



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



Facultad De Ingeniería Química

Colegio De Ingeniería Ambiental

PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN DEL LÍQUIDO RESIDUAL DE LA NIXTAMALIZACIÓN DEL GRANO DE MAÍZ.

Tesis presentada como requisito para obtener el título de:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL.

PRESENTA
Marisol Cano Rodríguez.

Asesor de Tesis:
Dra. María Teresa Zayas Pérez.

Co-Asesor de Tesis (externo):
Dr. Leonardo Salgado Juárez.

Puebla, Puebla. Agosto 2015.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1.1 La composición del maíz	2
1.2 El proceso de la nixtamalización	3
1.3 El nejayote y sus características	4
1.3.1 El nejayote como problema ambiental	5
1.4 Proceso de electrocoagulación	5
1.4.1 Factores que influyen en la electrocoagulación.	7
1.4.1.1 Componentes del sistema de electrocoagulación	8
1.4.1.2 Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales	8
1.4.1.3 Ventajas y desventajas del método de electrocoagulación.....	9
1.4.2 Celda electrolítica para procesos de electrocoagulación	10
1.4.2.1 Tipos de celdas electrolíticas	11
CAPÍTULO 2	14
2.1 Diseño y construcción de la celda electrolítica y electrodos	15
2.2 Muestreo del agua residual de la nixtamalización o nejayote	18
2.3 Caracterización del agua residual de la nixtamalización o nejayote	18
2.3.1. Determinación de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT).....	19
2.3.1.1 Determinación de oxígeno disuelto (OD).....	19
2.3.1.2 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), color, turbidez y concentración de calcio	19
2.3.1.3 Determinación de carbono orgánico total (COT).....	21
2.3.1.4 Determinación de polifenoles totales.....	22
2.3.1.5 Obtención del espectro UV- Visible	23
2.4 Tratamiento de electrocoagulación	24
2.4.1 Reactivos empleados en el tratamiento de electrocoagulación.....	24
2.4.2 Sistema de electrocoagulación	24
2.4.3 Experimentos de electrocoagulación.....	25

2.4.3.1 Valoración del efecto del pH en el tratamiento de electrocoagulación	26
2.4.3.2 Valoración del efecto del tiempo de electrólisis en el tratamiento de electrocoagulación	26
2.4.4 Evaluación de la remoción de contaminantes en nejayote tratado por electrocoagulación	26
CAPÍTULO 3	27
3.1 Características del reactor de electrocoagulación y electrodos	28
3.2 Características del agua residual de la nixtamalización o nejayote.....	32
3.3 Tratamiento de electrocoagulación de nejayote	34
3.3.1 Valoración del efecto del pH sobre la remoción de COT, DQO, color y turbidez	35
3.3.2 Valoración del efecto del tiempo de electrólisis sobre la remoción de COT, DQO, color y turbidez.....	38
3.3.3 Nejayote tratado por electrocoagulación	41
CONCLUSIONES.....	43
REFERENCIAS.....	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Partes principales del grano de maíz	2
Figura 1.2. Diagrama del proceso de nixtamalización	3
Figura 1.3. Reactor electrolítico con zona de sedimentación y zona de flotación	6
Figura 1.4 Celda electrolítica con ánodo de aluminio y cátodo de hierro	11
Figura 1.5. Conexión eléctrica de los electrodos. A) Conexión monopolar. B) Conexión bipolar..	13
Figura 2.1. Dimensiones de la celda electrolítica.....	16
Figura 2.2. Vista frontal de la celda electrolítica.....	16
Figura 2.3. Vista superior del sistema de evacuación de espumas.....	17
Figura 2.4. Geometría de los electrodos.....	17
Figura 2.5. Nejayote crudo	18
Figura 2.6. Fotómetro Merck Mod. SQ 118	19
Figura 2.7. Thermoreaktor, Merck. TR 300.....	20
Figura 2.8. Analizador de COT (TOC-L Shimadzu)	22
Figura 2.9. Curva de calibración de ácido cafeico	23
Figura 2.10. Espectrofotómetro Perkin Elmer, modelo Lambda 20	24
Figura 2.11. Sistema electroquímico utilizado en el tratamiento de electrocoagulación de nejayote. 1) Fuente de poder. 2) Multímetro. 3) Electrodos. 4) Celda electrolítica. 5) Parilla con agitación.....	25
Figura 3.1. Electrodos: 1) Cátodo de hierro. 2) Ánodo de aluminio	31
Figura 3.2. Equipo de electrocoagulación	31
Figura 3.3. Reactor electrolítico	32
Figura 3.4. Espectros de absorción del nejayote crudo sin dilución y a distintas diluciones	34
Figura 3.5. Porcentaje de remoción de color, turbidez, DQO y COT en función del pH	36
Figura 3.6. Espectros de absorción de nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes valores de pH (dilución 1:35).....	38
Figura 3.7 Porcentaje de remoción de color, turbidez, DQO y COT en función del tiempo de electrólisis.....	39
Figura 3.8 Espectros de absorción de nejayote tratado por electrocoagulación a	

diferentes tiempos de electrólisis.....	41
Figura 3.9. Comparación entre nejayote crudo (D) y nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes pH: A) pH 5.0. B) pH 7.0. C) pH 9.0.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote	4
Tabla 1.2. Eficiencia de la electrocoagulación	9
Tabla 3.1. Características del equipo de electrocoagulación.....	30
Tabla 3.2. Caracterización del agua residual de nixtamalización o nejayote	33
Tabla 3.3 Resultados experimentales y porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez con respecto al pH.....	37
Tabla 3.4 Resultados experimentales y porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez a diferentes tiempos de electrólisis	40

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

A Absorbancia

A_{máx} Absorbancia máxima que se presenta a una determinada longitud de onda

COT Carbono Orgánico Total

DBO Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO Demanda Química de Oxígeno

FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

IC Carbono Inorgánico

NDIR Detector de Infrarrojos No Dispersivo

NOM Norma Oficial Mexicana

OD Oxígeno Disuelto

SDT Sólidos Disueltos Totales

SIAP Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

TC Carbono Total

UNF Unidad Nefelométrica de Formacina

INTRODUCCIÓN.

Los principales granos que se producen en el mundo son maíz, trigo, arroz, cebada, sorgo y avena; de ellos, el de mayor importancia es el maíz, con 39% de la producción mundial, le sigue en importancia el trigo con 30% y después el arroz con 21% (Secretaría de Economía, 2012). En México, el maíz es el cultivo más importante de la agricultura; tan solo en el año 2013, la producción anual fue de 22, 663, 953.35 toneladas (SIAP-SAGARPA, 2015). Así mismo, el grano de maíz es la materia prima fundamental para la elaboración de una gran variedad de alimentos, entre los que destaca la tortilla, la cual representa un alimento básico en la dieta de las familias mexicanas ubicándose como el segundo producto más importante en la canasta básica de consumo y se estima que el consumo *per cápita* de tortilla en México es de 120 kg por año (Ochoa y Viniegra, 2009).

Durante el procesamiento del maíz como tortilla se emplea una técnica de antigüedad milenaria llamada nixtamalización la cual consiste en la cocción alcalina del maíz en una solución saturada con hidróxido de calcio empleando cantidades considerables de agua durante el proceso. Los productos son el nixtamal, que es el grano que será transformado en tortillas y el nejayote. El nejayote o agua residual del proceso está compuesto principalmente por: agua, cal, pequeñas partículas de maíz, almidones y hemicelulosa.

El agua de nejayote es un residuo altamente contaminante para el ambiente debido a que en la mayoría de los casos se desecha directamente al alcantarillado público, suelos o cuerpos de agua naturales provocando su deterioro. El poder contaminante del nejayote se debe a que presenta temperatura de descargue superior a 40 °C, pH elevado que va de 11-12, carga inorgánica y orgánica elevada que genera una Demanda Química de Oxígeno (DQO) mayor a 20 000 mg/L, así como una Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) de entre 7 000 a 10 000 mg O₂/L, parámetro para el cual la normativa ambiental (NOM-001-Semarnat-1996), señala un promedio diario de descarga en ríos para la protección de la vida acuática de 60 mg/L.

Actualmente existe un gran interés en desarrollar técnicas innovadoras, más eficaces y económicas para el tratamiento de las aguas residuales. Es así que los procesos de tratamiento electroquímicos en este caso, el proceso de electrocoagulación ha surgido como una de las mejores alternativas para el tratamiento de una gran variedad de efluentes, en dicha técnica se aplican los principios del proceso de coagulación-floculación en un reactor electrolítico. El reactor electrolítico, es un recipiente dotado de una fuente de corriente y de dos o varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales o contaminantes, remplazando los coagulantes químicos que se utilizan en el tratamiento de coagulación química que se emplea como un tratamiento convencional para aguas residuales.

En el proceso de electrocoagulación, el reactor electrolítico juega un papel muy importante en la efectividad de remoción de contaminantes, por ello es importante considerar algunos aspectos en el diseño como: geometría, tipo de material de la celda y los electrodos, colocación de los electrodos dentro del reactor y tipo de conexión eléctrica, etc., ya que todos estos parámetros son determinantes para que la aplicación del tratamiento de electrocoagulación tenga resultados óptimos.

Por lo anterior en el presente trabajo de investigación se realizó el muestreo y caracterización de nejayote. Posteriormente se construyó e implementó un sistema electroquímico para aplicar el tratamiento de electrocoagulación al nejayote y por último se realizó la evaluación del tratamiento, con lo cual se espera contribuir de alguna forma a resolver el problema de los efluentes de la industria del maíz y la tortilla.

JUSTIFICACIÓN.

El agua es un líquido vital para la supervivencia de todos los seres vivos; sin embargo en la actualidad, gran parte de la población no tienen acceso al agua de calidad, esto se debe a la escasez y contaminación ocasionadas por el aumento de la población y el desarrollo industrial. Se estima que a nivel mundial entre el 85 y 95% del agua residual generada se descarga directamente sin tratamiento en ríos, lagos y océanos. En México, tan solo en el año 2010, se registraron 2 354 sitios de descarga de aguas residuales sin tratamiento, donde el 54 % se localiza en ríos y arroyos (INEGI, 2013).

En México, una industria de gran relevancia es la dedicada al procesamiento del maíz en tortillas. Se calcula que en todo el país existen alrededor de 78,852 establecimientos entre molinos y tortillerías así como 6 empresas productoras de harina de maíz nixtamalizado (Secretaría de Economía, 2012). Basándose en que el uso promedio de agua es de tres veces más que el maíz (3:1), se obtiene que en el procesamiento de una tonelada de maíz se generan entre 2.8 y 3.3 m³ de nejayote (Reyes, 2012), los cuales en la mayoría de los casos son descargados directamente al alcantarillado público sin antes haber recibido algún tipo de tratamiento para reducir su carga contaminante como son: materia orgánica, cal, color y turbidez. Por ello, es de suma importancia la aplicación de un tratamiento que logre remover la máxima cantidad de contaminantes presentes en el agua de nejayote.

Los tratamientos electroquímicos han demostrado ser muy eficientes en el tratamiento de aguas residuales con una elevada concentración de compuestos orgánicos, como es el caso del nejayote. Técnicas de tratamiento como la electrocoagulación han demostrado ser benignas o amigas del medio ambiente, debido a su gran capacidad para remover suspensiones y emulsiones de las aguas residuales, materia orgánica, color, turbidez, metales pesados, microorganismos patógenos, etc.

Actualmente se han implementado sistemas electroquímicos para el tratamiento de efluentes provenientes de las industrias del papel, textil, alimenticia, automotriz; así como también para agua residual urbana. Linares *et al.*, (2011) implementó un sistema

de electrocoagulación para el tratamiento de agua residual proveniente de una planta de tratamiento que recibe las descargas de 144 empresas de diferentes giros, como resultado se obtuvieron remociones de 99 %, 97 % y 99 % para DQO, turbidez y color, respectivamente.

Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran: versatilidad en una amplia variedad de efluentes, completa automatización del proceso, tiempos cortos de tratamiento, instalaciones compactas, bajos costos y no se requiere uso de reactivos químicos (Mollah, 2004).

Considerando la importancia de la tortilla en la dieta de las familias mexicanas y como consecuencia los altos volúmenes de agua residual que se produce durante el proceso de nixtamalización, así como el daño ambiental que ocasionan las descargas sin tratamiento, se propone aplicar el tratamiento de electrocoagulación al nejayote empleando un reactor electrolítico que brinde una elevada área superficial de los electrodos para lograr una mayor eficiencia en el proceso de la descontaminación del agua residual de la nixtamalización o nejayote.

OBJETIVOS.

General.

- Caracterizar y aplicar el tratamiento de electrocoagulación al agua residual de nejayote empleando un reactor electrolítico equipado con ánodos de aluminio y cátodos de hierro; así como encontrar las condiciones de operación óptimas durante el tratamiento para remover la máxima carga contaminante presente en el efluente de la nixtamalización o nejayote.

Específicos.

- Obtener las muestras de nejayote en un molino de nixtamal, conforme a la norma NMX-AA-003-1980.
- Caracterizar el agua residual de nejayote a través de los parámetros de color, turbidez, Ca^{2+} , Demanda Química de Oxígeno (DQO), Carbono Orgánico Total (COT), polifenoles totales, Sólidos Disueltos Totales (SDT), conductividad eléctrica, pH, Oxígeno Disuelto (OD), así como por espectrofotometría UV-Visible.
- Construir e implementar un reactor electrolítico equipado con ánodos de aluminio y cátodos de hierro que permita aplicar el tratamiento de electrocoagulación al nejayote.
- Encontrar las condiciones de operación óptimas en el proceso de electrocoagulación, considerando pH y tiempo óptimo de electrólisis, para obtener una alta eficiencia en el proceso de electrocoagulación de nejayote.
- Evaluar la capacidad del proceso de electrocoagulación en la remoción de contaminantes presentes en el nejayote.

