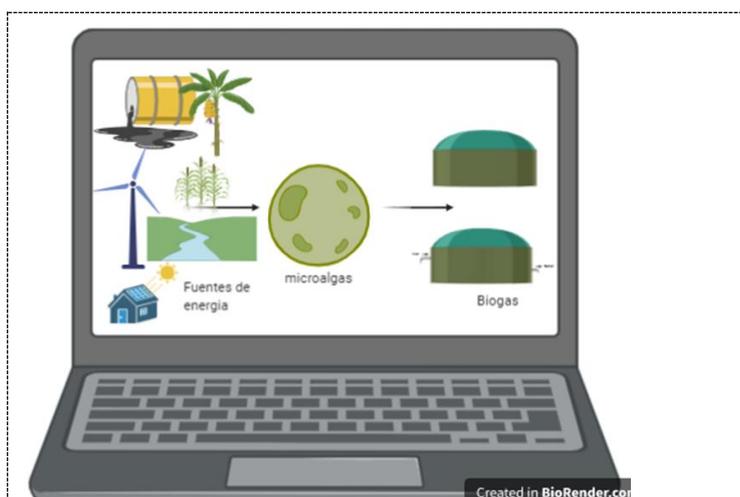


Análisis del proceso electro-Fenton como pretratamiento de la biomasa producida por la microalga (*Chlorella sp*) con el fin de mejorar la producción de biocombustible

Analysis of the electro-Fenton process as a pretreatment of the biomass produced by microalgae (*Chlorella sp*) in order to improve the production of biofuels



La producción de biogás a partir de microalgas *Chlorella sp.*, es una de los mecanismos más amigables con el medio ambiente, considerada energía renovable y no requiere de grandes extensiones de tierra para su producción.

Análisis del proceso electro-Fenton como pretratamiento de la biomasa producida por la microalga (*Chlorella sp*) con el fin de mejorar la producción de biocombustibles

Analysis of the electro-Fenton process as a pretreatment of the biomass produced by microalgae (*Chlorella sp*) in order to improve the production of biofuels

Adenys Rodríguez Rey

**Programa de Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Antonio Nariño.*

Dirigido por: Dr. Jaime Vargas Rodríguez

RESUMEN

El mundo atraviesa una crisis ambiental, una de sus consecuencias, es el calentamiento global generado por actividades humanas, como el empleo de combustibles fósiles para generar energía. En esta revisión se abordó la situación de los combustibles en los últimos años, haciendo énfasis en los biocombustibles. Se compararon las diferentes materias primas para la síntesis de biocombustibles, haciendo énfasis en la producción a partir de microalgas (*Chlorella sp*). Se describieron las propiedades biológicas de la microalga (*Chlorella sp*), se compararon diferentes pretratamientos utilizados para generar la disrupción en la pared celular, la cual es altamente recalcitrante, siendo este el principal obstáculo a vencer con el fin de mejorar la producción de biocombustibles. Finalmente se

presentó una perspectiva del pretratamiento de electro-Fenton en biomasa de la microalga (*Chlorella sp*) con el fin de mejorar la producción de biocombustibles.

PALABRAS CLAVE: microalgas, electro-Fenton, biocombustible.

ABSTRACT

The world is going through an environmental crisis, one of its consequences is global warming generated by human activities, such as the use of fossil fuels to generate energy. This review addressed the fuel situation in recent years, with an emphasis on biofuels. The different raw materials for the synthesis of biofuels were compared, emphasizing the production from microalgae (*Chlorella* sp). The biological properties of the microalgae (*Chlorella* sp) were described, different pretreatments used to generate disruption in the cell wall, which is highly recalcitrant, were compared, this being the main obstacle to overcome in order to improve the production of biofuels. Finally, a perspective of the pretreatment of electro-Fenton in microalgae (*Chlorella* sp) biomass was presented in order to improve the production of biofuels.

KEY WORDS: microalgae, electro-Fenton, biofuel.

