer un pre-tratamiento al biolixiviado.

## Agradecimientos

Los autores del presente trabajo agradecen al Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE), por el apoyo económico brindado para la realización del presente trabajo (Apoyo extraordinario 2008 clave: DIQB-MCIQ-003/08).

## Referencias

1. Benítez Ramos, Patricia Isabel, Almazán Ruiz Francisco J., *et al.*, "Recuperación de cobre de un efluente generado en un biorreactor de lecho escurrido utilizando un reactor de electrodo de cilindro rotatorio", XXI Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva, México D.F., 16 al 18 de mayo de 2012.
2. *Ibidem*, XXXIII Encuentro Nacional y II Congreso Internacional AMIDIQ 1 al 4 de mayo de 2012, San José del Cabo, BCS, México.
3. Almazán Ruiz Francisco Javier, Tesis de Maestría, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (2011).
4. I. Giannopoulou, *et al.*, *Hydrometallurgy*, 90, (2008) 137.
5. F. F. Rivera, *et al.*, *Environm. Tech.*, 29, (2008) 817.

# Simulación de la Producción de Hidrógeno en la Estabilización Anaerobia de Lodos Residuales Secundarios

Jéssica Samanta Hernández Gutiérrez<sup>1</sup>, Gabriela Zafra Jiménez<sup>2</sup>, Mayola García Rivero<sup>2</sup>, María<sup>1</sup> Aurora Martínez Trujillo<sup>2</sup>, Sergio Esteban Vigueras Carmona<sup>2</sup>

## Resumen

**E**l objetivo del presente trabajo fue realizar la simulación de la producción de hidrógeno en un reactor de mezcla completa alimentado con lodos residuales secundarios (LRS). Para la elaboración del mismo, se utilizó el modelo matemático para la digestión anaerobia, ADM1.

La simulación de la digestión anaerobia metanogénica de LRS produce en promedio 0.21 mL H<sub>2</sub>.g-1SSV. Con la intención de aumentar la productividad del hidrógeno, se simulan dos estrategias de enriquecimiento del inóculo. En la primera se añade un microorganismo productor de hidrógeno (*Clostridium*) directamente al digestor anaerobio de lodos; con ello, el rendimiento de hidrógeno se mantiene en el mismo nivel. La segunda estrategia es inhibir los grupos consumidores de azúcar (fermentación) y consumidores de hidrógeno (metanogénesis hidrogenotrófica) y enriquecer el digestor con *Clostridium*, con lo cual los rendimientos de hidrógeno pueden ser hasta de 70 ml.g-1SSV.

### Acerca de los autores...

<sup>1</sup>Estudiante de la Maestría de Ingeniería Bioquímica del Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec (TESE).

<sup>2</sup> Profesor(a) de la División de Ingeniería Química y Bioquímica del TESE.

**Palabras clave:** *Clostridium*, hidrógeno, digestión anaerobia, lodos residuales secundarios, enriquecimiento.

## Introducción

Los lodos residuales son generados en las etapas de sedimentación primaria, secundaria y terciaria de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y su disposición, representa 60% de los costos del presupuesto anual de operación y mantenimiento de la PTAR (Cacho Rivero y Suidan, 2006). En México más de 90% de los lodos residuales no son tratados, lo que implica que alrededor de 3,195 t peso seco/d de lodos residuales sin tratamiento se devuelven al alcantarillado y a las corrientes de agua, lo que representa, sin lugar a duda, un problema ambiental y de salud pública (Vigueras, 2011).



La estabilización de los lodos residuales se realiza principalmente por digestión anaerobia con producción de metano y bióxido de carbono. Sin embargo, esta tecnología está siendo actualmente cuestionada, debido a que el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> son gases de efecto invernadero. Aunque en países desarrollados el metano es aprovechado para generar energía calorífica y eléctrica, que es utilizada para cubrir los requerimientos energéticos de la PTAR; en países no desarrollados, el metano es quemado en las antorchas de las PTAR y en muchos casos el biogás producido es venteado a la atmósfera sin tratamiento.