HIPÓTESIS.

- Al aplicar el método de electrocoagulación al agua residual de nejayote, empleando un reactor electroquímico conformado por tres ánodos de aluminio y tres cátodos de hierro, se logrará una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en agua residual de la nixtamalización.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 La composición del maíz.

El maíz (*Zea mays L.*) es uno de los cereales que más se produce y consume en el mundo, junto con el arroz y el trigo. Se considera de gran importancia económica como alimento humano y como alimento para ganado, siendo además materia prima de un gran número de productos industriales. En México se cultivan diversas variedades de maíz entre las que destacan el maíz blanco y el amarillo, pero también existen otras variedades como el maíz de color y el maíz pozolero. La producción por tipo de maíz se inclina hacia el maíz blanco con 91% de la producción total, el restante 9%, se destina a la producción de las otras variedades de maíz.

Los granos de maíz están constituidos principalmente de cinco partes principales: cutícula, pericarpio, endospermo, germen y pedicelo o pilorriza (Ver Figura 1.1).

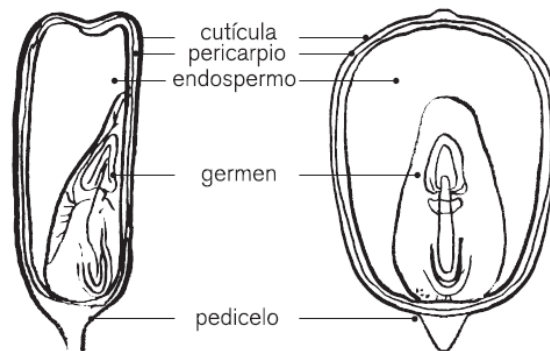


Figura 1.1. Partes principales del grano de maíz (Paredes *et al.*, 2009).

La cascarilla o pericarpio es la piel externa o cubierta del grano, ocupa del 5 – 6 % del peso total del grano, su función es como elemento protector y está formada principalmente por fibra cruda aproximadamente en un 87% y en el cereal ya maduro, tiene la función de impedir el ingreso de hongos y bacterias. El endospermo, es la reserva energética del grano y ocupa hasta el 85% del peso del grano. Contiene aproximadamente el 90% de almidón, el 9% de proteína y pequeñas cantidades de aceites, minerales, gluten y elementos traza. El germen ocupa del 10 al 12% del volumen total del grano y contiene una pequeña planta en miniatura, además de grandes cantidades de energía en forma de aceite, que tiene la función de nutrir a la planta cuando comienza el período de crecimiento, así

como de proporcionarle muchas otras sustancias necesarias durante el proceso de germinación y desarrollo de la planta. El pedículo es un tejido inerte que une al grano al olote (FAO, 2001).

1.2 El proceso de la nixtamalización.

La nixtamalización es un método ancestral para preparar masa o harina de maíz para elaborar tortillas y derivados; así como una gran variedad de alimentos como: pozole, tamales, tlacoyos, etc., la palabra proviene de los vocablos náhuatl *nixtli*, o cenizas de cal y *tamalli*, que significa masa de maíz cocido. El proceso inicia con la adición de una solución de hidróxido de calcio al 1% a una porción de maíz, en relación 3:1 agua: maíz. Esta preparación se cuece de 50 a 90 minutos y se deja reposar de 14 a 18 horas. Después del reposo, se elimina el nejayote o agua de cocción y se llevan a cabo de dos a tres lavados manuales del nixtamal, con grandes cantidades de agua limpia, obteniéndose así, el grano de maíz blando conocido como nixtamal, y las aguas residuales o nejayote (Paredes *et al.*, 2009).

En la Figura 1.2 se muestra el diagrama de flujo del proceso de nixtamalización, en el cual se obtiene como subproducto el nejayote.

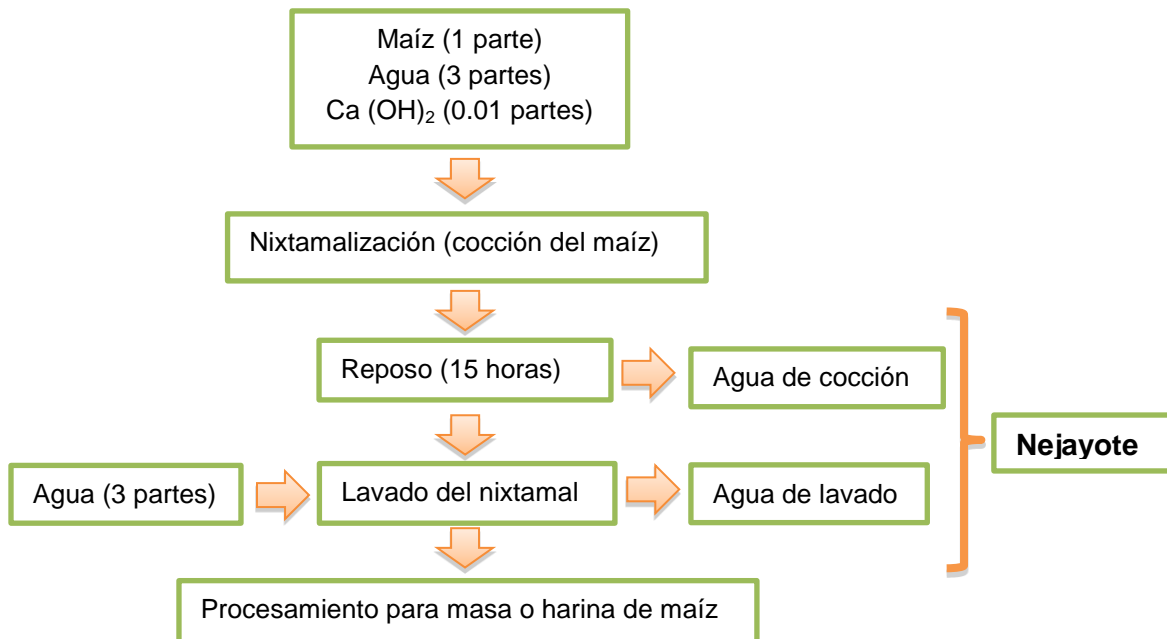


Figura 1.2. Diagrama del proceso de nixtamalización (Rodríguez, 1996).

1.3 El nejayote y sus características.

El término nejayote proviene del náhuatl *nextli* que significa “cenizas de cal” y *áyoh* “caldo o cosa aguada”, se utiliza en el centro del país para denominar los residuos líquidos fuertemente alcalinos, ricos en nutrientes y con elevada carga orgánica provenientes de la producción de masa o harina de maíz mediante la técnica de nixtamalización. El material contenido en el nejayote está compuesto principalmente por sólidos insolubles (residuos de pericarpio) y sólidos en solución entre los que se incluyen arabinosilanos, almidones, dextrinas, hidróxido de calcio (80% del hidróxido de calcio usado originalmente durante el proceso de cocción) y compuestos fenólicos antioxidantes, como el ácido p-cumárico y el ácido ferúlico (Gutiérrez *et al.*, 2010). El nejayote se considera como un efluente altamente contaminante para el ambiente debido a su naturaleza compleja y a la inexistencia o a la insuficiencia de los métodos actuales de tratamiento de aguas residuales. Por lo que el manejo inadecuado de esta agua residual conlleva, inevitablemente, al deterioro de los cuerpos de agua naturales.

Las propiedades fisicoquímicas del nejayote se resumen en la Tabla 1.1 (Rosentrater, 2006).

Tabla 1.1. Propiedades fisicoquímicas del nejayote.

Propiedad fisicoquímica	Valor obtenido
pH	11.6
CaCO₃	3,260 mg/L
Sólidos suspendidos totales	2,540 mg/L
Nitrógeno total (Kjeldahl)	290 mg/L
Fósforo total	178 mg/L
Conductividad	1,500 µmhos/cm
DQO	21,280 mg O ₂ /L
DBO	7,875 mgO ₂ /L

1.3.1 El nejayote como problema ambiental.

El proceso tradicional para la elaboración de tortillas y otros alimentos mediante la técnica de nixtamalización presenta varios inconvenientes, entre los que destacan: el uso elevado de energía y agua, aunado a la producción de una gran cantidad de efluentes contaminantes. Se estima que la industria del nixtamal (productora de masa o harina de maíz para tortillas) genera entre 16 a 22 millones de m³/año de aguas de desecho (nejayote) (Asaff *et al.*, 2011).

Entre los factores que dificultan el tratamiento del nejayote se encuentra la gran cantidad de material en suspensión y disuelto que no logra ser eliminado por procesos unitarios como la sedimentación, centrifugación o filtración (Ramírez *et al.*, 2011). Además, la presencia de compuestos fenólicos (inhibidores del crecimiento microbiano), el pH y contenido de calcio elevados limitan el tratamiento del nejayote mediante tratamientos biológicos. Desde hace más de treinta años se han probado sin éxito plantas compactas para el tratamiento de aguas residuales, así como sistemas tradicionales de tratamiento biológico como lodos activados, reactores empacados aerobios y anaerobios y reactores biológicos rotatorios; este último el más eficaz para remover algunos contaminantes industriales tóxicos o recalcitrantes, sin embargo se requiere el empleo de microorganismos desarrollados en condiciones y medios particulares, por lo que en algunas ocasiones los microorganismos colapsan bajo las condiciones climáticas en las que deben de operar los sistemas de tratamiento o como consecuencia de los contaminantes a los que son expuestos (Reyes, 2012).

1.4 Proceso de electrocoagulación.

La electrocoagulación es un proceso electroquímico, es decir, en el tratamiento se lleva a cabo una conversión entre la energía eléctrica y la energía química, que dan lugar a reacciones redox no espontáneas, en otras palabras se produce la electrólisis.

Por el proceso de electrocoagulación se logra la desestabilización de especies químicas suspendidas, disueltas o emulsificadas presentes en una solución. La técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas

de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados (Chávez, Cristancho y Ospina, 2009).

La electrocoagulación se puede describir de la siguiente manera: en los electrodos ocurren una serie de reacciones que proporcionan iones tanto positivos como negativos. El ánodo, provee los iones metálicos, y a este electrodo se le conoce como electrodo de sacrificio, ya que la placa metálica que lo conforma se disuelve, mientras la placa que forma el cátodo permanece sin disolverse. Los iones producidos cumplen la función de desestabilizar las cargas que poseen las partículas contaminantes en el agua, cuando estas cargas se han neutralizado los sistemas que mantienen las partículas en suspensión desaparecen (se destruye la emulsión), permitiendo la formación de agregados de los contaminantes e iniciando el proceso de coagulación, de forma similar al sistema tradicional de tratamiento de coagulación-floculación (Chen, 2004).

Los iones que proveen los electrodos desencadenan un proceso de eliminación de los contaminantes que puede ser por dos vías: la primera, por reacción química y precipitación; y la segunda, por el proceso físico de agregación de coloides, que dependiendo de su densidad pueden flotar o precipitar (Ver Figura 1.3).

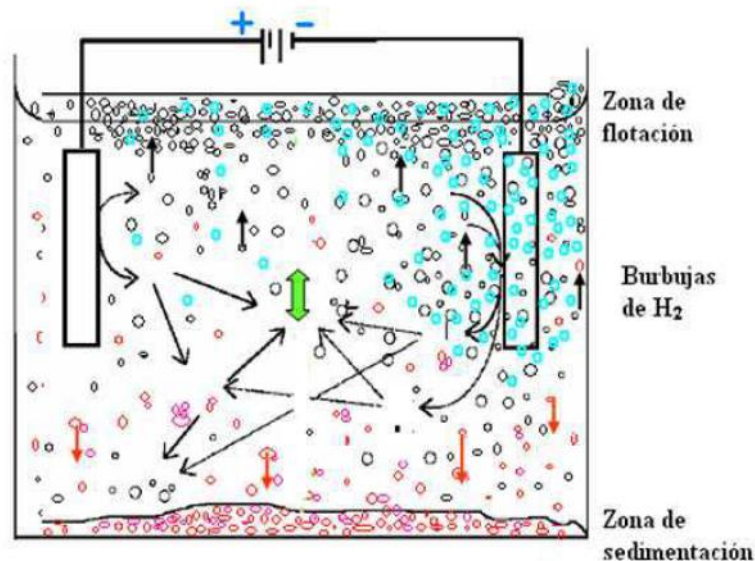


Figura 1.3. Reactor electrolítico con zona de sedimentación y zona de flotación.

(Ramírez, 2010).

A diferencia de la coagulación química, donde el coagulante es añadido directamente a la solución, en la electrocoagulación el coagulante es formado “in situ” mediante las reacciones por las cuales se tiene la producción de iones del metal del ánodo o electrodo de sacrificio (Mollah y Yousuf, 2001).

1.4.1 Factores que influyen en la electrocoagulación.

Algunos factores importantes en la electrocoagulación son (Chen, 2004):

- Tipos de electrodos.

Se pueden utilizar láminas de aluminio, hierro, acero inoxidable, cobre, entre otros. La eficiencia de los electrodos depende de sus potenciales estándar de reducción. Sin embargo, en términos económicos y de disponibilidad de compra, las láminas de aluminio y hierro son las más utilizadas.

- Densidad de corriente.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2} liberados por los respectivos electrodos. Cuando se usa una corriente demasiado grande, hay una transformación de energía eléctrica en energía calórica que calienta el agua. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia.

- Presencia de NaCl.