ABREVIATURAS

- **CO₂**: Dióxido de carbono
- **EF**: Electro-Fenton
- **Fe²⁺**: Ion ferroso
- **Fe³⁺**: Ion ferrico
- **GEI**: Gases de efecto invernadero
- **H₂O₂**: Peroxido de hidrógeno
- **H₂SO₄**: Ácido sulfúrico
- **•OH**: Radical hidroxilo

1. INTRODUCCIÓN

1.1 REVISIÓN DE LITERATURA

En las últimas décadas se han venido buscando nuevas fuentes de energía renovables que permitan disminuir el daño de los ecosistemas, estas fuentes de energía deben ser amigables con el medio ambiente, es por esto que se han venido desarrollando nuevos pretratamientos que contribuyan en la producción de biocombustibles sustentables y renovables, ayudando así a cubrir la demanda energética necesaria para las actividades humanas (Fernando Daniel Ramos y Col. 2016).

Las principales fuentes de energía empleadas en la actualidad, son el petróleo, el carbón y el gas natural que además de ser energías no renovables, son la principal fuente de contaminación y daño ambiental generado tanto en la producción como en el empleo de éstas (Dudley 2019), ya sea por la acumulación de GEI, la contaminación de aguas, el debilitamiento de la tierra y/o deforestación (Carlos Fernández-Linares y col. 2012).

Una de las alternativas en la producción de biocombustible que se ha venido posicionando en el mercado mundial, es obtener biocombustible a partir de la digestión anaeróbica de biomasa microalgal. El biocombustible obtenido a partir de biomasa de microalgas permitirá evitar problemas asociados a combustibles convencionales (Subía y Rubio Aguiar 2018).

La biomasa de microalgas se puede obtener por cultivos en sistema de laguna, en biorreactores o en el tratamiento de aguas residuales, por lo que no tienen que competir por tierras fértiles utilizadas para la producción de alimentos. Así mismo se controla la deforestación y no se atenta contra la seguridad alimentaria (Hernández-Perez y Col. 2014).

La microalga requiere CO₂ como principal fuente de carbono en la obtención de biomasa, lo que permite disminuir las concentraciones de CO₂ presente en la atmósfera. El biogás producido a partir de las microalgas se dispone en tanques de almacenamiento, lo que no permite el efecto invernadero (Neumann y Jeison 2015). En la producción de

biocombustibles se han empleado diferentes especies de microalgas y procesos, para generar un mecanismo viable, eficiente y económico. Cada especie de microalga, presenta características específicas que permiten diferenciarlas entre sí y, estas características son esenciales en la selección de la especie que mejor se acople a los procesos de obtención de biocombustibles (Luis y Suárez 2014).

Uno de los principales puntos a tener en cuenta en este proceso, es el pretratamiento para romper la pared celular microalgal, pues su compleja estructura y composición dificulta el proceso de ruptura, y de este modo el proceso que permita obtener la mayor producción de biocombustible (Passos y Col 2015).

Se han utilizado procesos físicos (ultrasonido), químicos (enzimas) y biológicos (rumen bovino). Los procesos de ultrasonido y enzimas han resultado ser muy costosos, debido a su complejidad (Bermúdez y Col. 2013). En los procesos con rumen bovino, para obtener una significativa producción de biocombustible, se requiere de grandes extensiones de tierra empleadas exclusivamente a la ganadería (Guillermo Berra y Col. 2014).