Una transformación tecnológica que se ha explorado en los últimos años es la estabilización de lodos residuales con producción de hidrógeno (Cooney y col., 2007, Ting y Lee, 2007), ya que el hidrógeno es considerado un combustible amigable con el ambiente, porque su combustión genera emisiones libres de carbono, sulfuro y NO<sub>x</sub>, además, tiene un rendimiento energético de 120 kJ.g<sup>-1</sup>, lo que representa una capacidad 2.75 veces mayor que la de los carburantes fósiles (Das y col., 2007).

Todas estas bondades están provocando que se destinen cada vez más recursos financieros y humanos en la adaptación, desarrollo e investigación de tecnología que permita la estabilización de lodos residuales con producción de hidrógeno como combustible sustituto del metano.

La digestión anaerobia de lodos residuales es un proceso complejo, debido a que suceden una serie de reacciones interconectadas que son controladas por diferentes grupos microbianos que crecen a velocidades distintas, y los productos intermediarios de algunos grupos microbianos inhiben el consumo de otros productos intermediarios. Así que optimizar el proceso es un trabajo de ingeniería arduo, que implica altos costos de investigación.

Por este motivo, los estudios de producción de hidrógeno por digestión anaerobia han empezado a realizarse con simulación en computadora. La simulación es una herramienta con un costo relativamente bajo, que permite

describir el comportamiento de procesos bioquímicos a través de modelos matemáticos. La simulación de procesos a nivel mundial se ha desenvuelto a pasos agigantados, principalmente debido a computadoras con procesadores de mayor velocidad, a interfaces gráficas que facilitan el manejo de gráficos, al almacenamiento de gran cantidad de datos, la aplicación de lenguajes de programación estructurados que facilitan que con pocas sentencias se realicen de forma más eficiente las soluciones de sistemas de ecuaciones (García y col., 2008).

El ADM1 es un modelo matemático para la digestión anaerobia que fue desarrollado con la intención de generalizar el uso de simuladores para el estudio de la anaerobiosis. El modelo se implementa con ecuaciones diferenciales y algebraicas, donde existen 26 variables de concentración en estado dinámico, y ocho variables implícitas por reactor o elemento de reactor.

El objetivo de este trabajo es simular la producción de hidrógeno durante la estabilización de lodos residuales secundarios, con la intención de generar estrategias de arranque y operación de los digestores anaerobios de LRS.

## **El hidrógeno, la electrólisis del agua, y los procesos biológicos**

Dentro de los procesos de producción biológica de hidrógeno, la fotofermentación y la fermentación son los económicamente factibles (Levin y col., 2004). Los procesos de fotofermentación son llevados a cabo por microorganismos fotosintéticos, tales como algas y cianobacterias, los cuales producen el hidrógeno desde ácidos orgánicos y agua, utilizando la luz solar. Estos procesos pueden ser considerados como los más económicos, pero sólo operan durante el día. Además, la producción de oxígeno durante el proceso puede hacer decrecer la eficiencia de producción de hidrógeno (Kim y col., 2004). Por el contrario, la fermentación, llevada a cabo por microorganismos anaerobios, produce altos niveles de hidrógeno y su realización es independiente de la luz solar (Chen y col., 2005, Kotay y Das 2007).

La aportación de nuevas investigaciones y avances para viabilizar la producción de hidrógeno en la matriz energética mundial ha revelado que la biomasa es una de las fuentes más antiguas y prometedoras como fuente de energía, ésta incluye a los desechos orgánicos de origen animal, residuos agrícolas e industriales y aguas y lodos residuales que podrían ser utilizados para la generación de biocombustibles (Antonopoulou y col., 2008).

## **Metodología**

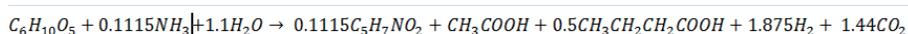
En la simulación del proceso se utilizó el modelo matemático para la digestión anaerobia, ADM1 (Bastone y col. 2002). Al modelo se le adicionaron las ecuaciones correspondientes para integrar al *Clostridium* como grupo microbiano generador de hidrógeno.

El modelo ADM1 es resuelto con el programa de computadora Polymath 5.1, que utiliza el algoritmo Runge Kutta 4. Las variables del modelo se agruparon en variables de rendimiento, de velocidad de crecimiento microbiano y de consumo de sustrato. Los valores iniciales de las variables de rendimiento fueron obtenidos a partir de la estequiometría de la reacción y se determinaron las fracciones másicas de rendimiento producto/sustrato y biomasa/sustrato. Para las variables de velocidad, se utilizaron los valores propuestos en el reporte del grupo de trabajo del modelo ADM1 de la IWA. Las variables para

*Clostridium* fueron calculadas a partir de los resultados publicados en trabajos de investigación previos, en donde, este microorganismo es utilizado para la producción de hidrógeno a partir de diferentes sustratos y condiciones de operación (Mu y col., 2006).