La sal aumenta la conductividad del agua residual. Se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y SO_4^- pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente.

- pH.

El efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal del electrodo. El rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante. El pH después de la

electrocoagulación podría incrementarse para aguas residuales ácidas pero decrecer para aguas alcalinas.

- Temperatura.

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo.

1.4.1.1 Componentes del sistema de electrocoagulación.

El sistema de electrocoagulación está compuesto por:

- Celda electrolítica (puede ser de tipo batch o continuo), constituida por:
 - Electrodo atacables o solubles (cátodo y ánodo).
 - Dieléctrico o disolución electrolítica (agua residual).
 - Fuente de poder de corriente continua que es rectificador capaz de transformar la corriente alterna en continua, con controles de voltaje [V] y amperaje [A] regulables.

1.4.1.2 Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales.

El proceso de electrocoagulación ha sido aplicado en el tratamiento de diferentes aguas residuales como son aquellas de tipo doméstico, con alto contenido de grasas y aceites y las provenientes de diversas industrias como: papelera, minera, maderera, textil, alimentaria, química, galvanoplastia, curtiembres, etc. De esta manera la electrocoagulación ha sido considerada una técnica viable en el tratamiento de una gran variedad de efluentes industriales. La eficiencia del tratamiento de electrocoagulación en la remoción de algunos contaminantes se muestra en Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Eficiencia de la electrocoagulación (Global Water Systems, 2005).

Parámetros (mg/L)	% Remoción
Demanda Bioquímica de Oxígeno	85-95
Demanda Química de Oxígeno	>85
Grasas y Aceites	>95
Nitrógeno Total Kjeldhal	>70
Fósforo	>70
Sólidos Suspendidos	>98
Hidrocarburos	>95
Arsénico	95-98
Aluminio	>99
Bario	>98
Calcio	96-99
Cobre	>97
Hierro	>99
Magnesio	98-99

1.4.1.3 Ventajas y desventajas del método de electrocoagulación.

Según Mollah y Yousuf (2001). Las ventajas y desventajas más relevantes del tratamiento de electrocoagulación son las siguientes:

Ventajas:

- Instalaciones de tratamiento compactas.
- Tiempos de residencia de electrocoagulación menores, en comparación con los sistemas biológicos que requieren entre 12 y 24 horas.
- Costos de inversión más bajos que los de los sistemas biológicos y químicos.

- Posibilidad completa de automatización.
- Remoción de un amplio rango de contaminantes.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Generación de lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de lodos.
- Produce flóculos más grandes que los formados en la coagulación química y con menor cantidad de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.
- Aplicación a una gran variedad de aguas residuales provenientes de diferentes procesos industriales.

Desventajas:

- Reemplazo de los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, y depende del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- El óxido formado en el ánodo puede formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.
- Puede ser un tratamiento costoso, si el costo de la energía eléctrica es alto.

1.4.2 Celda electrolítica para procesos de electrocoagulación.

En su forma más simple, un reactor de electrocoagulación puede estar compuesto de una celda electrolítica con un ánodo y un cátodo conectados a una fuente de corriente externa (Ver figura 1.4); sin embargo, esta disposición no es la más adecuada para el tratamiento de aguas residuales, porque para una velocidad viable de disolución del metal, se requiere el uso de electrodos con gran área superficial. Esto se ha logrado

mediante el uso de celdas electrolíticas con varios electrodos monopolares, ya sea en conexiones en paralelo o en serie (Mollah y Yousuf, 2001).

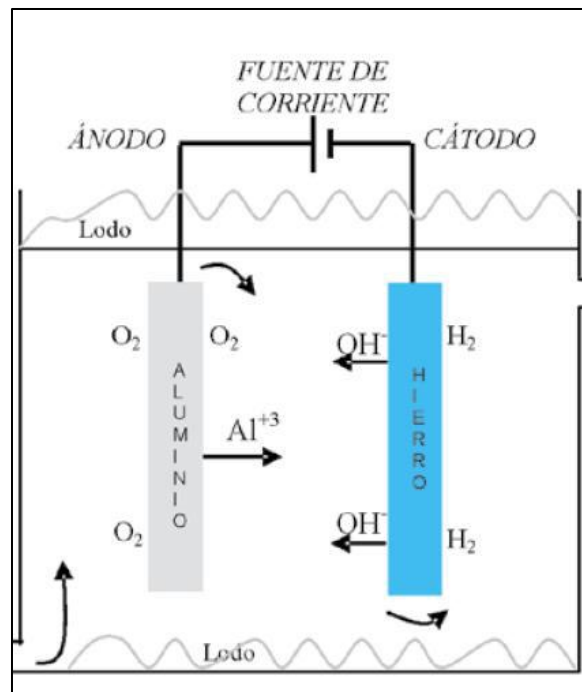


Figura 1.4 Celda electrolítica con ánodo de aluminio y cátodo de hierro (Aristizábal, 2006).

1.4.2.1 Tipos de celdas electrolíticas.

Existen muchos tipos de celdas electrolíticas empleadas en procesos de electrocoagulación, y pueden clasificarse según diferentes criterios:

- Dirección del flujo de agua residual.
- Modo de circulación.
- Función de la celda.
- Tipo de conexión electródica.
- Tipo de operación.

a) Dirección del flujo de agua residual.

En función de la dirección del flujo en la celda, los reactores se pueden clasificar en unidades de flujo horizontal y vertical. Esta disposición puede tener importancia cuando se pretende aprovechar el movimiento provocado por el oxígeno y el hidrógeno generados en los procesos anódicos y catódicos de oxidación y reducción del agua, respectivamente.

b) Modo de circulación.

En función del modo de circulación del agua a tratar entre los electrodos, se pueden encontrar celdas de canales múltiples o bien de un sólo canal. La ventaja de las celdas de canales múltiples es la sencillez de su disposición. Sin embargo, debido al pequeño caudal de electrolito en cada uno de los canales, esta disposición puede favorecer el fenómeno de pasivación de los electrodos.

c) Función de la celda.

Otro elemento importante en el diseño del equipo de electrocoagulación (y tal vez sea el más característico dentro de esta aplicación, ya que los demás son comunes al resto de tecnologías electroquímicas) es la finalidad del reactor. Esta puede ser simplemente la dosificación de agente coagulante, o bien puede ser más ambiciosa e incluir el movimiento de contaminantes (electrofloculación) o incluso llegar a favorecer el proceso de flotación mediante la utilización del oxígeno y el hidrógeno generados respectivamente en los ánodos y cátodos de la instalación (electroflotación).

d) Tipo de conexión eléctrica.

De acuerdo con el tipo de conexión eléctrica, los reactores pueden clasificarse en monopolares y bipolares. En la configuración monopolar, los ánodos están conectados el uno al otro y lo mismo sucede con los cátodos. En los sistemas bipolares los electrodos externos están conectados a la fuente de alimentación, uno como ánodo y el otro como cátodo mientras la corriente pasa a través de los otros electrodos y los va polarizando. En los sistemas bipolares el lado del electrodo hacia el ánodo se polariza negativamente y viceversa en el otro lado ubicado hacia el cátodo (Ver Figura 1.5).

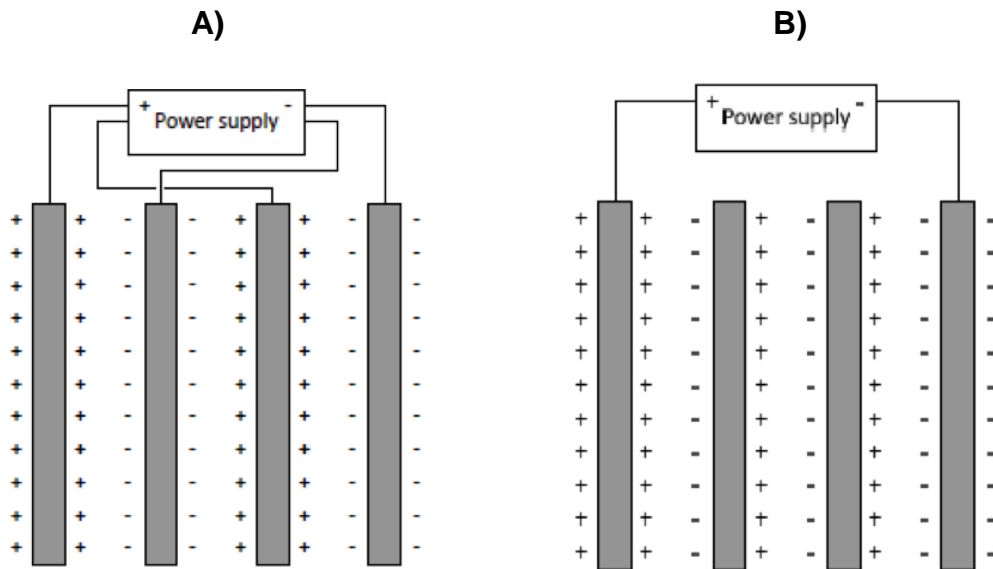


Figura 1.5. Conexión eléctrica de los electrodos (Vepsäläinen, 2012):

A) Conexión monopolar. B) Conexión bipolar.

Se sabe que la configuración bipolar trabaja a menor intensidad y mayor voltaje que la monopolar. Las celdas bipolares tienen la ventaja de la sencillez de su disposición, ya que sólo es necesaria la conexión de dos electrodos (electrodos alimentadores), y por tanto el espacio entre los electrodos puede ser más pequeño.

Sin embargo, el elevado potencial entre los electrodos alimentadores también origina que una parte de corriente fluya a través de la disolución causando un bypass de corriente a los electrodos bipolares y produciendo por tanto pérdidas de corriente, lo que debe ser tomado en cuenta a la hora de prever el efecto sobre la producción y el tiempo de vida de electrodos (Jiang *et al.*, 2002).

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Diseño y construcción de la celda electrolítica y electrodos.

El diseño y construcción de la celda electrolítica que se empleó en el tratamiento de electrocoagulación del agua residual de nejayote, se realizó en base a la información recabada en una revisión bibliográfica sobre reactores electrolíticos construidos e implementados en el tratamiento de electrocoagulación de diferentes aguas residuales, tomando en cuenta, principalmente, el diseño realizado por Arango y Garcés (2007), con el cual se obtuvieron remociones de DQO del 95 %. Para la construcción de la celda electrolítica se utilizaron componentes existentes en el mercado nacional.

Los principales factores que se estudiaron para el diseño y construcción de la celda electrolítica fueron los siguientes:

- Geometría de la celda electrolítica.
- Tipo de material para la construcción de la celda electrolítica.
- Tipo de agua residual a tratar.
- Volumen del agua residual a tratar.
- Forma de operación de la celda electrolítica (batch o continuo).
- Tipo de material de los electrodos.
- Número y geometría de los electrodos.
- Arreglo de los electrodos dentro de la celda electrolítica.
- Conexión eléctrica de la celda electrolítica a la fuente de poder externa.
- Agitación en la celda electrolítica durante la electrocoagulación.

Una vez considerados cada uno de los factores anteriores, se diseñó la celda electrolítica y los electrodos (Ver Figuras 2.1- 2.4).

Posteriormente se realizó la búsqueda de todo el material necesario para la construcción del equipo de electrocoagulación, de acuerdo al diseño realizado.

Por último, la celda electrolítica y los electrodos se construyeron en el taller de herrería de la Universidad Autónoma Metropolitana en base al diseño y material proporcionado.

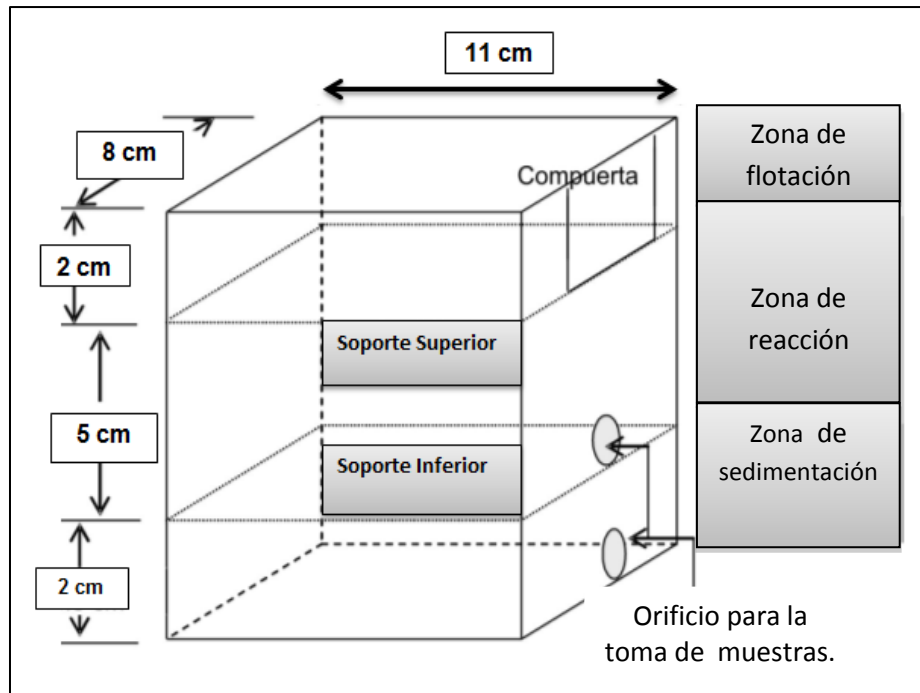


Figura 2.1. Dimensiones de la celda electrolítica.

