

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en
Electroquímica, S.C.



Efluentes de la industria nixtamalera como
sustrato en celdas electroquímicas
microbianas

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

EN LA ESPECIALIDAD DE

INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTA

ISA. YESSICA MANUELA MALDONADO



PEDRO ESCOBEDO, QRO. MARZO 2018



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Subdirectora de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la alumna YESSICA MANUELA MALDONADO una vez leída y revisada la Tesis: “Efluentes de la industria nixtamalera como sustrato en celdas electroquímicas microbianas”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología con la opción terminal en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente a los 2 días del mes de marzo del año dos mil dieciocho.

Dra. María Yolanda Reyes Vidal

Dra. Nancy Velasco Álvarez

Dr. Ángel Aceves Díez

Dr. Francisco Javier Bécame Valenzuela



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Dra. Erika Bustos Bustos
Coordinadora de Estudios de Posgrado
PICYT – CIDETEQ
Querétaro

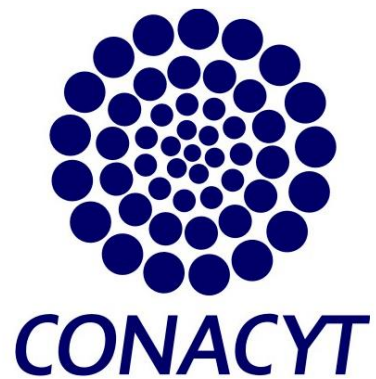
Los abajo firmantes, miembros del Jurado de Examen de la alumna YESSICA MANUELA MALDONADO una vez leída y revisada la Tesis: “Efluentes de la industria nixtamalera como sustrato en celdas electroquímicas microbianas”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por la alumna para aspirar al grado de Maestra en Ciencia y Tecnología con la opción terminal en INGENIERIA AMBIENTAL durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmó la presente a los 2 días del mes de marzo del año dos mil dieciocho.

Dr. Fabricio Espejel Ayala
Presidente

Dr. Ángel Aceves Díez
Secretario

Dra. Lidia Victoria González Gutiérrez
Vocal



Este trabajo fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (CIDETEQ), bajo la dirección de la Dra. María Yolanda Reyes Vidal.

AGRADECIMIENTOS

**Al proyecto No. 246052 del Fondo CONACYT-SENER-
Sustentabilidad Energética**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindarme salud y permitirme llegar a la terminación de la maestría.

A mi madre, abuelita y hermana, por estar conmigo a pesar de la distancia y luchar esta batalla juntas hasta el final y a mi esposo por su amor, apoyo y comprensión en todo momento.

A mi asesora la Dra. Yolanda Reyes Vidal por su apoyo, paciencia, consejos y el conocimiento adquirido en el periodo del postgrado.

A mis amigos y compañeros de posgrado por su amistad y por los conocimientos compartidos durante esta etapa.

A la Dra. Bibiana Cercado Quezada y al Dr. Angel Emilio Aceves Diez, por sus asesorías y enseñanzas durante la realización del proyecto.

A CIDETEQ por sus instalaciones, laboratorios y equipos que estuvieron a mi disposición en todo momento.

A Conacyt por la beca de maestría otorgada No. 665098 y al proyecto 258159 del Fondo SEP-CONACYT-Ciencia Básica.

DEDICATORIA

A mi tío Raúl Maldonado Soto que fue mi padre en vida y que siempre me empujó a salir adelante en mis estudios y a pesar de que ya no pudo estar presente para verme crecer profesionalmente, en cada paso, en cada triunfo, en cada éxito, en cada meta y sueño realizado estaba y estará presente en mi mente y en mi corazón.

A mi gran amiga Celia Rubio Barraza, porque la realización de esta meta la compartíamos juntas y desde el cielo me acompañó en cada paso día a día y la lucha y entereza que siempre tenía hacia la vida para salir adelante fueron mi motor para iniciar y concluir esta meta por las dos.

A mis abuelitos,

A mi madre,

A mi hermana,

A mi esposo.

Resumen

México enfrenta serios problemas ambientales debido al mínimo tratamiento de los residuos que producen los diversos procesos industriales. Este es el caso de los efluentes provenientes de la industria alimenticia que contienen altos niveles de material orgánico que pueden usarse como sustrato para procesos biotecnológicos. Específicamente, la industria del maíz genera grandes cantidades de aguas residuales durante el proceso de nixtamalización, del cual surge el nejayote. Este fluente tiene características contaminantes porque rebasa los límites máximos permisibles de las normas mexicanas como son altos valores de demanda química de oxígeno (DQO). Por lo cual es necesario encontrar alternativas para tratarlo de manera eficiente. Actualmente, se están desarrollando nuevas tecnologías como las celdas electroquímicas microbianas que utilizan microorganismos para catalizar la conversión de energía química presente en un sustrato hasta energía eléctrica, así como tratamiento de los efluentes mediante disminución de la DQO.

En este trabajo se evaluó el uso del nejayote como sustrato en celdas electroquímicas microbianas, en configuración de una sola cámara y tres electrodos, conectadas a un potencióstato/galvanostato, realizando ensayos con efluentes de procesos artesanales e industriales de la industria del maíz. Las condiciones evaluadas fueron nejayote crudo de molienda tradicional y en diluciones 1:1, 1:3 y 1:10 con buffer de fosfatos, así como nejayote industrial tratado previamente mediante un proceso de ultrafiltración.

Los valores máximos de densidades de corriente obtenidos fueron de 32 mA/m² usando nejayote en la condición 1:3, que aumentó hasta 59 mA/m² en experimentos con sustrato diluido (1:1) pero adicionando células de *Pseudomonas aeruginosa*, previamente cultivadas. Para estas mismas condiciones se obtuvieron disminuciones de DQO de hasta 84% y 51%, respectivamente. También se evaluaron otros parámetros fisicoquímicos como pH, conductividad y sólidos totales, al inicio y final de cada experimento. Así, de acuerdo con los resultados de este trabajo, la adición de células de *P. aeruginosa* incrementa la producción de densidad de corriente, aunado a la capacidad del microbioma para tolerar el pH alcalino del nejayote. Al usar fracciones del nejayote tratado mediante un proceso de ultrafiltración, se obtuvieron valores de densidad de corriente de 59 mA/m² para el NFilt+C y de 52 mA/m²

para el NRech+C, sin embargo, la diferencia en remoción de DQO fue importante para ambas fracciones, alcanzándose 59% para el NFilt+C y tan solo 13% para el NRech+C.