## Resultados

Según los resultados publicados por Zhagz y col. (2006), las bacterias hidrogénicas pueden lograr hasta un 72% de consumo de azúcares, en condiciones ambientales similares a las que existen en la DA de LRS. Este hecho significa que el enriquecimiento del inóculo anaerobio con bacterias productoras de hidrógeno, como por ejemplo *Clostridium*, podría favorecer el consumo de azúcar soluble con producción de hidrógeno. Para simular este evento, se requiere conocer la estequiometría de la reacción y los parámetros cinéticos asociados al crecimiento de *Clostridium*. La reacción estequiométrica puede ser representada por la ecuación 1.



Ec. 1

A partir de esta expresión, se calculan los rendimientos máxicos de la hidrólisis de azúcares por *Clostridium*, Tabla 1.

Costante	Descripción	Valor	Unidades
$Y_{suH}$	Rendimiento máxico	0.0777	$g X_{clos} g^{-1} su$
$F_{acsuH_2}$	acetato a partir de azúcares para la obtención de hidrógeno	0.3703	$g ac g^{-1} su$
$F_{busuH_2}$	butirato a partir de azúcares para la obtención de hidrógeno	0.2716	$g bu g^{-1} su$
$F_{H_2su}$	hidrógeno por azúcares	0.0231	$g H_2 g^{-1} su$
$F_{icsuH_2}$	CO <sub>2</sub> a partir de azúcares para la obtención de hidrógeno	0.391	$g CO_2 g^{-1} su$

**Tabla 1**

Relación producto sustrato para la hidrólisis de azúcares solubles por *Clostridium sp.*

Para evaluar el consumo de azucares por *Clostridium sp.*, se utiliza la Ecuación 2.

$$\frac{d(Ssu)}{d(t)} = (D(Ssuo - Ssu)) + (k_{hyd} * X_{ch}) + ((1 - F_{fali}) * k_{hyd} * X_{li}) - \left( \left( k_{msu} \left( \frac{Ssu}{K_{ssu} + Ssu} \right) X_{su} * I_1 \right) - \left( \left( k_{msuH} \left( \frac{Ssu}{K_{ssuH} + Ssu} \right) X_{clos} * I_{1H} \right) \right) \right)$$

Ec. 2

en donde  $K_{msuH}$  es la velocidad máxima de consumo de azúcar soluble por *Clostridium sp* en  $g^{-1}X_{clos} d^{-1}$ ,  $K_{ssuH}$  es la constante de saturación para

azúcar soluble, debido a *Clostridium sp*, I1H es el factor de inhibición debido a cambios de pH y concentración de amoníaco, para *Clostridium sp*. Con el fin de conseguir los valores de  $K_{msuH}$  y  $K_{ssuH}$  se utilizaron los datos publicados por Mu y col., (2006), ellos obtienen la pendiente y ordenada al origen del inverso de la velocidad de consumo de glucosa, contra el inverso de la concentración de glucosa inicial, para un inóculo anaerobio enriquecido con bacterias hidrogénicas.

$$\frac{1}{V} = 48.3 \frac{1}{S} + 3.58$$

La pendiente representa el cociente de  $K_{ssuH}/K_{msuH}$  y la ordenada al origen representa  $1/K_{msuH}$ , por lo tanto, los valores utilizados en la simulación son  $K_{msuH} = 6.7 \text{ gSu g}^{-1} \text{ Xclos d}^{-1}$  y  $K_{ssuH} = 13.5 \text{ g. su L}^{-1}$

El crecimiento de *Clostridium sp* ( $X_{clos}$ ) es simulado utilizando la ecuación (3)

$$\frac{d(X_{clos})}{d(t)} = (D(X_{clos0} - X_{clos})) + \left( (Y_{suH} * k_{msuH}) * \left( \left( \frac{Ssu}{(K_{ssuH} + Ssu)} \right) X_{clos} * I1H \right) \right)$$