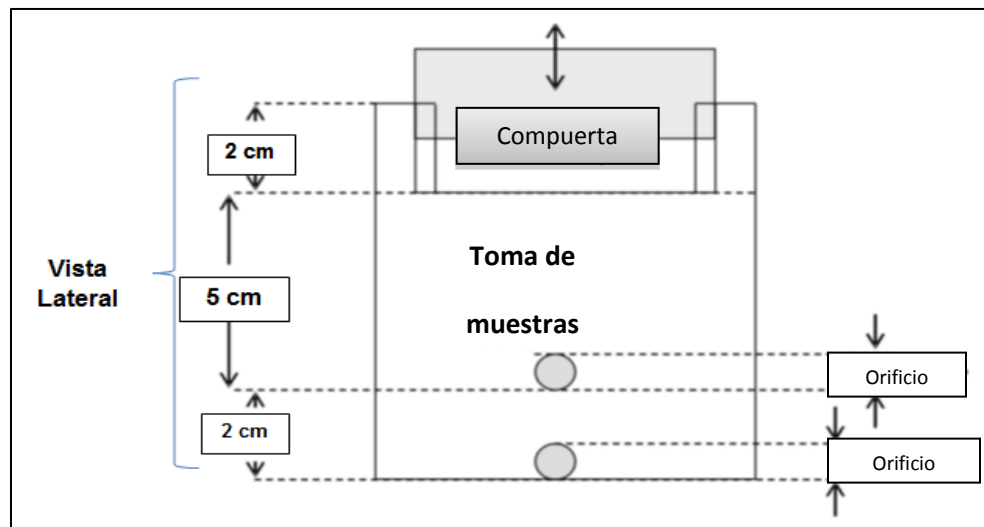


Figura 2.2. Vista frontal de la celda electrolítica.

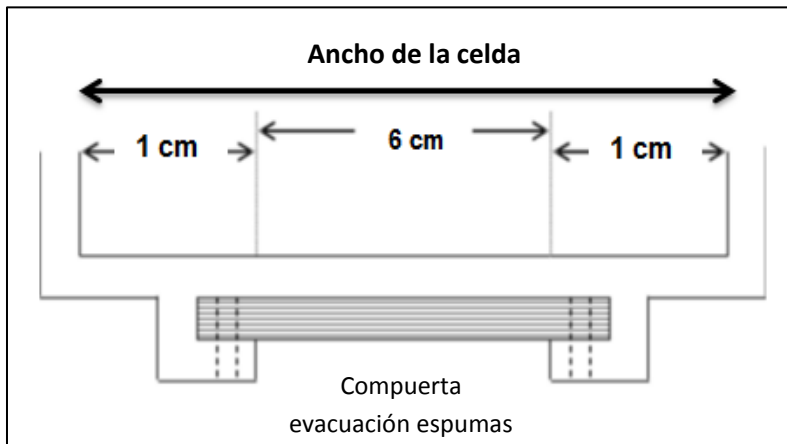


Figura 2.3. Vista superior del sistema de evacuación de espumas.

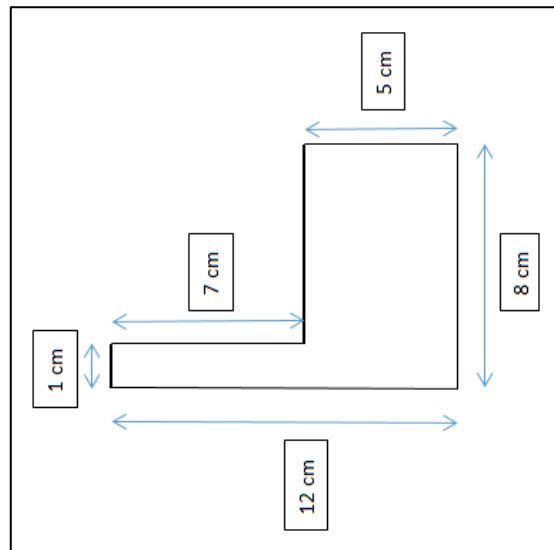


Figura 2.4. Geometría de los electrodos.

2.2 Muestreo del agua residual de la nixtamalización o nejayote.

El nejayote fue recolectado en un molino de nixtamal ubicado en la comunidad de San Baltazar Atlimeyaya perteneciente al municipio de Tianguismanalco, Puebla. El muestreo se realizó de acuerdo a la norma NMX-AA-003-1980, mediante la obtención de una muestra compuesta de 20 litros, para lo cual se tomaron 5 muestras simples diariamente. El nejayote recolectado se filtró con papel filtro marca Ahlstrom No.5 y se conservó en refrigeración a 4 °C en el laboratorio de Química Ambiental de ICUAP, hasta su utilización en todo el trabajo experimental. En la Figura 2.5 se muestra el nejayote crudo recolectado, sin filtrar y filtrado.

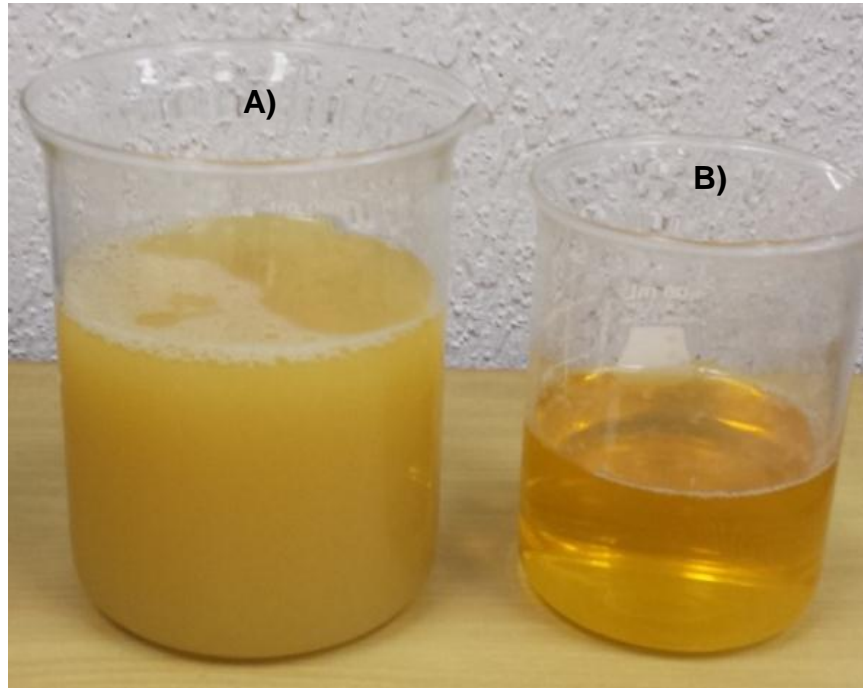


Figura 2.5. Nejayote crudo:

A) Sin filtrar. B) Filtrado.

2.3 Caracterización del agua residual de la nixtamalización o nejayote.

El nejayote recolectado, filtrado y sin filtrar, se caracterizó inmediatamente después de haber sido muestreado, mediante la determinación de los siguientes 12 parámetros:

temperatura, color, turbidez, DQO, COT, OD, SDT, conductividad eléctrica, pH, polifenoles totales, concentración de calcio y por espectrofotometría UV-Visible.

2.3.1. Determinación de pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT).

La determinación del pH y la conductividad eléctrica del nejayote se realizó en el potenciómetro Conductronic, modelo PC 45. Antes de realizar las mediciones respectivas se calibro el equipo. Para pH con soluciones búfer de pH 4.0, 7.0 y 10.0 y para la conductividad eléctrica con una solución estándar de KCl 0.01 M (1413 μ S/cm a 25 °C). Los SDT se midieron empleando un potenciómetro marca OAKTON.

2.3.1.1 Determinación de oxígeno disuelto (OD).

El OD se determinó con el medidor de OD marca HANNA, modelo HI 9146. El equipo se calibró antes de realizar las mediciones respectivas de acuerdo con las indicaciones del fabricante.

2.3.1.2 Determinación de la demanda química de oxígeno (DQO), color, turbidez y concentración de calcio.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), color, turbidez y concentración de calcio, se midió en el fotómetro marca Merck, modelo SQ 118 (Ver Figura 2.6).

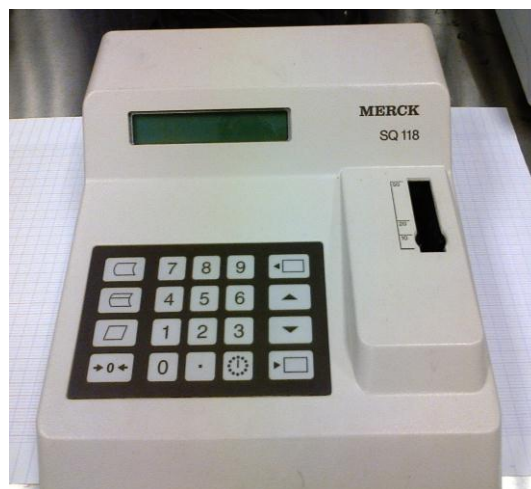


Figura 2.6. Fotómetro Merck, modelo. SQ 118.

Para la determinación de la DQO se utilizó un test en cubetas marca Merck, Germany en un intervalo de 500 a 10000 mg/L de DQO. El test determina las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables con dicromato. La técnica consistió en agregar 1 mL de nejayote filtrado en dilución 1:3 y nejayote sin filtrar en dilución 1:8. El proceso de digestión de las muestras se realizó en un Thermoreaktor TR 300, marca Merck (Ver Figura 2.7), durante 120 minutos a 148 °C. Posteriormente, las muestras se dejaron enfriar y se realizó su medición en el fotómetro marca Merck, modelo SQ 118, empleando el método 112 de spectroquant.



Figura 2.7. Thermoreaktor, Merck. TR 300.

La concentración de calcio (Ca) del nejayote se determinó por el método fotométrico utilizando un test de calcio marca Merck, en un intervalo de medida de 5 a 160 mg/L de Ca. Para realizar la determinación se siguió el método descrito en el test y se empleó nejayote filtrado diluido 1:10 y nejayote sin filtrar diluido 1:13. Una vez preparadas las muestras se realizó su medición en el fotómetro marca Merck, modelo SQ 118, empleando el método 15 de spectroquant.

El color y la turbidez se determinaron en muestras de nejayote filtrado en dilución 1:3 y nejayote sin filtrar diluido 1:8, una vez preparadas las muestras se realizó su medición

en el fotómetro marca Merck modelo SQ 118, empleando el método 113 para turbidez y 139 para color de spectroquant.

2.3.1.3 Determinación de carbono orgánico total (COT).

El Carbono Orgánico Total (COT) del nejayote, se determinó debido a que es una medida más rápida, cuidadosa y directa del contenido orgánico ya que no depende del estado de oxidación inicial de la materia, ni mide otros enlaces orgánicos, como nitrógeno e hidrógeno o inorgánicos que pueden contribuir en la demanda de oxígeno medida. Esta determinación se realizó utilizando un analizador de carbono orgánico total TOC-L, marca SHIMADZU (Ver Figura 2.8). El método se basa en una oxidación catalítica a 680 °C. Como producto de la combustión se genera agua que se vaporiza y se elimina mediante una posterior condensación. Otro producto de la combustión es el carbono (orgánico e inorgánico) que se oxida a CO₂. Este dióxido de carbono se transporta empleando una corriente de aire y se mide mediante un Detector de Infrarrojos No Dispersivo (NDIR). De esta forma se calcula el carbono total (TC). El Carbono Inorgánico (IC), que contempla básicamente dióxido de carbono disuelto, carbonatos y bicarbonatos, se obtiene mediante la acidificación de la muestra, proceso en el que se forma CO₂ y el cual es analizado por el NDIR. El TOC se puede establecer por diferencia de los anteriores (TC-IC).

Antes de realizar las mediciones, se prepararon dos curvas de calibración que requiere el software del equipo, una para carbono orgánico y la otra para la determinación de carbono inorgánico. En este caso se emplearon curvas de calibración de 150 ppm. Para la curva de carbono orgánico se utilizó biftalato de potasio (KHP) y para la curva de carbono inorgánico se utilizaron carbonato de sodio (Na₂CO₃) y bicarbonato de sodio (NaHCO₃). Posteriormente se procedió a la lectura de las curvas de calibración y por último se realizó la medición de las muestras de nejayote filtrado, empleando una dilución 1:100.



Figura 2.8. Analizador de COT (TOC-L, Shimadzu).

2.3.1.4 Determinación de polifenoles totales.

La cuantificación de los polifenoles totales presentes en el agua residual de nejayote se realizó por espectrofotometría UV-Visible, basándose en una reacción colorimétrica de óxido- reducción. El agente oxidante utilizado fue el reactivo de Folín- Ciocalteu. El reactivo de Folín-Ciocalteu es una mezcla de complejos poliméricos formados a partir de los ácidos fosfomolibdico ($H_3PMo_{12}O_{40}$) y fosfotúngstenico ($H_3HW_{12}O_{40}$). Los fenoles son oxidados, reduciendo a los ácidos para formar un complejo Mo-W de color azul. La cuantificación del complejo formado a una determinada longitud de onda permite determinar el contenido de polifenoles.

Para la determinación de los polifenoles totales del nejayote se preparó una curva de calibración con ácido cafeíco a partir de una solución patrón de 100 ppm realizando las siguientes diluciones: 10, 20, 30, 40 y 50 (ppm), aforando a 10 mL con agua destilada. Posteriormente a cada dilución de ácido cafeíco se le adicionó 1.50 mL de carbonato de sodio anhidrido a partir de una solución patrón de 200 g/L y 0.50 mL de reactivo de Folín–Ciocalteu. Este mismo procedimiento se repitió para las muestras de nejayote filtrado (diluido 1:35, 1:45 y 1:55) y nejayote sin filtrar (diluido 1:55, 1:75 y 1:95). Inmediatamente después, todas las muestras se colocaron en la oscuridad durante 60 minutos, y enseguida se midió la absorbancia (A), encontrando la absorbancia máxima

($A_{\text{máx}}$) a una longitud de onda de 676 nm. La concentración de polifenoles totales en las muestras de nejayote se calculó con base en la curva de calibración que se muestra en la Figura 2.9.