Las células de *P. aeruginosa* cultivadas fueron aisladas de los experimentos iniciales donde se observaron cambios en la coloración (amarilla a verde) de los medios de cultivo con sustrato (nejayote añadido). Las células aisladas fueron identificadas mediante análisis del 16S ARNr, presentando similitud y cobertura del 100% con *Pseudomonas aeruginosa* US25 (KX810823).

Estos resultados demuestran la viabilidad del uso de los efluentes de la industria del maíz como sustrato en celdas electroquímicas microbianas para la generación de bioenergía y al mismo tiempo, el tratamiento del efluente.

Abstract

Mexico have severe environmental problems due to minimal treatment of waste produced by many industrial processes. For example, wastewaters from food industry that contain high levels of organic material that can be used as substrate for biotechnological processes. Specifically, the corn industry generates high volume of wastewater during the process of nixtamalization. This effluent is named like “nejayote” and is an effluent with contaminating characteristics, because it exceeds the maximum permissible limits of mexican standards, such as high values of chemical oxygen demand (COD). Therefore, it is necessary to find alternatives to treat it efficiently. New technologies are currently being developed, such as microbial electrochemical cells that use microorganisms to catalyze the conversion of chemical energy present in a substrate to bioelectricity, as well as the treatment of wastewaters through the reduction of COD.

In this work, we evaluated the use of nejayote as a substrate in microbial electrochemical cells, in the configuration of a single chamber and three electrodes, connected to a potentiostat/galvanostat, performing tests with effluents from traditional and industrial processes of the corn industry. The conditions evaluated were nejayote crude of traditional process and dilutions 1: 1, 1: 3 and 1:10 with phosphate buffer, as well as, industrial nejayote previously treated by an ultrafiltration method.

The maximum values of current densities obtained were 32 mA/m² using nejayote in condition 1:3, which increased to 59 mA/m² in experiments with diluted substrate (1: 1) but with *Pseudomonas aeruginosa* cells added, previously cultivated. Reductions in chemical oxygen demand (COD) values were 84% and 51%, respectively. Other physicochemical parameters such as pH, conductivity and total solids were evaluated at initial and final of each experiment. Thus, according to the results of this work, the addition of *Pseudomonas aeruginosa* cells increases the production of current density, together with the capacity of the microbiome to tolerate alkaline pH of nejayote. Experiments with nejayote fractions treated by an ultrafiltration process had current density values of 59 mA/m² for NFilt+C and 52 mA/m² for NRech+C, however, the difference in COD removal it was important for both fractions, reaching 59% for NFilt+C and 13% for the NRech+C.

Pseudomonas aeruginosa was isolated from the initial experiments where changes in the coloration (yellow to green) of the culture media with substrate (nejayote added) were observed. The isolated cells were identified by 16S rRNA analysis, showing similarity and 100% coverage with *Pseudomonas aeruginosa* US25 (KX810823).

These results demonstrate the feasibility of using effluents from the corn industry as a substrate in microbial electrochemical cells for the generation of bioenergy and treatment of wastewater, at same time.

INDICE

1- ANTECEDENTES.....	1
Problemática ambiental.....	1
Efluentes de la industria de la nixtamalización.....	2
Nejayote.....	3
Tratamiento del nejayote.....	5
2- Tecnologías alternativas para el tratamiento de efluentes.....	8
Celdas de combustible microbianas.....	9
Importancia del sustrato y microorganismos en CEM.....	11
3- Justificación.....	17
4- Hipótesis.....	17
5- Objetivo General.....	18
Objetivos particulares.....	18
6- Materiales y Métodos.....	19
6.1- Sustratos.....	19
6.2- Caracterización fisicoquímica.....	19
<i>Sólidos totales</i>	19
<i>Sólidos suspendidos totales</i>	20
<i>Sólidos disueltos</i>	20
pH.....	20
Conductividad.....	20
Demanda química de oxígeno.....	20
6.3 Configuración e instalación de la CEM.....	21
6.4 Condiciones del uso de nejayote como sustrato y fuente de inóculo en CEM.....	23
6.5 Identificación molecular de aislados en el nejayote.....	25
7- Resultados y Discusión.....	27
7.1- Uso de efluentes de la industria nixtamalera (nejayote) en CEM como sustrato crudo y diluido.....	27

7.1.1 Evaluación de los parámetros fisicoquímicos en sustrato crudo y diluido.....	30
7.1.2 Análisis de generación de corriente en sustrato crudo y diluciones.....	33
7.2- Uso de efluentes de la industria nixtamalera en CEM como sustrato y adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>.....	35
7.2.1 Evaluación de parámetros fisicoquímicos de sustrato y adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	36
7.2.2 Análisis de generación de corriente de sustrato y adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	39
7.2.3 Evaluación de CEM con mayor concentración de células.....	40
7.2.4 Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del sustrato con mayor concentración de células.....	43
7.2.5 Análisis de generación de corriente del sustrato con mayor concentración de células..	46
7.3 Análisis de fracciones de efluentes de la industria nixtamalera usadas como sustrato en CEM con adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>.....	46
7.3.1 Evaluación de los parámetros fisicoquímicos en las fracciones como sustrato con adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	50
7.3.2 Análisis de sustrato en CEM de 400 ml.....	53
7.3.3 Evaluación de los parámetros fisicoquímicos del sustrato con mayor volumen (400 ml).....	54
7.3.4 Análisis de la generación de corriente en las fracciones del sustrato con mayor volumen (400 ml).....	57
8- Conclusiones.....	60
9- Recomendaciones.....	61
10- Bibliografía.....	62

INDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
Figura 1. Proceso de nixtamalización (Modificado de Rodríguez, 2013).	3
Figura 2. Celda de combustible microbiana de una sola cámara y tres electrodos.	9
Figura 3. Detalles principales de una celda electroquímica microbiana de doble cámara. Modificada a partir de Du y col. (2007).	10
Figura 4. Componentes que integran las CEM usadas en este trabajo. Celdas con configuración de una cámara y tres electrodos.	21
Figura 5. Esquema de los electrodos usados en las CEM. A) Electrodo de trabajo (ánodo) y B) contraelectrodo (cátodo).	22
Figura 6. Arreglo y conexión de los electrodos usados en las CEM.	22
Figura 7. Distribución experimental de las celdas electroquímicas microbianas conectadas a un potencióstato y mantenidas en condiciones ambientales constantes de $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.	22
Figura 8. Proceso de ultrafiltración del nejayote industrial (Asaff-Torres y Reyes-Vidal, 2014).	25
Figura 9. Valores de densidad de corriente obtenidos en CEM, (NCrudo=nejayote crudo, 1:10= dilución 1:10, 1:1= dilución 1:1, 1:3= dilución 1:3).	28
Figura 10. Evaluación y comparación de los parámetros fisicoquímicos en las condiciones de sustrato crudo y diluido; a) pH, b) conductividad, c) sólidos totales y d) DQO.	30
Figura 11. Densidad de corriente usando diferentes sustratos con células adicionadas. El cultivo de células fue inoculado por asada bacteriológica (concentración 1+CP) (MLB= medio LB, N= nejayote, 1:1= dilución 1:1) con células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	36
Figura 12. Evaluación y comparación de los parámetros fisicoquímicos del sustrato y adición de células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ; a) pH, b) conductividad, c) sólidos totales y d) DQO.	38
Figura 13. Densidad de corriente usando diferentes sustratos con células adicionadas. El cultivo de células fue inoculado con 4 ml de pre-inoculo (concentración 2+C), (MLB= medio LB, 1:1= dilución 1:1, 1:3= dilución 1:3 y N= nejayote) con células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	41
Figura 14. Evaluación y comparación de los parámetros fisicoquímicos de diferentes sustratos con células adicionadas; a) pH, b) conductividad, c) sólidos totales y d) DQO.	45
Figura 15. Densidad de corriente obtenida en celdas electroquímicas microbianas usando fracciones de nejayote (Nfilt=filtrado de nejayote, NRech=rechazo de nejayote, NClaf=clarificado de nejayote) con células de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	47

- Figura 16.** Evaluación y comparación de los parámetros fisicoquímicos en el sustrato fracciones con adición de células *Pseudomonas aeruginosa*; a) pH, b) conductividad, c) DQO, d) sólidos totales y e) sólidos suspendidos totales y f) sólidos disueltos. 51
- Figura 17.** Densidad de corriente en celda electroquímicas microbianas (400 ml) usando nejayote diluido y sus fracciones obtenidas por filtración con membranas. (MLB= medio LB, NFilt=filtrado de nejayote, NRech=rechazo de nejayote, 1:3=dilución 1:3) con células de *P. aeruginosa*. 54
- Figura 18.** Evaluación y comparación de los parámetros fisicoquímicos en celdas con contenido de sustrato de 400 ml; a) pH, b) conductividad, c) DQO, d) sólidos totales, e) sólidos suspendidos totales y f) sólidos disueltos. 56
- Figura 19.** Celdas electroquímicas microbianas al inicio y al final del experimento con diferentes sustratos (volumen = 400 ml): a) Nejayote diluido (1:3), b) Medio LB+C, c) nejayote filtrado (NFilt+C), d) nejayote rechazo (NRech+C). 58

INDICE DE TABLAS

Tabla	Pág.
Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote.	5
Tabla 2. Densidad de potencia generada en diferentes CCM con agua residual (Modificado de Gude, 2016).	14
Tabla 3. Valores de parámetros fisicoquímicos evaluados en diversas condiciones de sustrato usado en celdas electroquímicas microbianas.	31
Tabla 4. Valores de parámetros fisicoquímicos determinados en celdas electroquímicas microbianas con células de <i>P. aeruginosa</i> (inoculo inicial con asada).	39
Tabla 5. Valores de parámetros fisicoquímicos determinados en celdas electroquímicas microbianas con células de <i>P. aeruginosa</i> (inoculo inicial de 4 ml de caldo precultivado).	45
Tabla 6. Valores de parámetros fisicoquímicos evaluados en las cuatro condiciones de sustrato procesado por ultrafiltración.	52
Tabla 7. Valores de diversos parámetros fisicoquímicos evaluados en las cuatro condiciones de sustrato usado en las celdas electroquímicas microbianas de 400 ml.	57

1- ANTECEDENTES

Problemática Ambiental

En la actualidad, México enfrenta una problemática ambiental debido al mínimo tratamiento aplicado a los efluentes industriales antes de su descarga. Las aguas residuales industriales presentan una gran cantidad de contaminantes que deterioran el medio ambiente, afectando el desarrollo natural de los ecosistemas por el cambio de condiciones tales como pH, olor, color, entre otras (Forero y col., 2005). Existe una gran preocupación pública por el origen y destino de las aguas residuales. Las grandes cantidades de aguas residuales generadas por las sociedades modernas son potencialmente un recurso valioso si se logra su tratamiento y reutilización. Aunque esto es un reto para diferentes sectores, de lograrse se podrá reducir la presión de uso sobre otras fuentes de agua y también ayudar a evitar la descarga directa en cuerpos de agua naturales (Chávez y col., 2011). Debido a esta creciente preocupación y a la implementación de las recientes leyes ambientales, se ha llevado a cabo una gran inversión en abastecimiento de agua y tratamiento de aguas residuales municipales (Monroy y col., 2000). En el mismo sentido, el tratamiento de las aguas residuales es una cuestión prioritaria a nivel mundial, ya que es importante disponer de agua de calidad y en cantidad suficiente, lo que permitirá una mejora del ambiente, la salud y la calidad de vida.

El inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación en cuanto a la evolución de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México informa que al concluir el año 2014 existían registradas en el país, 2,337 plantas municipales de tratamiento en operación, con una capacidad total instalada de 151,883.43 l/s, estas plantas trataban 111,253.51 l/s, equivalentes al 52.72% del agua residual generada. Sin embargo, a finales del 2015, el registro de plantas en operación aumentó a 2,477 instalaciones, con una capacidad instalada de 177,973.58 l/s y un caudal tratado de 120,902.20 l/s, lo cual significa incrementos que permitieron alcanzar una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 57.0% (CONAGUA, 2015). A pesar de esto, los volúmenes de aguas residuales generadas son altos y es necesario seguir incrementando el tratamiento de las mismas, lo anterior no se realizó debido a la insuficiente

infraestructura, los altos costos, la falta de mantenimiento y de personal capacitado, un pequeño porcentaje de las aguas residuales generadas reciben tratamiento, lo cual crea la necesidad de desarrollar tecnologías para su depuración (Romero-Aguilar y col., 2009).