Ec. 3

En donde  $X_{clos0}$  es la concentración inicial de *Clostridium sp* en g.L-1,  $Y_{suH}$  es el rendimiento biomasa sustrato para *Clostridium sp* en  $\text{g}_{X_{clos}} \text{ g}^{-1} \text{ su}$ . Los productos de la hidrólisis de azúcares por *Clostridium sp* son acetato, butirato, bióxido de carbono e hidrógeno, este último se simula utilizando las ecuaciones 4, 5, 6 y 7

$$\frac{d(SH_2)}{d(t)} = (D(SH_{20} - SH_2)) + (FH_{su} * k_{msuH} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssuH} + Ssu)} \right) * X_{clos} * I1H)$$

Ec. 4

$$\frac{d(Sbu)}{d(t)} = (D(Sbu_0 - Sbu)) + \left( F_{busu} * k_{msu} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssu} + Ssu)} \right) * X_{su} * I1 \right) + \left( F_{busuH2} * k_{msuH} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssuH} + Ssu)} \right) * X_{clos} * I1H \right)$$

Ec. 5

$$\frac{d(Sac)}{d(t)} = (D(Sac_0 - Sac)) + \left( F_{acsu} * k_{msu} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssu} + Ssu)} \right) * X_{su} * I1 \right) + \left( F_{acsuH2} * k_{msuH} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssuH} + Ssu)} \right) * X_{clos} * I1H \right)$$

$$\frac{d(Sic)}{d(t)} = (D(Sic_0 - Sic)) + \left( F_{icsu} * k_{msu} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssu} + Ssu)} \right) * X_{su} * I1 \right)$$

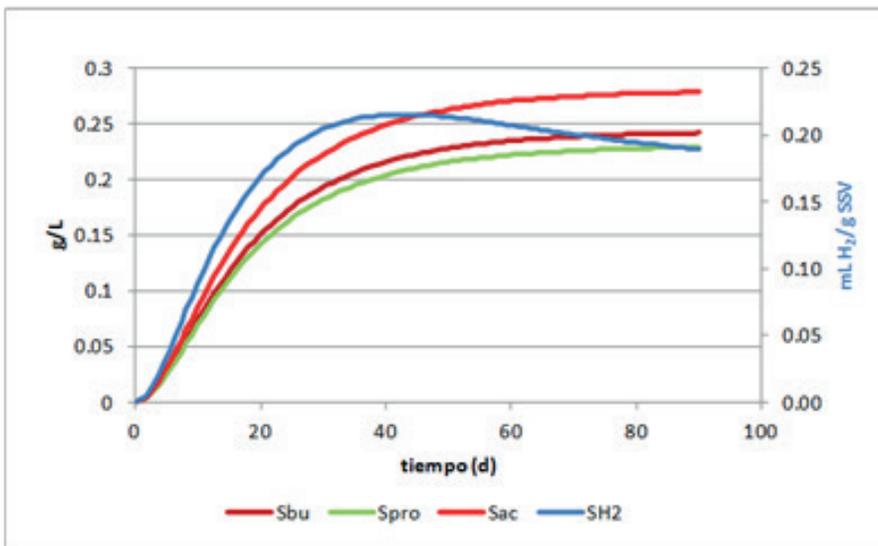
Ec. 6

$$\left( F_{icsuH} * k_{msuH} * \left( \frac{Ssu}{(K_{ssuH} + Ssu)} \right) * X_{clos} * I1H \right)$$

Ec. 7

En donde:  $S_{H_2O}$  y  $S_{H_2}$  es la concentración de oxígeno soluble ( $g.L^{-1}$ ) a la entrada y la salida respectivamente.