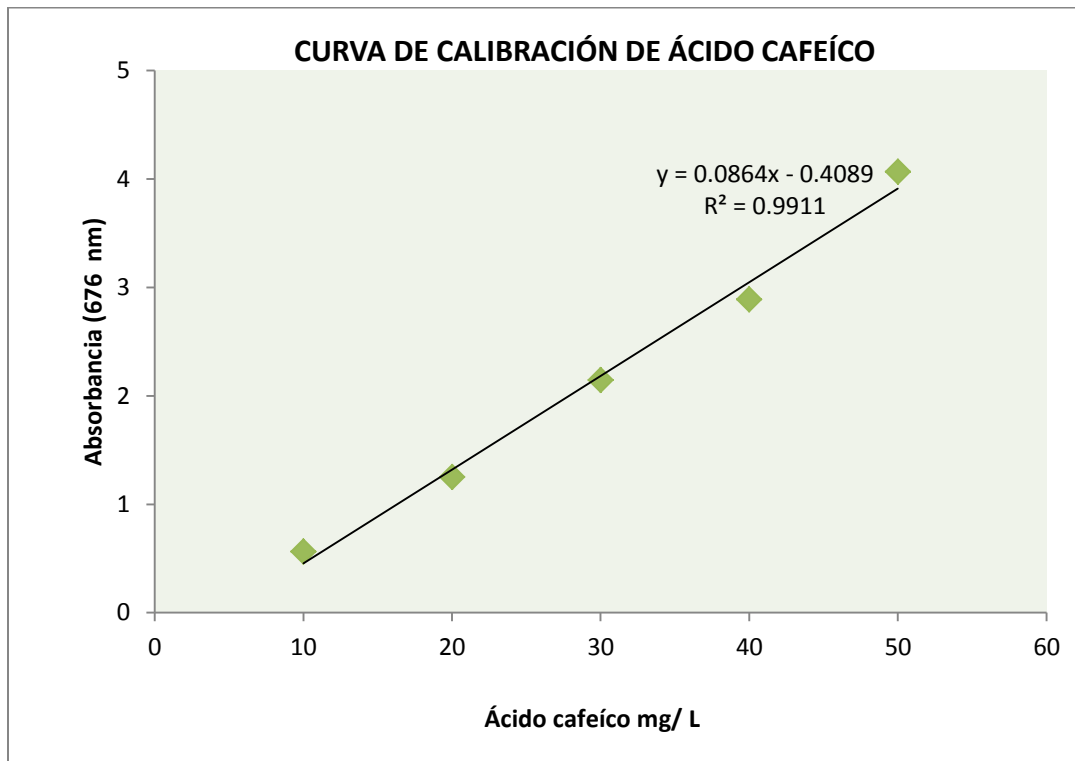


Figura 2.9. Curva de calibración de ácido cafeíco.

En la gráfica se aprecia un coeficiente de correlación de 0.9911 lo cual hace que las concentraciones determinadas de polifenoles totales sean confiables.

2.3.1.5 Obtención del espectro UV- Visible.

El nejayote filtrado, sin diluir y diluido a 1:25 y 1:55, fue caracterizado a través de espectros de absorción en la región UV-Visible, empleando el espectrofotómetro Marca Perkin Elmer, modelo Lambda 20 (Ver Figura 2.10). Para ello se utilizaron celdas de cuarzo de 1mm.



Figura 2.10. Espectrofotómetro Perkin Elmer, modelo Lambda 20.

2.4 Tratamiento de electrocoagulación.

2.4.1 Reactivos empleados en el tratamiento de electrocoagulación.

Como electrólito soporte se utilizó cloruro de sodio (NaCl), marca J.T.Baker.

Para modificar el pH inicial del nejayote en el tratamiento de electrocoagulación, se prepararon soluciones acuosas al 1% a partir de HCl fumante al 37% marca Merck y NaOH, marca J.T.Baker.

2.4.2 Sistema de electrocoagulación.

El sistema de electrocoagulación consistió de una celda electrolítica de metilmetacrilato con una capacidad de 790 mL y un volumen de muestra a tratar de 500 mL. Dentro de la celda se colocaron 3 ánodos de aluminio y 3 cátodos de hierro, calibre 12, con un área de contacto de 47 cm². Se utilizó una parrilla eléctrica con agitación (C-MAG SH7, marca IKA), una fuente de poder externa (Power Suply FB-2040, marca Steren) con la cual se aplicó una diferencia de potencial constante y un multímetro (Mul-105, marca Steren) para realizar las mediciones de voltaje. El sistema electroquímico utilizado se muestra en la Figura 2.11.

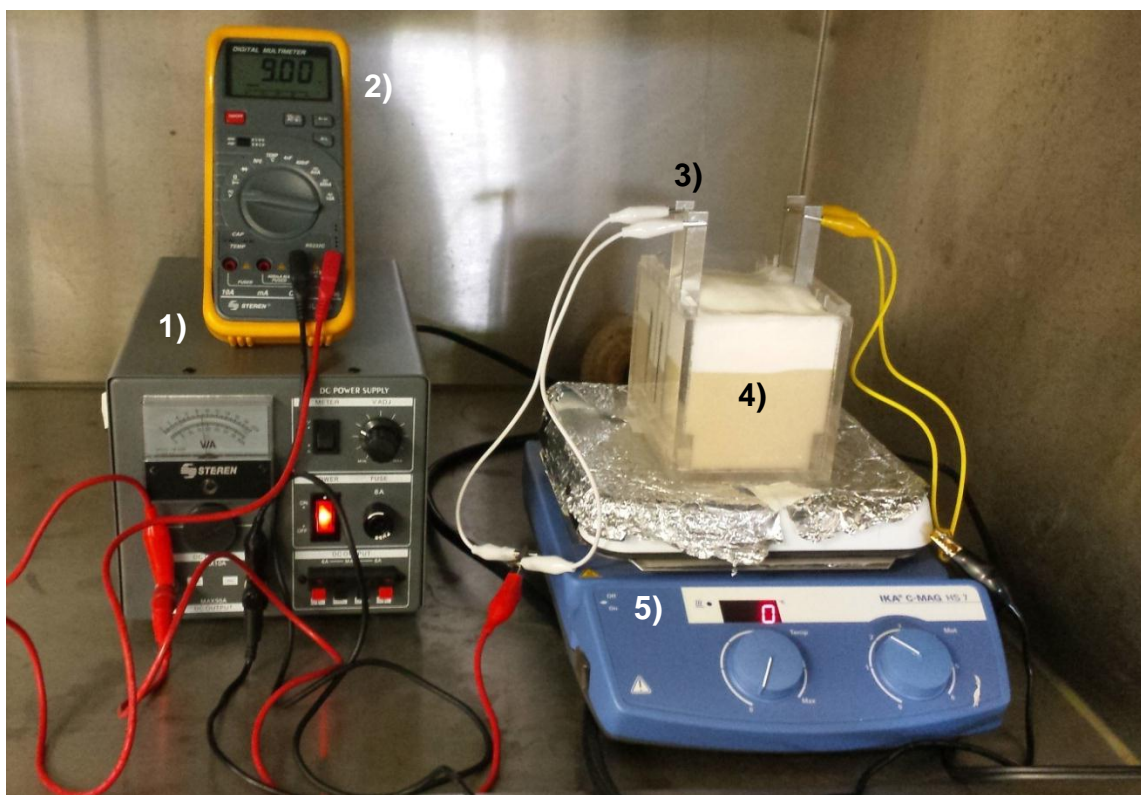


Figura 2.11. Sistema electroquímico utilizado en el tratamiento de electrocoagulación de nejayote: 1) Fuente de poder. 2) Multímetro. 3) Electroodos. 4) Celda electroquímica. 5) Parilla con agitación.

2.4.3 Experimentos de electrocoagulación.

Antes de iniciar con los experimentos de electrocoagulación, los electrodos se lijaron esto para conseguir electrodos porosos o fibrosos que ayudaran a una mejor disolución del metal, posteriormente se sumergieron en una solución de ácido clorhídrico (HCl) al 5% durante 5 minutos, esto para activar la superficie del electrodo, después se lavaron con agua y jabón, y, por último se enjuagaron perfectamente con agua destilada.

Los experimentos de electrocoagulación se realizaron a diferentes valores de pH y tiempos de electrólisis, esto con la finalidad de encontrar las condiciones óptimas del tratamiento. Todos los experimentos se realizaron en 500 mL de nejayote crudo filtrado, utilizando tres cátodos de hierro y tres ánodos de aluminio, cada uno con un área de contacto de 47 cm^2 . Los electrodos se colocaron dentro de la celda de forma alternada, separación de 1 cm y conexión monopolar en paralelo. Como electrolito soporte se

emplearon 2.5 g de cloruro de sodio (NaCl), se aplicó una diferencia de potencial constante de 9 V y agitación constante durante todo el tratamiento.

2.4.3.1 Valoración del efecto del pH en el tratamiento de electrocoagulación.

Se realizó una serie de experimentos de electrocoagulación a diferentes valores de pH con la finalidad de conseguir una mayor eficiencia en el tratamiento de electrocoagulación del nejayote, para ello se utilizaron valores de pH: ácidos (4.0 y 5.0), básicos: (8.0 ,9.0 y 11.0) y un valor neutro: (7.0).

2.4.3.2 Valoración del efecto del tiempo de electrólisis en el tratamiento de electrocoagulación.

El tratamiento de electrocoagulación se realizó a diferentes tiempos de electrólisis: 150, 180 y 210 minutos.

2.4.4 Evaluación de la remoción de contaminantes en nejayote tratado por electrocoagulación.

Con la finalidad de evaluar el tratamiento electroquímico aplicado en el nejayote, se analizaron las muestras tratadas a diferentes valores de pH y tiempos de electrólisis mediante la determinación de los siguientes parámetros fisicoquímicos: color, turbidez, DQO, COT y obtención del espectro UV-Visible.

Los porcentajes de remoción de color, turbidez, DQO y COT de las muestras de nejayote tratadas por electrocoagulación, se calcularon de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Remoción} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Donde C_i y C_f corresponden al parámetro valorado bajo condiciones iniciales y finales respectivamente.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características del reactor de electrocoagulación y electrodos.

El diseño del reactor electrolítico se realizó en base a la revisión bibliográfica sobre reactores electrolíticos implementados en el tratamiento de electrocoagulación de aguas residuales.

Las características más importantes del reactor electrolítico son las siguientes:

División de la celda electrolítica.

Se optó por diseñar una celda electrolítica con una distribución volumétrica que consta de tres regiones, las cuales se describen a continuación:

a) Zona de sedimentación.

Esta zona fue destinada para el depósito de los lodos de precipitación o lodos más densos.

b) Zona de reacción.

Esta zona fue asignada para la ubicación de los electrodos así como también es la zona donde se efectúan las reacciones electroquímicas.

c) Zona de flotación.

Esta zona fue pensada para los lodos de flotación o lodos menos densos.

Además la celda electrolítica cuenta con:

- Compuerta ubicada en la zona de flotación: para el desalojo de las espumas que se generen durante el tratamiento de electrocoagulación.
- Orificio ubicado en la zona de sedimentación: para toma de muestras de lodos o agua durante la aplicación del tratamiento de electrocoagulación.

Tipo de material del reactor.

Debido a la gran cantidad de reportes existentes sobre reactores electroquímicos contruidos a partir de placas de acrílico que han sido aplicados en el tratamiento de aguas residuales por el método de electrocoagulación, se optó para el diseño de la

celda electrolítica para la electrocoagulación de nejayote, con este material, debido a que es un material aislante, posee dureza, transparencia, transmisión de luz, es liviano, tiene excelente resistencia térmica, química y mecánica y lo más importante es 100 % reciclable.

Capacidad del reactor.

La capacidad del reactor es de 790 mL, tomando en cuenta que el tratamiento electroquímico se realizará a nivel laboratorio.

Forma de operación del reactor.

La forma de operación del reactor es tipo batch, debido a la simplicidad para su manejo a escala laboratorio, ya que el objetivo principal es determinar el alcance del proceso.

Material de los electrodos.

Se optó por emplear ánodos de aluminio y cátodos de hierro debido a los resultados experimentales recabados por Pérez (2013), además de considerar las siguientes ventajas:

- Disponibilidad de los metales.
- Son buenos conductores de electricidad.
- Son materiales relativamente baratos.
- Amplia información bibliográfica en la que se reportan buenas remociones de contaminantes con estos materiales en la electrocoagulación de aguas residuales.

Número, Geometría y Disposición de los electrodos.

Se decidió emplear 3 ánodos de aluminio y 3 cátodos de hierro esto para conseguir una mayor área de contacto dentro del reactor y así obtener una buena disolución de iones metálicos. Los seis electrodos se colocaron de forma paralela alternando entre ánodos y cátodos.

Conexión eléctrica al reactor.

Se optó por utilizar una conexión eléctrica monopolar en paralelo.

Las características generales del reactor de electrocoagulación y los electrodos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Características del equipo de electrocoagulación.