Por otra parte, una consideración más se suma a esta preocupación, el agua es un recurso de vital importancia en la vida del hombre por lo que su conservación debe ser uno de los principales objetivos (García y col., 1993). Por lo anterior, en respuesta a esta creciente demanda ambiental para la conservación y descontaminación de aguas residuales de la industria se han desarrollado en los últimos años nuevas tecnologías, que consideran para su aplicación factores fundamentales como la naturaleza y las propiedades fisicoquímicas del sistema así como la factibilidad de reuso (Forero y col., 2005).

Haciendo uso de tecnologías emergentes, el desarrollo tecnológico basado en la investigación e innovación está buscando también alternativas para valorizar el contenido orgánico presente en diversos efluentes industriales. Aunque la composición de los efluentes industriales depende del tipo de industria, de manera general aquella que proviene de la industria alimenticia se caracteriza por contener altos niveles de materia orgánica que puede ser usado como sustrato para reacciones biológicas. En general, la mayoría de las aguas residuales tratadas son aquellas que contienen altos niveles de sustratos fácilmente biodegradables (Fang y col., 2001). Entre los efluentes de la industria alimenticia que genera grandes problemas de contaminación debido al alto contenido de material orgánico se encuentran los de la industria del maíz y en particular aquellos que resultan del proceso de nixtamalización, el cual es base de los métodos comerciales para obtener diversos productos a base de maíz como tortillas, totopos, tostadas, tacos, harinas (Rojas-Molina y col., 2008; Valderrama-Bravo y col., 2012) y que demanda un alto consumo de agua.

Efluentes de la Industria de la Nixtamalización

La nixtamalización es un proceso térmico-alcalino autóctono de México efectuado en América Central, el norte de Estados Unidos, parte de Europa y Asia (Valderrama-Bravo y col., 2012). El proceso consiste en cocer los granos de maíz en agua alcalina. Los granos cocidos son molidos y el producto es conocido como masa (Figura 1). La masa es secada y

molida para su expendio (Rosentrater, 2006). Las condiciones a las que se somete el maíz durante la nixtamalización son de gran importancia, ya que la temperatura y la agitación tienen un efecto significativo en la remoción de las capas superficiales del grano de maíz, la gelatinización de los almidones, así como en la adsorción del agua y el calcio (Ruiz-Gutiérrez y col., 2010). En dicho proceso, la acción del hidróxido de calcio genera dos productos: el nixtamal, que es el grano suave disponible para la elaboración de masa o productos derivados (Pflugfelder y col., 1988) y el nejayote que es el agua de cocimiento cuyas propiedades físico-químicas resultan de los componentes presentes en el maíz (Acosta-Estrada y col., 2014). El proceso de nixtamalización requiere un gran volumen de agua, aproximadamente 75 litros para procesar 50 kg de granos de maíz, lo que significa que se produce una cantidad similar de nejayote con respecto al grano procesado (Niño-Medina y col., 2009).

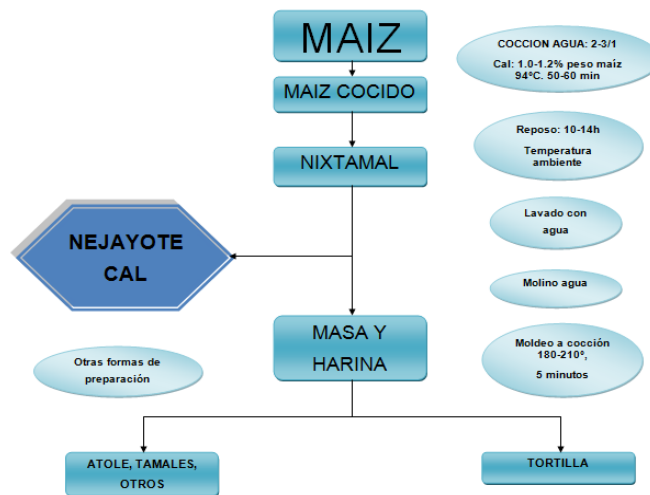


Figura 1. Proceso de nixtamalización (Modificado de Rodríguez, 2013).

Nejayote

Como ya se ha mencionado, el líquido que se obtiene después de separar los granos cocidos se conoce como nejayote (Valderrama y col., 2007). Dicho líquido, a nivel artesanal o comercial, es alcalino y contiene altas concentraciones de materia orgánica (Reyes-Vidal y col., 2012). Se estima que una planta procesadora de maíz, productora de nixtamal, con

capacidad de 600 Ton/día, puede llegar a generar entre 1,500 y 2,000 m³ de nejayote por día (Salmerón-Alcocer y col., 2003). Desde el punto de vista físicoquímico, el nejayote se compone de sólidos disueltos en suspensión y sedimentables. Al mismo tiempo, la fracción de lechada de nejayote que contiene el hidróxido de calcio residual está compuesta por partículas coloidales que lo convierten en un complejo contaminante durante su eliminación (Rao y col., 2013). Los componentes más importantes que se encuentran presentes en el nejayote son sólidos suspendidos que oscilan entre los 2350 a 5500 mg/l, carbohidratos como glucosa, xilosa y arabinosa, así como cenizas, compuestos libres y glicosilados. El resto es material soluble formado principalmente por carbohidratos de diferente longitud de cadena como son galactosa y manosa, compuestos fenólicos y sales de calcio industrial (Asaff-Torres y Reyes-Vidal, 2014). El nejayote impacta principalmente en los valores de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), excediendo por mucho la regulación ambiental mexicana establecida en la NOM-002-SEMARNAT-1996. Por esta razón se considera actualmente un contaminante del agua y se estima que solo en México se generan alrededor de 1.2 millones de m³ de nejayote cada mes (Gutiérrez y col., 2010).

Salmerón-Alcocer y col. (2003) reportaron que el nejayote es un agua residual que contiene cantidades significativas de sólidos que consisten en compuestos orgánicos e inorgánicos. Es por lo anterior que con estos altos volúmenes de descarga y las características del efluente como alcalinidad (pH entre 7 y 11), alta demanda química de oxígeno (10,000 – 30,000 mg/L) y alta temperatura (superior a los 70 °C) se considera al nejayote como un efluente de serias características contaminantes. Las propiedades físicoquímicas del nejayote reportadas por Valderrama Bravo y col. (2012) y Niño-Medina y col. (2009) se muestran en la Tabla 1.