La Figura 1 muestra la simulación para el consumo de azúcares, incluyendo los dos grupos microbianos consumidores de éstos: los fermentadores ( $X_{Su0} = 0.0285 g.L^{-1}$ ) y las fermentadoras hidrogénicas ( $X_{Closo} = 0.12 g.L^{-1}$ ). La simulación se realiza a 90 días de operación con un TRH de 30 días y con inhibición de la metanogénesis. En la gráfica se observa que la concentración de  $H_2$  alcanza su máximo valor a los 43 días de iniciado el proceso, este valor  $0.215 mL H_2.g SSV^{-1}$  (como lodo crudo) se encuentra en el orden de magnitud del reportado por Xiao y col. (2009), cuando utilizan lodos residuales crudos como sustrato e inóculo ( $0.25 mL H_2.g^{-1} SSV$ ). Sin embargo, este valor es 100 órdenes de magnitud menor al reportado para fermentación de azúcares con producción de hidrógeno (Fang y col., 2002, Chen y col., 2006)

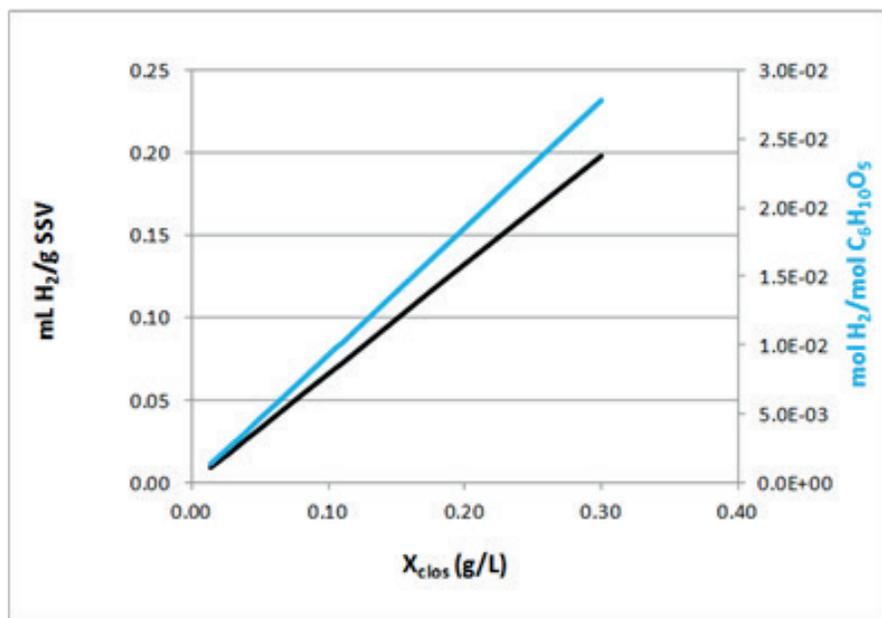


**Figura 1**

Simulación de la hidrólisis de azúcares en la DA de LRS para un inóculo enriquecido con *Clostridium sp.*



Una de las estrategias para el enriquecimiento del cultivo es inocular el reactor con bacterias hidrogénicas. En la Figura 2 se muestra la simulación de un cultivo enriquecido con *Clostridium sp.* con diferente concentración inicial de éste y con una concentración inicial de bacterias fermentadoras  $X_{su}$  de 0.0285g.L-1, estas bacterias están presentes en los consorcios utilizados para la DA de LRS.



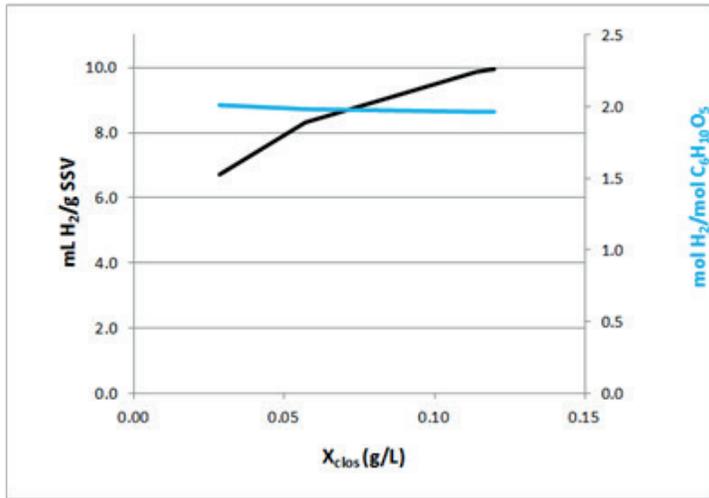
**Figura 2**

Producción molar de hidrógeno con diferentes concentraciones iniciales de *Clostridium sp.*

Se observa que la producción de hidrógeno aumenta al incrementarse la concentración de *Clostridium sp.*, sin embargo, los valores de producción no tienen un incremento significativo, ya que el rendimiento de producción molar de hidrógeno por mol de sustrato es 100 veces menor que el estequiométrico (reportado entre 2 y 4 mol H<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> sustrato). Aparentemente el problema aquí no está relacionado al consumo de sustrato, ya que el rendimiento de consumo de azúcar en la simulación es mayor a 99%, lo que implica que los azúcares se transforman principalmente a ácidos grasos volátiles sin producción de hidrógeno.