Componentes del reactor electrolítico	Material	Características
Reactor	Polimetilmetacrilato	Celda multielectrónica rectangular.
		Tipo de operación: Batch.
		Dimensiones: a= 8 cm. l=11 cm. h= 9 cm. e= 3 mm.
		Capacidad: 790 mL.
Electrodos	Aluminio	Ánodos/ Cátodos: Aluminio/Hierro.
		Número de electrodos: 3 ánodos / 3 cátodos.
	Hierro	Especificaciones del material de los electrodos:
		<p>Aluminio Aleación: 1XXX (99.9 % de aluminio).</p> <p>Hierro Hierro puro sin aleaciones.</p>
Área superficial: 47 cm ² .		

a= ancho, l= longitud, h= altura, e= espesor.

En la Figura 3.1 se muestra los electrodos de hierro y aluminio contruidos de acuerdo a las especificaciones mostradas en la tabla 3.1.

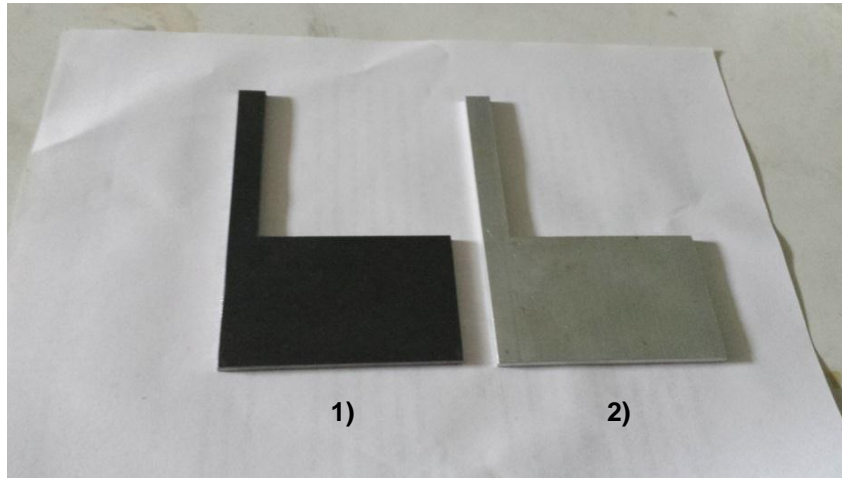


Figura 3.1. Electrodos: 1) Cátodo de hierro. 2) Ánodo de aluminio.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se presenta el reactor electrolítico construido para llevar a cabo el tratamiento de electrocoagulación de nejayote de acuerdo al diseño y especificaciones propuestas.

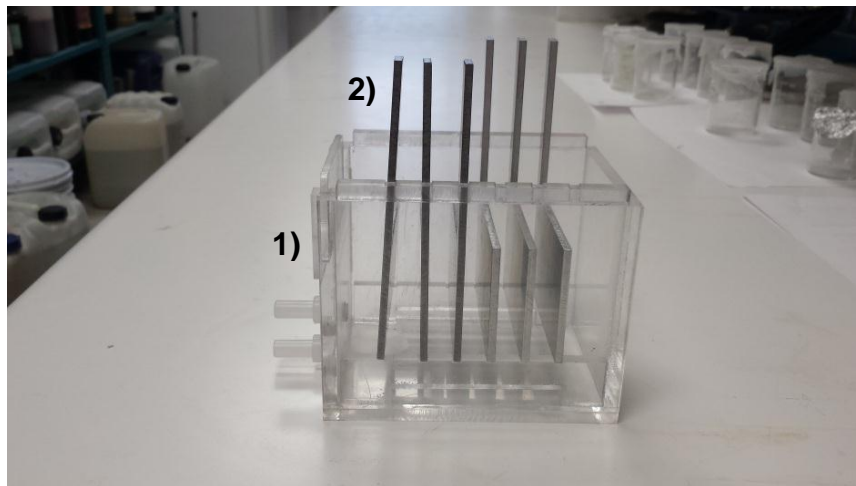


Figura 3.2. Equipo de electrocoagulación:

1) Reactor electrolítico. 2) Electrodos de aluminio y hierro.

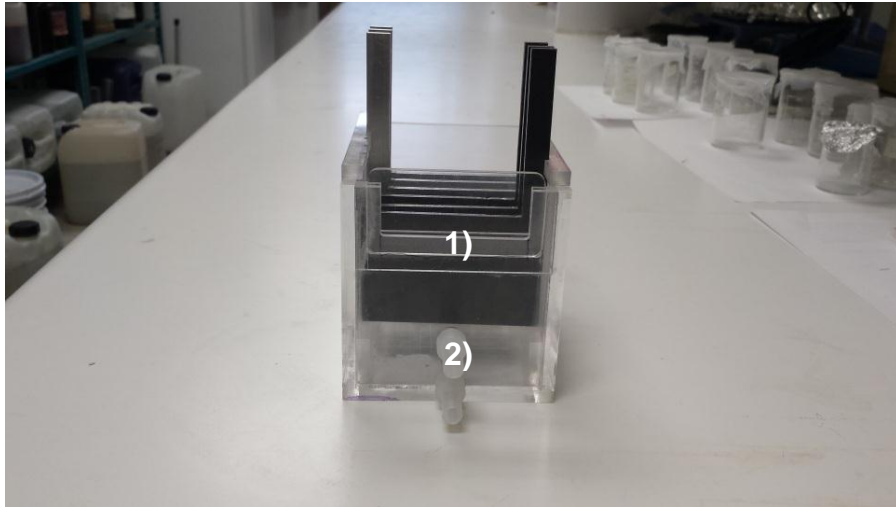


Figura 3.3. Reactor electrolítico:

1) Compuerta para evacuación de espumas. 2) Conexión para toma de muestras.

3.2 Características del agua residual de la nixtamalización o nejayote.

El agua residual de nejayote fue muestreada en un molino de nixtamal de la comunidad de San Baltazar Atlimeyaya perteneciente al municipio de Tianguismanalco, Puebla. El nejayote se obtuvo después del proceso de nixtamalización en el que se empleó maíz blanco cultivado en la comunidad de acuerdo a las costumbres técnicas de la región mediante un régimen hídrico de temporal agregando fertilizantes químicos y naturales. El grano de maíz cosechado se destinó para autoconsumo y venta.

En la Tabla 3.2, se muestran los resultados de la caracterización del nejayote, sin filtrar y filtrado, a temperatura ambiente (24 °C) y pH 12.4. Realizada con la finalidad de conocer las características físicas y químicas de dicha agua residual.

En la tabla podemos ver que el nejayote es un efluente altamente alcalino debido a que posee pH de 12.4, contiene elevada carga orgánica natural evaluada como DQO del orden de 24,000 mg/L y COT del orden de 8,000 mg/L, así como también presenta un alto contenido de color y turbidez y un elevado contenido inorgánico expresado como CaCO_3 del orden de 3,000 mg/L, lo cual le confiere una dureza muy elevada al nejayote lo que pudiera provocar incrustaciones y daños a las tuberías al ser desechado directamente en el alcantarillado público.

Tabla 3.2. Caracterización del agua residual de nixtamalización o nejayote.

Parámetro	Valores	
	Sin filtrar	Filtrado
Temperatura (°C)	24	24
pH	12.4	12.4
Turbidez (UNF)	2,384	171
Color (m⁻¹)	323.2	124.8
SDT (g/L)	3.43	3.18
DQO (mg/L)	34,224	24,675
Conductividad (µS/cm)	6.88	6.46
Ca⁺⁺ (mg/L)	1,521	1,370
CaO (mg/L)	ND	1,680
CaCO₃ (mg/m³)	ND	3,015
COT (mg/L)	ND	8,000
Polifenoles totales (g/L)	1.85	1.32
OD (ppm)	3.6	4.3

En la Figura 3.4, se muestran los espectros de absorción del nejayote filtrado, sin diluir y diluido 1:25 y 1:55. Los espectros de absorción de nejayote muestran que absorbe fuertemente en la región UV, es decir de 200 a 400 nm. Además la dilución de nejayote 1:55 permite observar una banda de intensidad fuerte con dos máximos en la región UV, entre 250 y 350 nm con una absorbancia de 3.0 u.a. y 2.8 u.a., respectivamente.

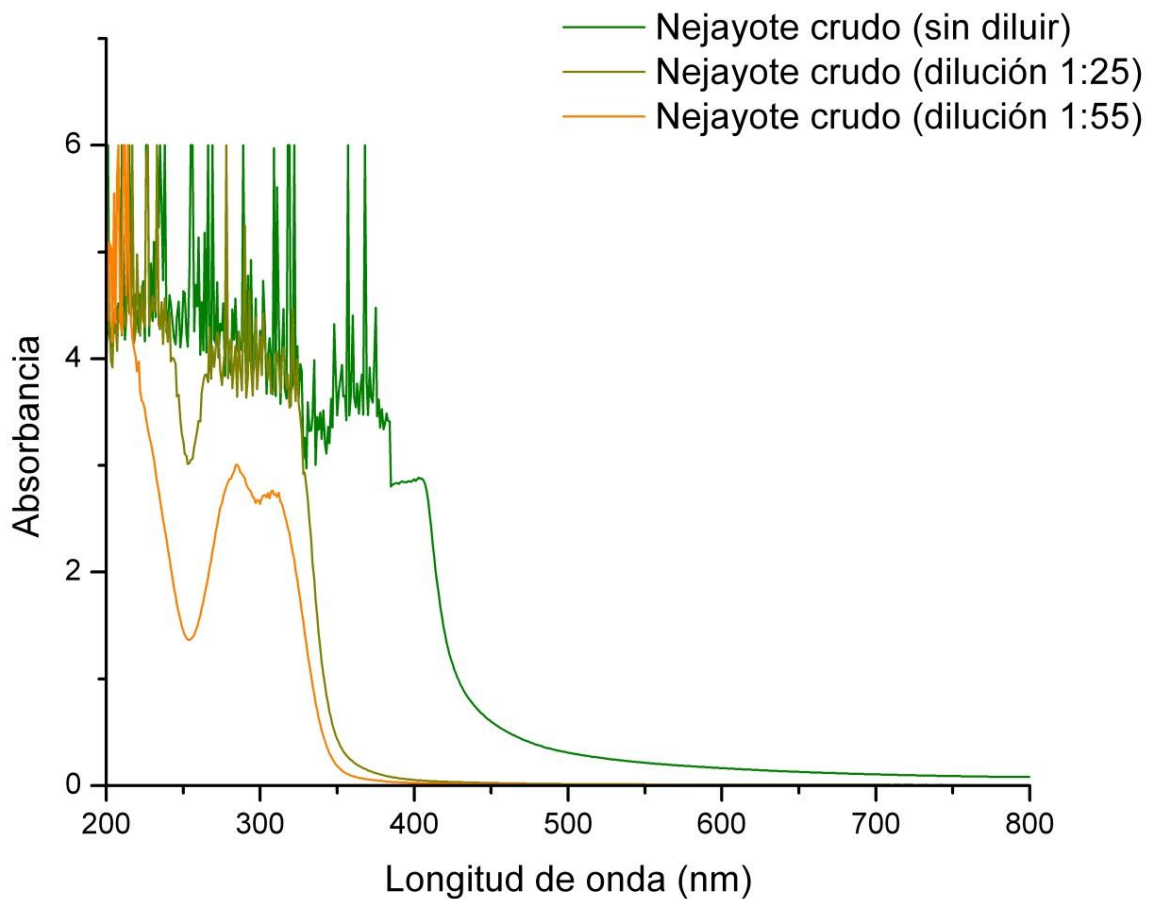


Figura 3.4. Espectros de absorción del nejayote crudo sin dilución y a distintas diluciones.

3.3 Tratamiento de electrocoagulación de nejayote.

Es importante señalar que el tratamiento de electrocoagulación aplicado en nejayote a diferentes valores de pH inicial utilizando 3 ánodos de aluminio y 3 cátodos de hierro se llevó a cabo, sin embargo se encontraron las siguientes desventajas:

- El volumen de agua de nejayote disminuye drásticamente durante la aplicación del tratamiento de electrocoagulación. El volumen de muestra inicial fue de 500 mL, obteniéndose un volumen final de 40 mL de nejayote tratado.

- Se generaron grandes cantidades de espumas, por lo tanto pérdida de volumen de agua.
- No fue posible incrementar los tiempos de electrólisis ya que el agua se evaporó rápidamente.
- Se obtuvieron bajas remociones de contaminantes.

Por lo tanto, el nejayote se sometió al tratamiento de electrocoagulación utilizando un arreglo de electrodos Al/Fe como ánodo/cátodo, es decir, un ánodo de Al y un cátodo de hierro. Posteriormente se analizó el efecto del pH y tiempo de electrólisis en función de la remoción de color, turbidez, DQO, COT y espectrofotometría UV-Visible.

3.3.1 Valoración del efecto del pH sobre la remoción de COT, DQO, color y turbidez.

Se analizó el efecto que tiene el pH en el tratamiento de electrocoagulación, para ello se realizaron experimentos a diferentes valores de pH (4.0, 5.0, 7.0, 8.0, 9.0 y 11.0). Los experimentos se realizaron en 500 mL de nejayote crudo filtrado, 9 V, 2.5 g de NaCl, 150 minutos de electrólisis y agitación constante. El arreglo de electrodos utilizado fue ánodo de aluminio y cátodo de hierro.

En la Figura 3.5, se muestran los porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez en función del pH esto para el nejayote tratado electroquímicamente. En la siguiente figura se puede apreciar que el parámetro de color fue el que se logró remover en mayor proporción, esto se consiguió casi para todos los valores de pH, excepto para pH 4.0. El parámetro de turbidez mostró un comportamiento muy irregular además de que se obtuvieron muy bajas remociones casi para todos los valores de pH; sin embargo a pH 9.0 y pH 5.0 se consiguieron buenas remociones de turbidez. El COT presentó un comportamiento más regular excepto a pH 4.0 donde disminuye el porcentaje de remoción en comparación con los demás valores de pH. El porcentaje máximo de remoción de la DQO se obtuvo a pH 5.0 y el valor más bajo de remoción de DQO fue a pH 4.0.