El nejayote industrial comúnmente se vierte en cuerpos de agua (ríos o lagos), en suelos o en el alcantarillado público, y pocas veces se le aplica algún tratamiento previo (Salmerón-Alcocer y col., 2003). Como se mencionó anteriormente y debido a que rebasa los límites máximos permisibles mencionados en la NOM- 067-ECOL-1994, en los parámetros de pH, DQO y ST, los cuales son 6 a 9, 200 mg/L y 100 mg/L, respectivamente, así como también en la NOM-001-ECOL-1996, sobre los límites máximos permisibles en temperatura los cuales deben ser no mayores a 40°C, es importante considerar su tratamiento de una forma integral y adecuada.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote.

PROPIEDAD FISICOQUÍMICA	VALOR
pH	11.5-11.6
Sólidos Suspendidos Totales	2540-8342.5 mg/L
Cenizas	0.767%
Carbohidratos	0.862%
Carbón Orgánico Total	2984.10 mg/L
Conductividad Eléctrica	4510.12 μS/cm
Turbidez	963.3 NTU
Densidad	1003.54 Kg/m³
Viscosidad	0.002301 Pa*s
Humedad	97.72 %
Demanda Química de Oxígeno	1670-21280 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno	190-7875 mg/L
Alcalinidad Total	180-3260 mgCaCO₃/L

Tratamiento del nejayote

Los esfuerzos en desarrollar sistemas para el tratamiento de este efluente incluyen diversas operaciones unitarias, como aquellas utilizadas en los procesos de tratamiento primario de aguas residuales, entre las que se conocen filtración, coagulación, floculación y sedimentación.

Se ha evaluado el uso de membranas de filtración con diferente tamaño para separar el nejayote en fracciones que contienen sus componentes. Las primeras fracciones de los procesos propuestos contienen las partes del grano como fibra, endospermo y pericarpio, así como los sólidos suspendidos de alto peso molecular. En las fracciones obtenidas con membranas de ultrafiltración se producen soluciones concentradas de carbohidratos, con uso

como aditivos de alimentos (Castro-Muñoz y col., 2016). Aquellas fracciones resultantes de la ultrafiltración con membranas de 1 kDa permiten obtener soluciones concentradas de calcio, que los autores proponen sea reusada en el proceso de nixtamalización y el permeado resultante, como una solución rica en polifenoles, con uso en la industria farmacéutica, de alimentos y cosmética (Castro-Muñoz y Yáñez-Fernández, 2015).

En un enfoque similar, la solicitud de patente WO 2014/119990 A2 (Asaff y Reyes, 2014), propone separar eficientemente los sólidos en suspensión mediante un sistema de filtración que permite obtener fracciones con diferentes concentraciones de los componentes solubles e insolubles del nejayote. Según Asaff y Reyes (2014), cada fracción obtenida se usaría en diferentes campos, así como la obtención final de una corriente de agua con la calidad suficiente para su reuso en el proceso de nixtamalización o para su descarga de forma medioambientalmente segura y cumpliendo con la norma NOM- 067-ECOL-1994. El método reportado en la solicitud de patente WO 2014/119990 A2 consiste en realizar procesos de clarificación y ultrafiltración, utilizando ácido sulfúrico, amilasa y un floculante (poliacrilamida). Posteriormente el clarificado es llevado a una membrana de 20-25 micras para eliminar por completo la cantidad de sólidos suspendidos totales. Para el proceso de ultrafiltración se filtró el clarificado obtenido previamente por una membrana de 50 KDa. Este proceso propone la utilización de los componentes presentes en el nejayote, otorgando un valor agregado al tratamiento.

Las solicitudes mexicanas de patente MX/a/2013/000943 (Asaff y col., 2013) y Mx/a/2013/002096 (Asaff y Reyes, 2013), que proponen procesos de tratamiento del nejayote similares mediante acondicionamiento fisicoquímico, se encuentran en evaluación comercial por empresas líderes en la producción de harina de maíz nixtamalizado y compuestos fenólicos derivados del maíz, ya que ofrecen la opción de obtener productos de alto valor agregado asociados al tratamiento del efluente, como son compuestos fenólicos con alta demanda en el mercado de productos saborizantes.

Por otra parte, Suárez y col. (2016) publicaron un trabajo donde consideran al nejayote como un coloide y analizan su comportamiento bajo diversas propiedades físicas como peso molecular, grado de deacetilación, viscosidad dinámica, así como propiedades químicas como hidrofobicidad, puentes de hidrógeno e interacciones de van der Waals, que

tradicionalmente explican las eficiencias de coagulación-floculación de coloides. Estos autores demuestran el uso de dos quitosanos de diferente peso molecular, usados como materiales adsorbentes en sobrenadantes de nejayote a pH 5.5, para disminuir la turbidez de dicha fracción, medido a través de los cambios en el potencial zeta. Aunque este trabajo representa una alternativa para el tratamiento del efluente resulta necesario establecer metodologías con capacidad de escalamiento para tratar los volúmenes producidos, ya que el trabajo reporta el uso de ácido acético, centrifugas de laboratorio (3500 rpm, 15 minutos, 25°C) para obtener sobrenadantes susceptibles del tratamiento y el uso de adsorbente grado analítico (Sigma-Aldrich y BioLog Biotechnologie und Logistik GmbH). El análisis de costos presentado en el trabajo sólo toma en cuenta el precio del quitosano, sobre la base de 250 L de nejayote producido por día.

De forma similar García-Zamora y col. (2014) proponen un sistema para tratar el nejayote que utiliza quitosano y un tratamiento enzimático con lacasas, que permite obtener biopolímeros como productos de valor agregado y al mismo tiempo logran la reducción en valores de DQO, lo cual se traduce en una disminución del carácter contaminante del efluente.

En todos los trabajos mencionados se propone que el tratamiento del nejayote implique el aprovechamiento de sus componentes, sin embargo, aún no queda demostrada su efectividad en el tratamiento del efluente a nivel industrial. Por lo tanto, sería necesario desarrollar procesos que utilicen las operaciones unitarias mínimas o de procesamiento mínimo previo (sin sedimentación por centrifugación), o sistemas que permitan su integración a trenes de tratamiento tradicionales de efluentes industriales.

Finalmente, algunos trabajos indican el uso del nejayote como sustrato para bioprocesos, lo que podría ofrecer una alternativa para su tratamiento mediante la obtención de productos biotecnológicos. Por ejemplo, la composición alta en carbohidratos de los efluentes de la industria del nixtamal fue aprovechada para la producción de diferentes especies del género *Lactobacillus*, con un consumo de hasta el 65% de los azúcares reductores presentes en dicho efluente (Ramírez -Romero y col., 2013). Además, en el mismo trabajo, los autores lograron la producción de bacteriocinas con efecto antimicrobiano sobre *Listeria innocua* y

Escherichia coli, indicando su posible aplicación para la inhibición de patógenos en alimentos.