El proceso Fenton y su variación EF como pretratamiento en biomasa de microalgas *Chlorella sp* parece ser una buena alternativa para disminuir costos y hacer el proceso eficiente y económicamente viable. Cada vez son más los estudios realizados en torno al EF (Concas y Col. 2015)(Zhang y col. 2020).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las áreas urbanas cada vez van teniendo un crecimiento más acelerado, lo que trae consigo el aumento de la demanda energética mundial, según International Energy Agency (AIE) de los Estados Unidos, de continuar este ritmo de crecimiento poblacional al 2040, se elevara más de un cuarto la demanda energética mundial (International Energy Agency 2013). Vale la pena resaltar que este aumento sería dos veces mayor de no ser por la búsqueda y las continuas mejoras de los procesos en la obtención de energías renovables (Badii, Guillen, Abreu 2016). Sin embargo, la principal fuente de energía actualmente sigue siendo el petróleo. Desde 2013 el consumo ha venido en aumento 91,8 millones de barriles día hasta 101.6 millones de barriles día en 2020, según datos de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP) (Zhang y col. 2020).

La sustitución de las fuentes de energía no renovables, está avanzando a pasos agigantados en cuanto a investigación se trata, pero ha tomado mucho más tiempo para ser implementados, pues estos procesos deben ser lo suficientemente eficientes para cubrir las necesidades energéticas que requieren las actividades del ser humano (André, F. J., De Castro, L. M., y Cerdá. 2012).

Existen los biocombustibles de primera generación, aquellos procedentes de cultivos que tradicionalmente han sido utilizados para la alimentación (soya, caña de azúcar, maíz, cebada, entre otros), los cuales generan presión en los mercados de alimentos, destrucción de bosques y escases de agua. Los biocombustibles de segunda generación, producidos a partir residuos agrícolas o forestales compuestos principalmente por celulosa (material lignocelulósico), pueden generar cambios en las propiedades de la tierra y por ende otros usos. Los biocombustibles de tercera generación, como es el cultivo de microalgas que no presentan los problemas de los dos anteriores (Ruvira 2016).

La etapa más compleja en la producción de biocombustible a partir de microalgas, es la

disrupción de su pared celular, y los procesos más usados han resultado ser costosos y complejos. En ésta monografía se revisa y compara los pretratamientos de disrupción de la pared celular de biomasa microalgal de *Chlorella sp.*, para finalmente hacer énfasis en el proceso de EF, como alternativa potencial de pretratamiento en la biomasa microalgal.

2. OBJETIVO

Realizar un análisis bibliométrico del proceso electro-Fenton como pretratamiento en biomasa producida por microalgas *Chlorella sp* en la producción de biocombustible.

2.1 Objetivo específico

Comparar mediante revisión bibliométrica si el proceso electro-Fenton como pretratamiento en biomasa de microalgas *Chlorella sp* puede ser más eficiente que otros procesos para producir biocombustible.

3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta revisión se empleó la base de datos Scopus (<https://www.scopus.com/>) y Web of Science (<https://login.webofscience.com/>). Los artículos referenciados se obtuvieron de bases de datos disponibles, tales como Elsevier, Google académico, Scielo y Springer.

La revisión implicó 4 etapas: (1) Base teórica de referencia, (2) Elaboración de una matriz comparativa de los principales métodos de obtención de biocombustible a partir de biomasa de *Chlorella sp*, (3) Reporte bibliométrico y (4) Análisis del proceso de EF como pretratamiento más eficiente de biomasa *Chlorella sp* en la obtención de biocombustible.

1. Base teórica de referencia

Se tomó la información correspondiente de los términos generales que connotan el objetivo general (realizar un análisis bibliométrico del proceso EF como pretratamiento en biomasa producida por microalgas *Chlorella sp* en la producción de biocombustible), para permitir una mayor contextualización de sus principales aspectos.

2. Reporte bibliométrico

Se realizó una revisión en la base de datos Scopus y Web of Science de los artículos reportados del proceso EF, específicamente la aplicación en biomasa de *Chlorella sp* para producir biocombustible.

3. Elaboración de una matriz comparativa de los principales procesos de disrupción celular para obtener de biocombustible a partir de biomasa de *Chlorella sp*

Se comparó mediante revisión bibliométrica cada uno de los pretratamientos más usados en la disrupción de la pared celular de biomasa microalgal de *Chlorella sp*,

para la producción de biocombustibles. Teniendo en cuenta la información obtenida se elaboró una matriz comparativa, la cual incluyó las siguientes variables: nombre del pretratamiento, reactivos, temperatura, tipo de extracción y rendimiento.