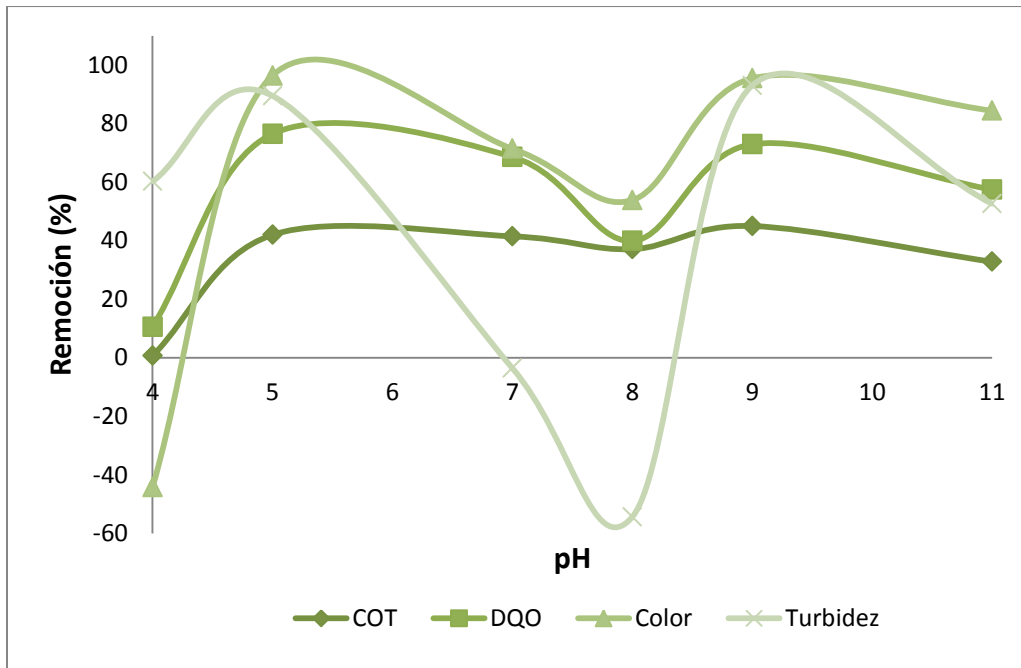


Figura 3.5. Porcentaje de remoción de color, turbidez, DQO y COT en función del pH.

En la Tabla 3.3 se muestran los valores y porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez obtenidos al final de cada tratamiento. En la siguiente tabla se puede ver que el parámetro de color presentó los porcentajes mas altos de remoción a pH 5.0 y pH 9.0 con valores de 96.39 % y 95.43 %, respectivamente, para pH 7.0 y pH 11.0 el porcentaje de remoción fue de 71.39 % y 84.37 %, respectivamente y a pH 4.0 no hubo remoción de color ya que se obtuvo un valor negativo. La turbidez se removió mejor a pH 9.0 y pH 5.0 con 92.98% y 89.47%, respectivamente. Con pH 7.0 y 8.0 no se consiguieron remociones de turbidez al obtenerse valores negativos. El COT se eliminó en mayor porcentaje a pH 9.0 con un 45 %, seguido de un 42 % para pH 5.0, 41.48 % a pH 7.0 y para pH 4.0 no se consiguió casi ninguna remoción debido a que apenas se obtuvo un porcentaje de 0.66%. El porcentaje máximo de remoción de la DQO se obtuvo a pH 5.0, alcanzando un valor de 76.44 %; sin embargo a pH 9.0, también se obtuvo un porcentaje alto de remoción de 72.91%, seguido de un 68.61% de remoción a pH 7.0, a pH 8.0 y 11.0 la remoción fue de 39.90 % y 57.43 %, respectivamente y finalmente al disminuir el pH a 4.0 la remoción de la DQO disminuye hasta un porcentaje bajo de 10.56 %.

Tabla 3.3 Resultados experimentales y porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez con respecto al pH.

pH _i	COT (mg/L)	DQO (mg/L)	Color (1/m)	Turbidez (UNF)	% de Remoción			
					COT	DQO	Color	Turbidez
4.0	7947	22068	180	68	0.6	10.5	-44.2	60.2
5.0	4641	5811	4.5	18	42	76.4	96.3	89.4
7.0	4681	7743.5	35.7	177	41.4	68.6	71.3	-3.5
8.0	5032	14828	57.6	264	37.1	39.9	53.8	-54.3
9.0	4400	6682	5.7	12	45	72.9	95.4	92.9
11.0	5377	10504	19.5	81	32.7	57.4	84.3	52.6

Los espectros de absorción UV-Visible (200-800 nm) de las muestras de nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes valores de pH inicial se muestran en la Figura 3.6.

El espectro UV-Visible de la Figura 3.6 muestra la influencia del pH sobre el comportamiento del pico de absorción en la región de 200 a 800 nm. En la figura se puede ver que la intensidad de absorción del pico característico (283 nm) en la región UV (200–400 nm) varía en función del valor del pH. Así como también se puede ver que la absorbancia de las muestras de nejayote tratado electroquímicamente comparada con la absorbancia del nejayote crudo disminuyó notablemente. Por lo que la mayor intensidad del pico de absorción para las muestras de nejayote tratado fue a pH 4.0 con una absorbancia de 3.5 u.a., seguida de un valor de 3.1 u.a. para pH 7.0, en cuanto al pH 8.0, 9.0 y 11.0 la absorbancia es similar con un valor cercano a 3 u.a. y fue a pH 5.0 que se obtuvo el valor más bajo de absorbancia igual a 2.4 u.a., lo cual indica que la muestra de nejayote tratada a pH 5.0 presenta una menor concentración lo que significa una mayor remoción de contaminantes.

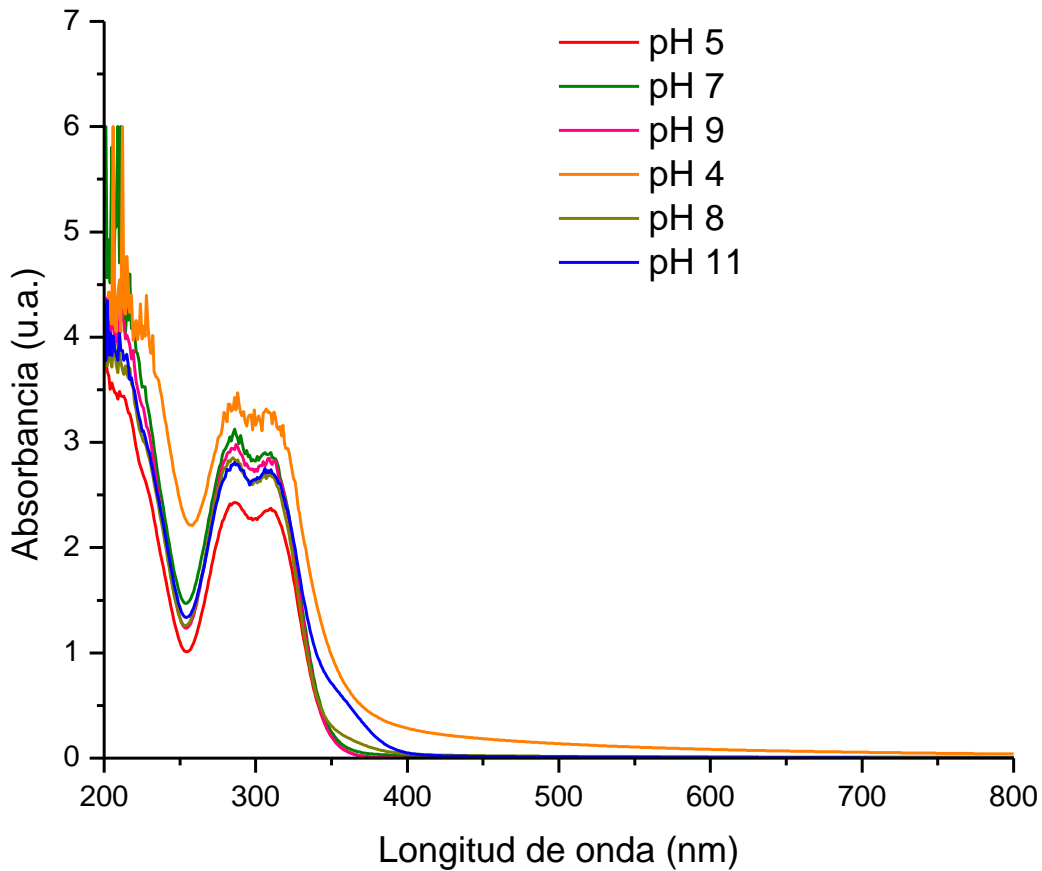


Figura 3.6 Espectros de absorción de nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes valores de pH inicial (dilución 1:35).

3.3.2 Valoración del efecto del tiempo de electrólisis sobre la remoción de COT, DQO, color y turbidez.

Se realizó una serie de experimentos de electrocoagulación de nejayote a diferentes tiempos de electrólisis, esto con la finalidad de conocer el efecto sobre la remoción de COT, DQO, color, turbidez y espectrofotometría UV-Visible. Los experimentos se llevaron a cabo a 150, 180 y 210 minutos de electrólisis. Todos los experimentos se realizaron a pH 5.0 valor seleccionado previamente debido a que se obtuvo en la mayoría de los parámetros el mayor porcentaje de remoción. El volumen de muestra fue de 500 mL, 9 V, 2.5 g de electrolito y agitación constante.

En la Figura 3.7 se muestra la remoción de COT, DQO, color y turbidez a diferentes tiempos de electrólisis. En la figura se puede ver que hubo una mayor remoción de color y turbidez a 150 minutos de electrólisis, la remoción disminuye drásticamente a 180 minutos de electrólisis y a 210 minutos de electrólisis la remoción de color y turbidez aumenta ligeramente pero sin rebasar los porcentajes obtenidos a 150 minutos. La DQO se removi6 mejor a menor tiempo de electrólisis ya que al ir aumentando el tiempo de electrólisis la remoci6n de DQO disminuye. Para el caso del COT se logr6 una mejor remoci6n en un tiempo medio de 180 minutos, seguido por una buena remoci6n a 210 minutos de electrólisis y un porcentaje de remoci6n menor a los 150 minutos de electrólisis.

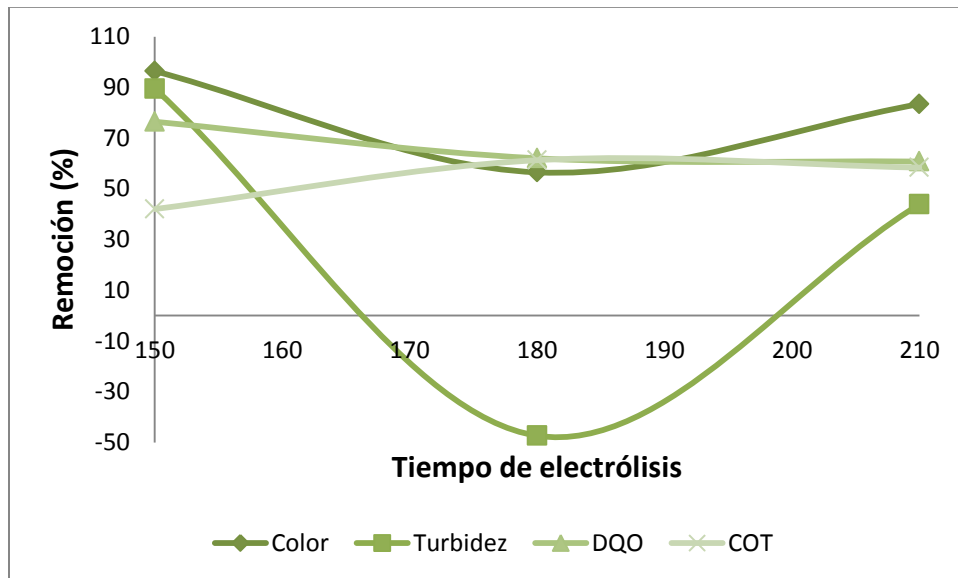


Figura 3.7. Porcentaje de remoci6n de color, turbidez, DQO y COT en funci6n del tiempo de electrólisis.

En la Tabla 3.4, se puede apreciar que el porcentaje m6ximo de remoci6n de COT fue de 61.27 % a 180 minutos de electrólisis, seguido de un 58.35 % a 210 minutos de electrólisis y de 42 % a 150 minutos de electrólisis. Con estos resultados se puede concluir que a mayor tiempo de electrólisis ocurre una mejor remoci6n de

contaminantes pero al incrementar más el tiempo del tratamiento los electrodos pueden sufrir una pasivación ocasionada por el incrustamiento de lodo en su superficie lo que disminuye la eficiencia del tratamiento para la remoción de contaminantes. El máximo porcentaje en la remoción de DQO fue de 76.44 % al menor tiempo de electrólisis (150 minutos) y al ir aumentando el tiempo de electrólisis la remoción de DQO disminuye a 62.03% y 60.75 % a 180 y 210 minutos de electrólisis, respectivamente. En cuanto al parámetro de color se obtuvo un buen porcentaje de remoción de 96.39 % a menor tiempo de electrólisis (150 minutos), al aumentar el tiempo de electrólisis a 180 minutos disminuyó la remoción de color a 56.49 % y a 210 minutos el porcentaje aumenta nuevamente a 83.41 %. Para el caso de la turbidez la máxima remoción fue de 89.47 % a 150 minutos, a 180 minutos no hubo remoción de turbidez pues se obtuvo un valor negativo y por último a 210 minutos la remoción fue baja con 43.85 %.