Otra estrategia para enriquecer los digestores anaerobios de lodos residuales para la producción de hidrógeno es la inhibición de los grupos microbianos presentes en los consorcios para la estabilización de lodos residuales y la promoción de las bacterias productoras de hidrógeno. Esto se logra utilizando varias técnicas, las dos más utilizadas son: tratamiento del lodo a bajos valores de pH (< 3.0) y aumento de la temperatura (>90 °C). En estas técnicas se aprovecha que bacterias como *Clostridium sp.* pueden formar endoesporas, y se utiliza como criterio de selección, ya que las endoesporas tienen estructuras de pared más complejas, en comparación con las células vegetativas, lo que las hace resistentes al calor, a bajos porcentajes de humedad, radiación, ácidos y desinfectantes químicos.

En la Figura 3 se muestra la simulación utilizando lodo residual tratado enriquecido con *Clostridium sp.* En este proceso se asume que las bacterias fermentadoras ( $X_{su}$ ) han sido eliminadas del LRS. Se observa que el rendimiento molar de producción de hidrógeno aumenta considerablemente en comparación del proceso en donde están presentes las  $X_{su}$ .

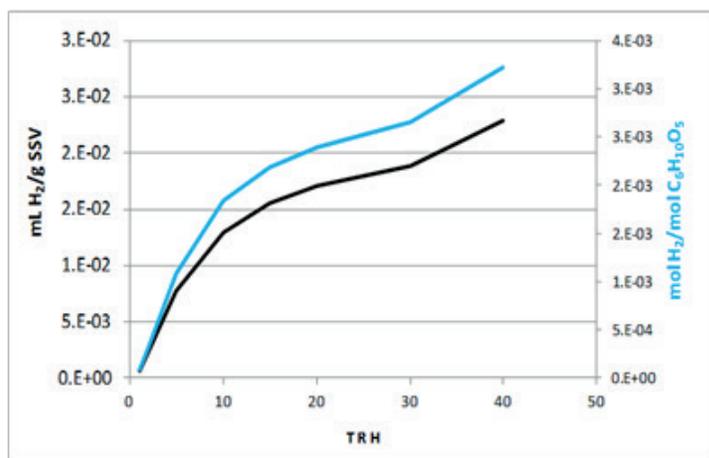


**Figura 3**

Simulación de la producción de hidrógeno en la DA de LRS con diferentes concentraciones de inóculo enriquecido con *Clostridium sp.*, sin bacterias fermentadoras ( $X_{su}$ )

En este proceso, se logran rendimientos en el orden de magnitud reportado en varios estudios. El valor en la simulación es de alrededor de 2 mol H<sub>2</sub>.mol<sup>-1</sup> azúcar. La producción volumétrica de hidrógeno también se incrementa hasta 10 mL H<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> SSV; este valor está en el orden de magnitud reportado por Xiao y col. (2009) cuando utiliza lodo esterilizado como inóculo y sustrato (11.77 mL H<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> SSV), y por el encontrado por Cheng y col. (2002) cuando utiliza lodo tratado térmicamente (11.54 mL H<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup> SSV).

El tiempo de retención es un parámetro de operación que influye en la eficiencia de la digestión anaerobia de lodos residuales secundarios; en la Figura 4, se observa su efecto en la producción de hidrógeno en presencia de bacterias fermentadoras ( $X_{su0} = 0.0285$  g.L<sup>-1</sup>) y *Clostridium sp.* ( $X_{clos0} = 0.285$  g.L<sup>-1</sup>), donde que el tiempo de retención, bajo esta circunstancia, no provoca cambios significativos en los rendimientos molares de producción de hidrógeno, es decir, la bacterias fermentadoras son quienes consumen en mayor proporción el azúcar presente.