4. Análisis del proceso de EF como pretratamiento más eficiente de biomasa *Chlorella sp* en la obtención de biocombustible

Teniendo en cuenta la matriz comparativa, se evaluó el proceso EF como pretratamiento de biomasa de *Chlorella sp* más eficiente en la obtención de biocombustibles, se tuvo en cuenta parámetros de operación del sistema como pH, electrolito soporte, materiales de los electrodos, densidad de corriente.

4. ESTADO DEL ARTE

4.1 Marco teórico

4.1.1 *Chlorella sp*

Microorganismo unicelular verde de forma elipsoidal, sin flagelo, crece aproximadamente 8 µm de diámetro (figura 1). Fue descubierta en 1890 por Martinus Willem Beijerinck, clasificada en el filo *Chlorophyta*, familia de las *Chlorophyceae*. Se multiplica rápidamente mediante fotosíntesis, requiriendo luz solar, CO₂, agua y pequeñas cantidades de minerales (Hernández-Pérez, Labbé. 2014). Su supervivencia se atribuye a dos características fundamentales: a) Pared celular muy resistente, lo que le da la capacidad de coexistir en lugares con concentraciones altas de pesticidas, toxinas, microorganismos y metales pesados, b) Reproducción rápida de forma asexual, en un tiempo de 17 a 20 horas (figura 2), en temperaturas que oscilan entre 12°C y 25 °C (Infante y col. 2012). La división celular y el crecimiento son afectados por los fotoperiodos y la intensidad de la luz, lo que permite convertir la energía solar en biomasa con una eficiencia de 2 a 5 veces mayor que las plantas superiores, aspecto atribuido al factor decrecimiento de *Chlorella sp* presente en el núcleo de cada célula (Ángel Darío González-Delgado, Andrés Fernando Barajas-Solano 2017).

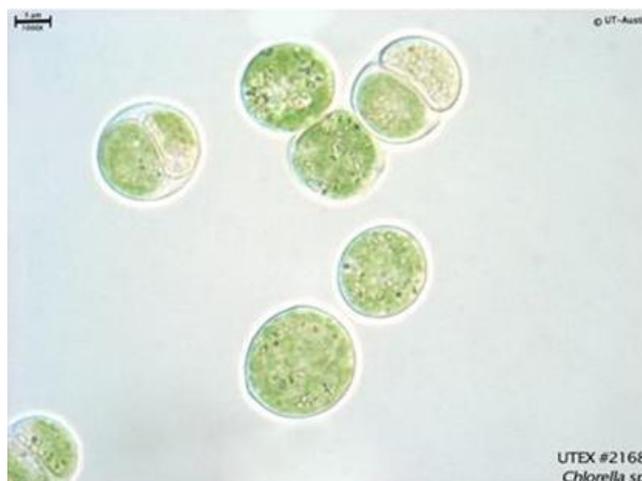


Figura 1. *Chlorella sp.*

Fuente: (Culture collection of algae at the University of Texas at Austin 2021)

Las microalgas están naturalmente protegidas por su pared celular de lignocelulosa compuesta por celulosa, hemicelulosa y pectinas, lo que las hace altamente recalcitrantes e impide la disrupción celular, frenando la liberación de su contenido citoplasmático (Aderemi y col. 2015). Además, su alto contenido en proteínas, permite que durante la maduración incrementa gradualmente el espesor de la pared celular donde se detecta una capa microfibrilar que da rigidez adicional a la pared celular y mejora la resistencia (Domozych y col. 2012).