Tabla 3.4 Resultados experimentales y porcentajes de remoción de COT, DQO, color y turbidez a diferentes tiempos de electrólisis.

Tiempo de electrólisis (min.)	COT (mg/L)	DQO (mg/L)	Color (1/m)	Turbidez (UNF)	% de Remoción			
					COT	DQO	Color	Turbidez
150	4640	5811	4.5	18	42	76.44	96.39	89.47
180	3098	9368	54.3	252	61.27	62.03	56.49	-47.36
210	3332	9684	20.7	96	58.35	60.75	83.41	43.85

En la Figura 3.8 se muestran los espectros de absorción del nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes tiempos de electrólisis, pH 5, 9 V y 2.5 g de NaCl. Los experimentos se realizaron en 500 ml de nejayote crudo filtrado, empleando un arreglo de electrodos ánodo/cátodo (Al/Fe).

En la figura siguiente se puede observar que a 180 minutos de electrólisis se obtiene la absorbancia más baja con un valor de 2.0 u.a., a 210 minutos de electrólisis la absorbancia aumenta hasta un valor de 2.4 u.a, y a menor tiempo de electrólisis (150

minutos) se obtiene una absorbancia mayor con un valor de 2.5 u.a. Por lo que se puede concluir que este parámetro no fue tan significativo para la remoción de contaminantes ya que solamente hay una variación de 0.5 unidades entre el valor máximo y el valor mínimo de absorbancia a diferentes tiempos de electrólisis.

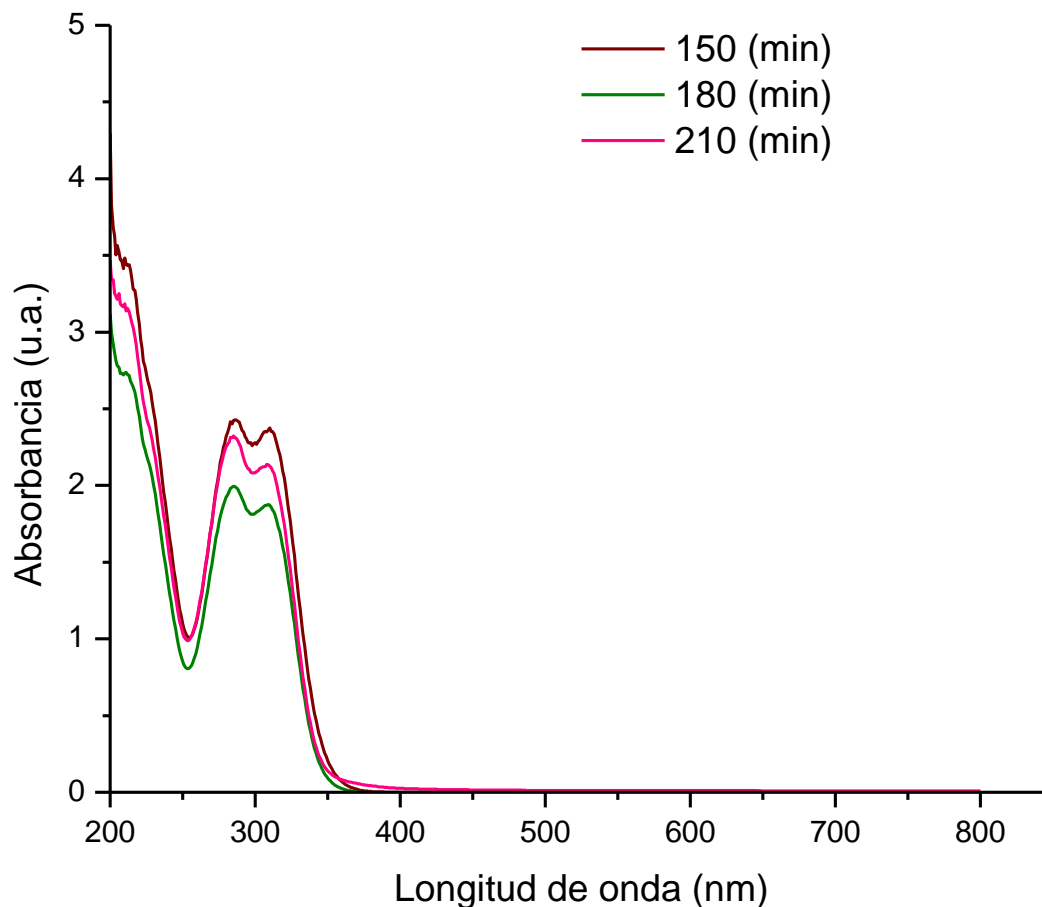


Figura 3.8. Espectros de absorción de nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes tiempos de electrólisis.

3.3.3 Nejayote tratado por electrocoagulación.

En la Figura 3.9 se muestra una comparación entre el nejayote crudo y el nejayote tratado electroquímicamente a distintos valores de pH, a partir de las condiciones óptimas de operación Al/Fe como ánodo/cátodo, tiempo de electrólisis de 150 minutos,

diferencia de potencial de 9 V, 2.5 g/L de NaCl como electrólito y agitación magnética constante.

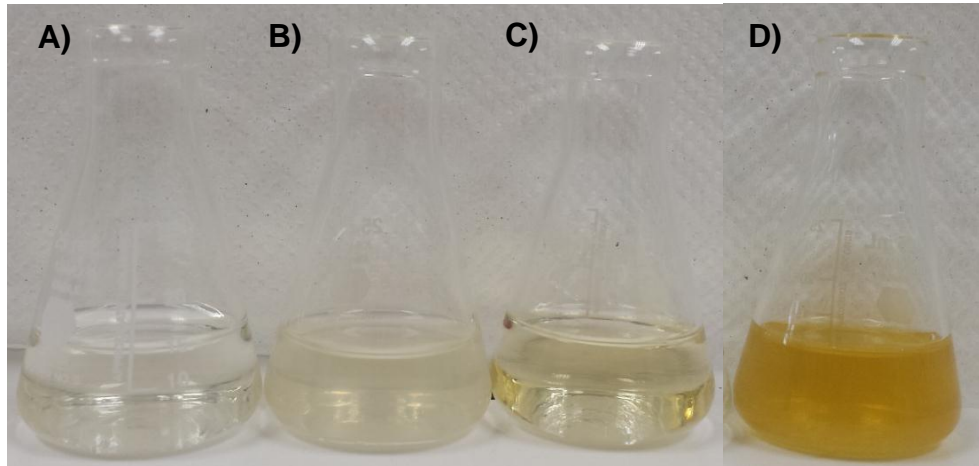


Figura 3.9. Comparación entre nejayote crudo (D) y nejayote tratado por electrocoagulación a diferentes pH: A) pH 5.0. B) pH 7.0. C) pH 9.0.

En la figura anterior se observa claramente que el agua de nejayote tratada por electrocoagulación a pH 5.0 presenta menos color en comparación con el nejayote tratado a pH 7.0 y pH 9.0, mientras que el agua de nejayote tratada a pH 9.0 presenta menor turbidez. Así como también es posible observar claramente la disminución de color y turbidez en las muestras de nejayote tratado electroquímicamente y el nejayote crudo lo que demuestra la efectividad del tratamiento de electrocoagulación en la remoción de contaminantes presentes en el agua de la nixtamalización o nejayote.

CONCLUSIONES

Con el trabajo de investigación realizado podemos concluir lo siguiente:

- El agua de nejayote cruda obtenida de la nixtamalización de maíz blanco, criollo, de acuerdo a su caracterización presenta pH altamente alcalino de 12.4, valores elevados de color y turbidez, alto contenido de materia orgánica expresada como DQO, del orden de 24000 mg/L y COT del orden de 8000 mg/L. Así como también posee una dureza elevada al presentar un alto contenido de CaCO_3 del orden de 3000 mg/L.
- Se logró construir e implementar el reactor electroquímico en el tratamiento de electrocoagulación del agua residual de nejayote. Aunque no fue posible encontrar las condiciones óptimas de operación debido a que no se obtuvieron resultados favorables utilizando seis electrodos en el reactor electroquímico. Como medida opcional se decidió disminuir el número de electrodos empleados durante el tratamiento.
- El tratamiento de electrocoagulación de nejayote con una configuración de electrodos ánodo/cátodo (Al/Fe), 500 mL de muestra, tiempo de electrólisis de 150 minutos, diferencia de potencial de 9 V, concentración de electrolito 5 g/L y agitación constante, se obtienen las mayores remociones del 76.44 % y 96.39 % para color y DQO a pH 5.0, mientras que para COT y turbidez del 45 % y 92.98 % a pH 9.0, respectivamente.

REFERENCIAS.

- Arango, R. A y Garcés, G. L. F. (2007). *Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea*. Revista Universidad EAFIT. 43 (147). pp. 56-67.
- Aristizábal, A. (2006). *Electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales de la Industria Textil*.
- Asaff, A., Reyes, Y., Martínez, A., Pérez, N., Aceves, A y Alejo, L. (2011). *Desarrollo de la Cadena de Valor de los Efluentes de la Industria del Nixtamal*. XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Aylward, B., Bandyopadhyay, J y Belausteguigotia, J. *Freshwater Ecosystem Services*. Chapter 7: Fresh Water. In: Millennium Ecosystem Assessment. Volumen 1: Conditions and Trends Working Group Report. Island Press.
- Chávez, P. Á, Cristancho, M. D. L, Ospina, G. É. (2009). *Una alternativa limpia para el tratamiento de las aguas residuales galvánicas: Revisión bibliográfica*. Revista Ingenierías Universidad de Medellin. 8 (14). pp. 39-50.
- Chen, G. (2004). *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. Separation and purification technology. 38 (1). pp. 11-41.
- FAO, 2001. *El maíz en los Trópicos, mejoramiento y producción*. Depósito de documentos de la FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma.
- Global Water Systems. (2005). *Sistemas de tratamiento para las aguas residuales mediante la tecnología de electrocoagulación*. Fecha de consulta (1 de Julio de 2014) <https://www.u cursos.cl/ingeniería/2008/1/EI2A1/12/.../11613>.
- Gutiérrez, U. J.A., Rojas, G. C.; García, L.S. y Serna, S. S.O. (2010). Phytochemical analysis of wastewater (nejayote) obtained after lime-cooking of different types of

- maize kernels processed into masa for tortillas. *Journal of Cereal Science*. 52, pp. 410-416.
- INEGI (2013). Estadística básica sobre medio ambiente. Boletín de prensa número 121/13. Aguascalientes, Ags.
- Jiang J.Q., Graham N., André C.A., Kelsall G.H., Brandon N., 2002. Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment, *Water Research*, pp. 4064-4078.
- Linares, H. I.; Martínez, M. V.; Barrera, D. C.; Pavón, R. S.; Bernal, M. L. y Lugo, L. V. (2011). *Oxidación de materia orgánica persistente en aguas residuales industriales mediante tratamientos electroquímicos*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*. 2 (1). pp. 21-36.
- Mollah, A. y Yousuf, M. (2001). Electrocoagulation (EC) - Science and application. *Journal of Hazardous Materials*. 84 (1). pp.112-122.
- Mollah, M. (2004). *Fundamentals, present and future prespectives of electrocoagulation*. *Journal oh Hazarfous Materials*, 144 (1-3).pp.199-210.
- Nolasco, S. H. (2010). *Transformando riesgos en oportunidades: del nejayote a la vainillina*. *Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México*. 3 (60).
- NOM-003-SCFI-1980. *Muestreo de aguas residuales*.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. *Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*.
- Ochoa A., Vinegra-González G. (2008). *Temas selectos de la cadena maíz-tortilla*. México, D.F. Talleres de la Sección de Impresiones y Diseño de la UAM-I. pp. 144.
- Paredes, L. O, Guevara, L F y Bello, P. L. A. (2009). *La Nixtamalización y el valor nutritivo del maíz*. *Ciencias* 92-93. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.

- Pérez, G. P. (2013). *Estudio de coagulación química y electrocoagulación de nejayote empleando un electrodo de aluminio como ánodo*. Tesis de licenciatura. Benemérita universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
- Portillo, V. M. (2007). Alternativas para el maíz en México. Universidad Autónoma Chapingo. CIESTAMM. México. pp. 16.
- Ramírez A, T. (2010). Electroquímica, flotación y electricidad.
- Ramírez, R. G. (2011) “Eliminación de sólidos suspendidos en nejayote y manejo para su reutilización” en *Memorias del Simposium Internacional sobre Tecnologías Convencionales y Alternativas en el Procesamiento de Maíz*. Chihuahua, Chihuahua. México, agosto.
- Reyes, M. Y. (2012). Investigación, desarrollo tecnológico e innovación para el cuidado y reuso del agua. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, 20(1). 17-23.
- Rodríguez, R. E. (1996). *El nejayote y su importancia para la investigación tecnológica*. Laboratorio de Bioprocesos. Revista de divulgación. pp. 23-34.
- Rosentrater, K. A., 2006. *A review of corn masa processing residues: generation, properties, and potential utilization*. Waste Management 26. pp. 284–292.
- SAGARPA (2013). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.
- Secretaría de Economía (2012). Análisis de la cadena de valor Maíz-Tortilla: Situación actual y factores de competencia local. Dirección general de industrias básicas. México.
- Vepsäläinen, M. (2012). *Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters*. Science Dissertation 19. VTT Science 19. pp. 4-45.