Por otro lado, se ha observado que, al pasar el nejayote libre de sólidos en suspensión a través de membranas, el 80% del influente logra atravesarla y el producto resultante (permeado) es agua con un bajo contenido de material en solución que puede ser reutilizada nuevamente en el proceso de nixtamalización. El restante 20% del influente conforma la fracción líquida de rechazo con un contenido de sólidos en solución entre cuatro y cinco veces mayor al contenido del influente. Los sólidos en solución contenidos se forman mayormente por carbohidratos fermentables que pueden ser empleados como sustrato para diferentes procesos biotecnológicos (Reyes-Vidal y col., 2012).

2. Tecnologías alternativas para el tratamiento de efluentes

Debido a la necesidad de tratamientos más eficientes para los efluentes industriales, se han venido desarrollando nuevas tecnologías durante las últimas décadas. Se conoce que las aguas residuales contienen energía en forma de materia orgánica biodegradable, que en lugar de tratar de recuperarla y emplearla se degrada para removerla (Logan, 2006). Actualmente se cuenta con nuevos sistemas para el tratamiento de aguas residuales que mediante la implementación de nuevas tecnologías se convierten en alternativas para la generación de energías limpias y renovables. Entre estas, se encuentra un método seguro y sostenible para descontaminar aguas residuales, como son las celdas electroquímicas microbianas (CEM), en sus dos principales configuraciones como celdas de combustible microbianas y celdas de electrólisis microbianas. Esta tecnología ofrece una excelente alternativa para el tratamiento de aguas residuales debido a que simultáneamente pueden utilizarse para descontaminar desechos industriales y generar energía eléctrica (Schröder, 2011). Por ello, las CEM se están desarrollando para la producción de energía renovable, así como también en el diseño de métodos para el tratamiento de aguas residuales.

Celdas de Combustible Microbianas

Las celdas de combustible microbianas (CCM) son dispositivos que utilizan bacterias para oxidar materia orgánica e inorgánica y generar energía. Las bacterias metabolizan el sustrato presente en dichos dispositivos y como productos de este metabolismo se obtienen electrones que son transferidos a un aceptor final que corresponde con el ánodo. El ánodo y cátodo están unidos por un material conductor y una resistencia que permite el paso de los electrones para cerrar un circuito eléctrico. Al mismo tiempo, durante este proceso se contribuye a degradar la materia orgánica representada como sustrato o combustible (Pant y col., 2010).

Los primeros experimentos con CCM fueron hace más de cien años, cuando se logró generar electricidad a partir de la bacteria *Escherichia coli* demostrando un flujo de corriente entre dos electrodos en un medio estéril, transformando el material orgánico hasta electricidad como producto de la conversión de la materia orgánica (Potter, 1911). Las CCM pueden presentar dos configuraciones, de una sola cámara (sin dividir) y de dos cámaras (dividida) (Figura 2 y 3).

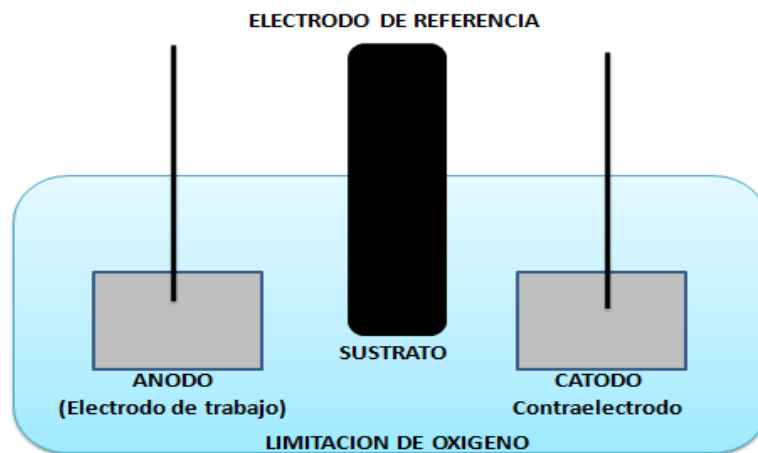


Figura 2. Celda electroquímica microbiana de una sola cámara y tres electrodos.

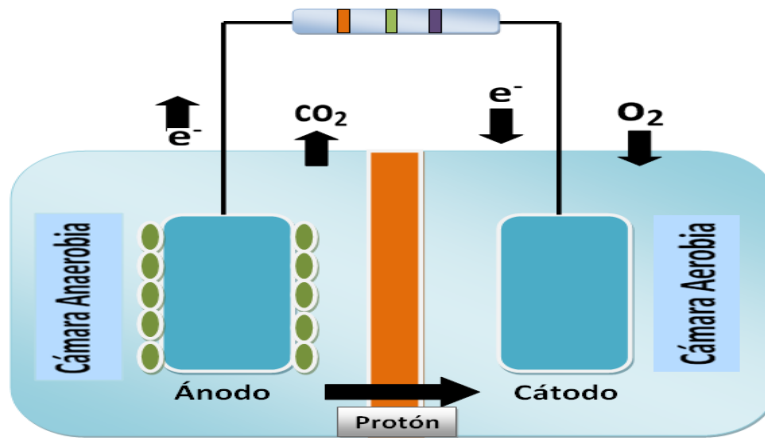


Figura 3. Detalles principales de una celda electroquímica microbiana de doble cámara.
Modificada a partir de Du y col. (2007).

La principal diferencia que tienen las CEM de una y dos cámaras es la membrana intercambiadora de protones que divide al ánodo del cátodo. La membrana además convertirá la CEM en la configuración de doble cámara, además de permitir que los protones fluyan de manera natural hacia el cátodo.

Para la segunda configuración (Figura 3) se tienen las siguientes ventajas:

- Menor consumo específico de energía al eliminar un electrolito y la membrana.
- Sistema de distribución hidráulico más sencillo
- Diseño más sencillo.
- Menores costos de inversión y mantenimiento.
- Mayor rendimiento espacio- tiempo.
- Menor número de equipos auxiliares (intercambiadores de calor, bombas, etc.)