Aunque las microalgas *Chlorella sp* tienen una pared celular muy resistente, la microalga *Scenedesmus obliquus* tiene una de las paredes celulares más resistentes ya que tienen una estructura trilaminar de celulosa y hemicelulosa rica en esporopolenina y politerpenos (Voigt y col. 2014). Sin embargo, la *Chlorella sp* ha sido considerada como una de las mejores microalgas para la remediación de aguas residuales debido a su alto potencial para remover amonio y fósforo (Safi y col. 2019). Es por esto que se requiere de tratamientos robustos para romper la pared celular de estas microalgas, ya que las capas exteriores de la pared son resistentes a tratamientos con enzimas líticas, y tratamientos químicos no

oxidativos (Brennan, Owende. 2010).

Uno de los factores más importantes para lograr una producción de microalgas a escala comercial que sea económica y ambientalmente factible es el desarrollo de sistemas de cultivos sostenibles y rentables, controlando parámetros como el pH, temperatura, intensidad de la luz y concentración de nutrientes (Camilo y col. 2016).

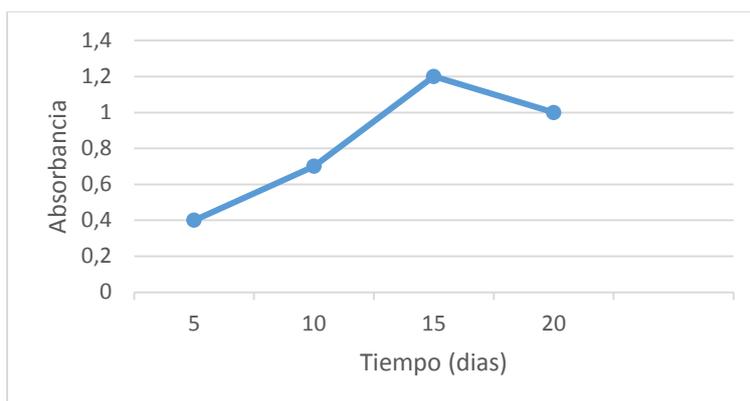


Figura 2. Curva de crecimiento microalga Chlorella sp.

Fuente: adaptado de (Vacca Jimeno, Victor Alexander y col. 2017).

4.1.2 Biocombustibles

Los biocombustibles, son combustibles derivados de biomasa, ya sea, materia vegetal, algas o desechos animales. Se consideran una fuente de energía renovable, dado que la materia prima se puede reponer fácilmente, a diferencia de los combustibles fósiles (Clarence Lehman, Noelle Eckley Selin 2020).

Se clasifican según el tipo de materia orgánica de la que provienen (tabla 1). Los biocombustibles de primera generación, son aquellos provenientes de plantas comestibles ricas aceites o azúcares. La forma de obtenerlos depende de la planta de origen: si tiene alto contenido de azúcares, se opta por convertirlos en alcoholes por fermentación. Si se parte de plantas ricas en grasas o aceites, se emplea la transesterificación y como resultado final se combinan dichos aceites con un alcohol para generar ésteres grasos, como el

biodiesel (Ruvira 2016) (Castillo y col. 2017) (Luque y col. 2008). Los biocombustibles de segunda generación se obtienen con materias primas no aprovechables para alimentación humana, que tienen elevado contenido de celulosa y lignina, principales componentes de las paredes celulares de las plantas, como, por ejemplo, aceite reciclado de cocina. Se produce por procesos bioquímicos, empleando microorganismos para reducir a azúcares simples las complejas cadenas químicas de las moléculas de celulosa, y luego transforma los azúcares en biocombustible, o mediante procesos termoquímicos, en el cual una alta presión y temperatura permite pasar de una amplia variedad de tipos de biomasa a combustibles (Ruvira 2016) (Castillo y col. 2017)(Luque y col. 2008). Los biocombustibles de tercera generación provienen de organismos que pueden producir su propio alimento a partir de energía solar y CO₂, entre ellos algas, que se pueden cultivar en reactores fotoquímicos o en lagunas al aire libre. Luego de secarlas, se extrae el aceite que contienen en sus células y se lo transforma en biocombustible por alguno de los métodos anteriores (Castillo y col. 2017) (Ruvira 2016)(Luque y col. 2008). Los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de organismos genéticamente modificados para que capturen más CO₂ del ambiente, con lo que tienen la doble característica de provenir de una fuente alternativa de energía y ser generados por procedimientos que disminuyen el contenido atmosférico de GEI (Fernando Daniel Ramos y col. 2016; Ruvira 2016; Castillo y col. 2017; Luque y col. 2008).