**Figura 4**

Simulación de la producción de hidrógeno en la DA de LRS a diferentes tiempos de retención hidráulica con concentraciones iniciales de  $X_{su}$  y  $X_{clos}$  iguales (0.0285 g L<sup>-1</sup>)

La Figura 5 muestra la simulación a diferentes tiempos de retención hidráulica sin presencia de bacterias fermentadoras ( $X_{su}$ ) y con una concentración inicial de  $X_{clos} = 0.0285$  g.L<sup>-1</sup>. Se observa que a tiempos de retención hidráulica

## Referencias

1. Valdez-Vázquez I, Poggi Varaldo H M. Hydrogen production by fermentative consortia. *Renewable and sustainable energy reviews*; 2009; 13; 1000-1013.
2. Levin D., Slam R., Cicek N., Sparling R. 2006. Hydrogen production by *Clostridium thermocellum* 27405 from cellulosic biomass substrate. *International Journal of Hydrogen Energy*. 31: 1496-1503.
3. Kim, S.H., Han, S.K., Shin, H.S., 2004. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *Int. J. Hydrogen Energy* 29, 1607-1616.
4. Chen DY, Hansen CL (2006). Acidogenesis characteristics of natural, mixed anaerobes converting carbohydrate-rich synthetic wastewater to hydrogen. *Process Biochem* 41(8):1736-17455.
5. Kotay Shireen Meher, Das Debabrata. 2007. Microbial hydrogen production with *Bacillus coagulans* IIT-B T S1 isolated from anaerobic sewage sludge. *Bioresource Technology*. 1183-1190.
6. Antonopoulou G., Gavala H. N., Skiadas I. V., Angelopoulos K., Lyberatos G., 2008. Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass. *Bioresour Technol*. 99; 110-119.
7. Cacho Rivero J. A., Suidan M.T. (2006) Effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dose on the thermo-oxidative co-treatment with Anaerobic digestion of excess municipal sludge. *Water Science & Technology* 54, (2), 253-259
8. Viguera S.E., Ramírez F., Noyola A., Monroy O. 2011. Effect of thermal pretreatment on the anaerobic digestion of wasted activated sludge. *Water Science & Technology* 64 (4) 953-959
9. Cooney M., Nathan M., Cannizzaro C., Benemann J. 2007. Two-phase anaerobic digestion for production of hydrogen-methane mixtures. *Bioresource Technology* 98 (2007) 2641-2651
10. Ting C., Lee D. 2007. Production of hydrogen and methane from wastewater sludge using anaerobic fermentation. *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 677-682
11. García G. Juan Manuel, Ibarra Castro Pablo, Félix Flores Ma. Guadalupe, Ríos Moreno Gustavo. 2008. La simulación de procesos en ingeniería química. *Revista Investigación Científica*. 4: No. 2, Nueva época.
12. Bastone D. J., Keller J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi S., Pavlostathis S. G., Rozzi A., Sanders W. T., Siegrist H., Vavilin V.A. 2002. Anaerobic Digestion Model No. 1. International Water Association (IWA) Publisher, London. 77 p
13. Mu S. J., Zeng Y., Wu P., Lou S. J., Tartakovsky B. 2006. Anaerobic digestion model no. 1-based distributed parameter model of an anaerobic reactor: 1. Model development. *Bioresource Technology* 99: 3665-3675.
14. Fang, H.H.P. y Liu, H. (2002). Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. *Bioresource Technology*, 82 (1), 87-93.

mayores a 20 d tiene rendimientos molares de producción de hidrógeno mayores a 1.5 mol H<sub>2</sub> mol<sup>-1</sup> azúcar. A tiempos menores, los rendimientos bajan, debido principalmente a la disminución de la concentración de azúcar, provocado por la disminución en la hidrólisis de SSV; la eficiencia de remoción de SSV es de 54% a 30 días de tiempo de retención y 3% para un día de tiempo de retención.