En el caso de las CEM en configuración de dos cámaras (Figura 3), las cámaras están compuestas por un ánodo y un cátodo, los cuales están separados por una membrana. Las bacterias crecen en la cámara del ánodo, donde se produce la oxidación de la materia orgánica y la liberación de electrones al ánodo, los cuales son transferidos al cátodo por un circuito externo y los protones que se generan en la cámara del ánodo migran hacia la cámara del cátodo a través de la membrana. El cátodo se burbujea con aire para proporcionar oxígeno

disuelto para las reacciones de electrones, protones y oxígeno y con un cable se completa el circuito produciendo energía (Logan y col., 2006).

La transferencia electrónica puede ocurrir de dos maneras, a través de proteínas conductoras de la membrana celular o bien a través de mediadores. Los mediadores también se conocen como lanzadores de electrones y son sustancias con propiedades de óxido-reducción (redox) que actúan como intermediarios entre la membrana celular y el ánodo. Pueden ser añadidos externamente o bien ser excretados como resultado del propio metabolismo microbiano (Lovley y Nevin, 2008).

Los electrodos son materiales conductores de la electricidad, a través de los cuales se lleva a cabo la transferencia electrónica con la disolución en la que se encuentran las sustancias que se desea sufran transformación. Dado que este intercambio electrónico constituye la reacción electroquímica, se considera que los electrodos son uno de los componentes más importantes en el sistema electrolítico. Su selección es sumamente importante puesto que influyen notablemente en la selectividad del proceso electroquímico como en el consumo energético. El electrodo en donde se lleva a cabo la reacción electroquímica de interés se denomina electrodo de trabajo, mientras que en el contraelectrodo se reducen el oxígeno o los compuestos oxidados. El electrodo conectado al polo negativo de la fuente de alimentación se denomina cátodo, y en este se llevan a cabo los procesos de reducción, es decir, la transferencia electrónica desde el electrodo a la sustancia electroactiva. El electrodo conectado al polo positivo se denomina ánodo y en él se lleva a cabo la oxidación, la transferencia electrónica desde la disolución electrónica al electrodo (Ochoa, 1996).

Importancia del sustrato y microorganismos en CEM

En las celdas electroquímicas microbianas, el sustrato es una variable biológica importante que afecta la generación de electricidad. En un análisis realizado por Pant y col. (2010) mencionan que en las CEM se pueden utilizar una gran variedad de sustratos para la producción de electricidad que van desde compuestos puros hasta mezclas complejas de materia orgánica presente en las aguas residuales. Esta revisión resume los diversos sustratos utilizados en las CEM para la producción de corriente y el tratamiento de residuos. Sin

embargo, la lista no es exhaustiva ya que los sustratos más nuevos son usados bajo estos sistemas con mejores resultados tanto en términos de la generación de energía, así como el tratamiento de residuos. En la bibliografía se pueden encontrar diferentes sustratos utilizados en las CEM (Pant y col., 2010) como son:

Sustratos puros:

- Acetato
- Glucosa
- Arabitol
- Cisteína
- Extracto de malta, extracto de levadura y glucosa
- Etanol

Sustratos complejos:

- Aguas residuales provenientes de cervecería
- Aguas residuales domesticas
- Aguas residuales porcinas
- Aguas residuales de comida
- Aguas residuales del procesamiento de almidón
- Aguas residuales de la industria del chocolate

Como se observa anteriormente, hasta la fecha se ha investigado una amplia variedad de aguas residuales de la industria alimenticia para la generación de electricidad usando CEM, incluyendo residuos de cervecería, lácteos, efluente de almidón, suero de leche, vegetales, carne, pescado y otras industrias de procesamiento de alimentos (Velázquez-Orta y col., 2011).

Los sustratos que se utilizan en las CEM han crecido en complejidad y fuerza, esto debido a la mayor tasa de carga orgánica presente. Un sustrato complejo ayuda a establecer una vida diversa y electroquímicamente activa de una comunidad microbiana en el sistema, a diferencia de un sustrato simple que es más fácil de degradar y que mejora la electricidad (Pant y col., 2010).

A la fecha existe un número importante de trabajos publicados usando sistemas bioelectroquímicos en general que emplean sustratos complejos principalmente aguas residuales y biomasa lignocelulósica (Pant y col., 2010; Oh y Logan, 2005; Patil y col., 2009; Lu y col., 2009). Por lo cual, las CEM se consideran una tecnología prometedora y sostenible para satisfacer las crecientes necesidades de energía, especialmente en el uso de aguas residuales como sustratos, ya que pueden generar electricidad y llevar a cabo simultáneamente tratamiento de aguas residuales, compensando los costos de operación de tratamiento de aguas residuales (Liu y col., 2009).

Algunos trabajos han usado efluentes de la industria alimenticia como sustrato en sistemas bioelectroquímicos. Cercado-Quezada y col. (2010) evaluaron tres tipos de efluentes procedentes de la industria de alimentos: jugo de manzana fermentado (JMF), sedimentos de vino (SV) y efluentes de yogur (EY), en combinación con dos fuentes de inóculo, lodo anaeróbico y composta para jardín, para producir electricidad en CCM y determinaron la capacidad de formación de biopelículas electroactivas. Este estudio demostró que los EY fueron el mejor sustrato, capaz de proporcionar hasta 250 mA/m^2 . La CCM con lodos utilizando EY como sustrato tuvo un mejor rendimiento sobre la densidad de potencia con valores de 232 mA/m^2 . Así, la producción de electricidad microbiana usando CCM puede convertirse en una forma importante de bioenergía ya que los resultados obtenidos con los residuos provenientes de la industria de lácteos son eficientes para continuar explorando con ellos y poder usarlos como combustibles en el futuro, porque esta tecnología ofrece la posibilidad de extraer la corriente eléctrica a partir de una amplia gama de residuos orgánicos, especialmente aquellos presentes en efluentes (Pant y col., 2010).

En la Tabla 2 se presenta un resumen de diversos trabajos publicados donde se utilizaron sustratos complejos, específicamente aguas residuales en celdas de combustibles microbianas. Se pueden observar valores de densidad de corriente generados al usar sustratos provenientes de la industria alimenticia utilizados en dispositivos de una sola cámara o doble cámara, dependiendo del origen del sustrato.

Tabla 2. Densidad de potencia generada en diferentes CCM con agua residual (Modificado de Gude, 2016).

AGUA RESIDUAL	CCM	DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/m²)	REFERENCIA
Agua residual doméstica	Simple	42	Nijme y col., 2012.
Agua residual de la agricultura	Simple	13	Nijme y col., 2012.
Agua residual de cervecería y panadería	Simple	10	Velázquez-Orta, 2011.
Agua residual de lácteos	Simple	25	Velázquez-Orta, 2011.
Agua residual de alimentos lácteos	Simple	15	Nijme y col., 2012.
Agua residual de papel reciclado	Simple	250	Huang y Logan, 2008.
Agua residual de papel	Simple	125	Velázquez-Orta, 2011.
Agua residual de procesamiento de almidón	Simple	0.09	Lu y col., 2009.
Agua residual de estiércol	Simple	4	Scott y Murano, 2007.
Suero de queso	Doble	42	Stalmatelstou y col., 2010
Lixiviado de residuos de alimentos y composta	Doble	209	Cercado-Quezada y col., 2010

De acuerdo a las diversas investigaciones que existen, otro de los factores más importante para que se genere corriente de electrones en una CCM son los microorganismos empleados porque estos se encargan de llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica a compuestos como CO₂ y H₂O y la liberación de electrones al sistema. Como ya se mencionó,

hasta ahora se sabe que las bacterias transfieren electrones a una superficie a través de dos mecanismos: el transporte electrónico por medio de mediadores añadidos externamente o autoproducidos por diversas especies bacterianas, como en el caso de *Pseudomonas aeruginosa* que produce piocianina (Rabaey y col., 2004) y de manera directa usando mecanismos transmembranales, siendo organismos modelo de este mecanismo los géneros *Geobacter* y *Shewanella* (Gorby y Beveridge, 2005; Reguera y col., 2005).

La producción de electricidad utilizando microorganismos electrogénicos en las CCM tiene algunas ventajas significativas, una de ellas es la completa oxidación de la materia orgánica por estos microorganismos. La mayoría de los estudios relacionados con la transferencia de electrones se realiza utilizando *Geobacter sulfurreducens*, ya que su genoma se conoce completamente y se sabe que es un gran generador de densidad de potencia (Bond y Lovley, 2003).

Por otra parte, los microorganismos extremófilos demuestran amplia aplicación en procesos biotecnológicos. Tal es el caso de Torres (2014), quien menciona que para el uso de los sistemas bioelectroquímicos a gran escala será necesario usar microorganismos especializados como los extremófilos, que soporten condiciones de operación diferentes a las mesófilas que son las comúnmente usadas. Los microorganismos extremófilos son convenientes de usar en procesos de tratamiento de aguas residuales industriales ya que estos efluentes se consideran complejos por la gran cantidad de materia orgánica presente y las características fisicoquímicas que presentan son diferentes a las comunes, por ejemplo, alta temperatura o pH diferentes al neutro. Por lo tanto, los microorganismos necesitarán adaptarse a condiciones extremas de pH, temperatura, etc. Es por esta razón que se consideran a los microorganismos extremófilos útiles en dichos procesos ya que se caracterizan por sobrevivir a ambientes extremos. Tales características se deben a que su desarrollo ha sido bajo condiciones que podrían matar a la mayoría de otros microorganismos y pueden adaptarse de para subsistir en las mismas.

A la fecha, se tienen estudios publicados con CCM donde han encontrado microorganismos alcalófilos presentes en el sustrato. Chung-Yuang y col. (2011) aislaron una bacteria alcalófila, nombrada como MFC-5^T, en una CCM que funcionaba de forma continua a un pH de 10, e identificaron su capacidad para reducir ácidos húmicos (quinona) bajo condiciones

alcalinas, es decir que se trata de un compuesto reductor que al donar electrones resulta oxidado en el proceso. El análisis genético y filogenético, indicó que se trataba de la especie *Corynebacterium humireducensse sp. nov.*, en la cual el término *humireducensse* se utiliza para relacionar su capacidad de transformar sustancias húmicas a un estado de oxidación reducida. Estas sustancias se caracterizan por ser útiles para la biodegradación de contaminantes y regulación de emisiones de gases de efecto invernadero. Estas bacterias corresponden con bacterias Gram-positivas, anaerobias facultativas y su crecimiento óptimo se produce a 37°C a un pH de 9. Otro trabajo que menciona la producción de corriente en condiciones alcalinas es el de Badalamenti y col. (2013) quienes reportaron bacterias que generan corriente eléctrica en CCM mediante la oxidación de sustratos orgánicos alimentados con acetato. Las altas densidades de corriente que encontraron fueron generadas por *Geoalkalibacter spp*, produciendo densidades de corriente de 5.0 a 8.3 y 2.4 hasta 3.3 A/m² bajo condiciones alcalinas (pH de 9.3).

Finalmente, aunque los efluentes de la industria del nixtamal no han sido reportados como sustrato en CCM, si hay trabajos publicados que mencionan el aislamiento y caracterización de dos cepas (NJY1 y NJY2) del género *Bacillus flexus* del nejayote, con características alcalófilas facultativas y productoras de enzimas feruloilesterasas (Sánchez-González y col. 2011). Los autores mencionan que por las características de las bacterias aisladas y los bioproductos obtenidos es factible su uso para el tratamiento del efluente desde donde fueron aisladas, así como otros efluentes con características alcalinas.

3. Justificación

El nejayote, un efluente alcalino de la industria nixtamalera, puede ser aprovechado como sustrato en celdas electroquímicas microbianas, ya que tiene características potenciales para la generación de energías renovables dada su composición. De forma paralela, utilizando las CEM simples es posible realizar un tratamiento de dicho efluente con la adición de energía eléctrica. Así, en este trabajo se evaluó el tratamiento de este efluente, considerando que los microorganismos endógenos presentes también pueden contribuir al proceso bioelectroquímico. Aunque existen alternativas como los procesos de lodos activados, filtros biológicos, reactores enzimáticos, entre otros, para el tratamiento de efluentes es necesario desarrollar a la par procesos sustentables que permitan un tratamiento integral con la opción de ser usados como procesos unitarios o que puedan ser acoplados a otras operaciones, por ejemplo, en un tren de tratamiento de aguas residuales.

4. Hipótesis

Los microorganismos y la materia orgánica presentes en los efluentes de la industria nixtamalera conocidos como nejayote servirán como inóculo y sustrato en celdas electroquímicas microbianas para tratar el efluente y a su vez generar electricidad.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.

Esta página fue eliminada debido a que su contenido es información clasificada como confidencial de acuerdo con el Artículo 113 Fracción II de la Ley Federal de Transparencia y Acceso a la Información Pública.