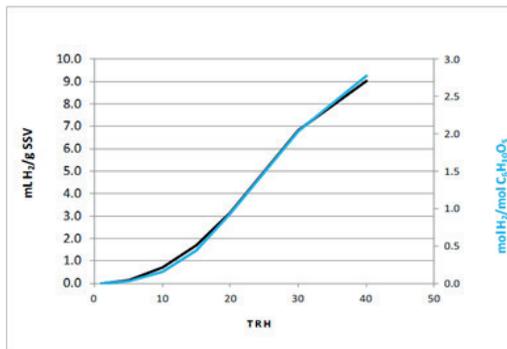


Figura 5

Simulación de la producción de hidrógeno en la DA de LRS a diferentes tiempos de retención hidráulica sin Xsu y con XClo de 0.0285 g.L<sup>-1</sup>

La Figura 6 muestra la simulación para la DA de LRS. La simulación se realiza a 90 días de operación con un TRH de 30 días, con Xcloso = 0.12 g.L<sup>-1</sup> y Xsuo = 0. Aquí se simula la hidrólisis con acumulación de AGV, es decir, no se incluye acetogénesis ni metanogénesis. La productividad aumenta de 22 mL H<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup>SSV a 65 mL H<sub>2</sub>.g<sup>-1</sup>SSV.

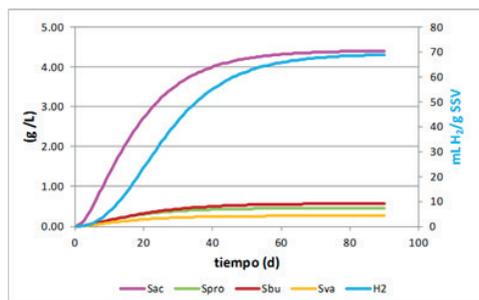


Figura 6

Simulación de DA de LRS, con enriquecimiento de *Clostridium sp.* e inhibición de bacterias fermentadoras de azúcares y metanogénesis.

## Conclusión

La simulación de la producción de hidrógeno permitió definir que el enriquecimiento hidrogénico de un reactor anaerobio para la estabilización de lodos residuales secundarios, debe estar acompañado de la eliminación de las bacterias fermentadoras de azúcares y las metanogénicas hidrogenotróficas y acetoclastas. La inhibición de los grupos metanogénicos y fermentadores se logra si los lodos residuales son sometidos a pretratamientos mecánicos, químicos o térmicos.



# El Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec

Te invita a participar en los:



# Cursos y Diplomados

## de Educación Continua

### PARA INICIAR EN NOVIEMBRE-DICIEMBRE 2012

- Manejo Básico de Excel.
- C#.Net.
- Mantenimiento a PC Avanzado.
- AutoCAD Avanzado.
- Asp.Net.
- Manejo Inteligente de Excel.
- Álgebra.
- Programación en C++.
- Introducción a la Administración Profesional de Proyectos.
- Micro Controladores Pic's.
- Calculo Diferencial e Integral.
- Solid Works Básico.
- Programación Web con PHP y MySQL.
- Informática Fiscal 2012.

### OTRAS OPCIONES

- Autocad Básico.
- Fundamentos de Seguridad en Redes.
- Seis Sigma.
- Core Tools.
- Oracle.
- Mantenimiento a PC Básico.
- SQL Server Básico y Avanzado.
- Análisis de Tráfico de Redes.
- Lean Manufacturing.
- Seguridad e Higiene Industrial.
- Visual Basic.Net.
- Mando por PLC' S-7.
- Planeación Avanzada de la Calidad APQP.
- Paquetes Contables.
- Curso Básico de Computación
  
- Diplomado en Java
- Diplomado en Redes Lan y Wan.

Cursos y diplomados sujetos a demanda; nos reservamos el derecho de reprogramación o cancelación.

◆ **Armamos cursos a la medida de tus necesidades** ◆

**Informes e Inscripciones:**  
CENTRO DE  
EDUCACIÓN CONTINUA  
5000-2364 y 5000 2365  
e-mail:  
educontese@gmail.com

**Horario de atención:**  
Lunes a viernes  
de 9:00 a 15:00 horas y  
de 16:00 a 18:00 horas.  
Sabados de  
10:00 a 13:00 horas.

**Dirección:**  
Av. Tecnológico s/n  
Col. Valle de Anáhuac,  
Ecatepec de Morelos,  
Estado de México.  
(entre las estaciones Múzquiz y  
Ecatepec de la Línea B del Metro)

**ATENCIÓN**  
Si tienes experiencia como  
instructor y te interesa  
participar con nosotros,  
**!!! CONTACTANOS !!!**



GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO





GOBIERNO DEL  
ESTADO DE MÉXICO



GOBIERNO QUE TRABAJA Y LOGRA  
**enGRANDE**