Tabla 1. Origen de materia orgánica en la producción de biocombustibles.

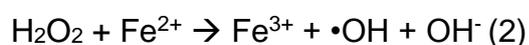
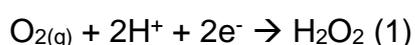
BIOCOMBUSTIBLE	ORIGEN DE MATERIA ORGANICA
PRIMERA GENERACIÓN	Plantas de maíz, caña de azúcar, girasol o soja.
SEGUNDA GENERACIÓN	Residuos forestales y agrícolas ricos en lignocelulosa.

TERCERA GENERACIÓN	Organismos como las algas que utilizan energía solar y CO ₂ en la producción de biomas.
CUARTA GENERACIÓN	Organismos genéticamente modificados para que capturen más CO ₂ del ambiente.

4.1.3 Electro-Fenton

El proceso electro-Fenton es un proceso avanzado de oxidación el cual está basado en la reacción de Fenton y al cual se le añade un proceso de oxidación electroquímico. Esta fue el primer proceso de oxidación electroquímico avanzado basado en la reacción de Fenton desarrollada en un principio para degradar pesticidas tóxicos, tintes sintéticos orgánicos, productos farmacéuticos y de cuidado personal, además una gran cantidad de contaminantes industriales, los cuales se encontraban generalmente en aguas residuales ácidas (Sakai, Quan Zhang, and Koide 1986).

El proceso EF se basa en la electro generación continua de H₂O₂ in situ en un cátodo alimentado con O₂ o aire en un medio ácido (reacción 1), y la adición y regeneración de un catalizador de hierro (Fe²⁺ → Fe³⁺) que al reaccionar con el H₂O₂ producido genera radicales (•OH) y iones –OH (reacción 2). Estos radicales se caracterizan por ser especies altamente reactivas (E ° = 2.80 V). Finalmente el ataque de •OH sobre un compuesto insaturado RH o contaminantes aromático son oxidados y mineralizados, llegando a su conversión en CO₂ (M.A. Oturan 2000). El proceso EF se puede emplear de tal modo que los •OH libres atacan y rompen las paredes celulares de las microalgas, liberando el contenido citoplasmático de éstas (Steriti et al. 2014).



5. REVISIÓN DE LITRATURA

5.1 Pretratamientos aplicados a biomasa de microalgas (*Chlorella sp*) para producir biocombustible

En la producción de biocombustibles de tercera generación provenientes de biomasa de microalgas, la disrupción de la pared celular representa un paso clave. El proceso para la obtención de biocombustible a partir de microalgas consiste en tres etapas: cultivo, cosecha y extracción; en el cultivo se obtiene la máxima cantidad de biomasa dentro de un fotobiorreactor, la cosecha se realiza a través de algún método que permita la separación, como sedimentación, centrifugación o filtración, para finalmente llevar a cabo la lisis celular y la extracción de biocombustible (Lee y col. 2010). En la literatura se han reportado varios procesos biológicos, térmicos, mecánicos y químicos para este fin. Los más empleados son: ultrasonido, tratamiento enzimático, transesterificación y procesos avanzados de oxidación como la reacción de Fenton, y su variación EF (S. Soto-Leon, M. Nieves-Soto 2014).

5.1.1 Ultrasonido

Esta técnica es muy usada en procesos químicos como en tratamiento de aguas, industria de colorantes, alimentos e industria farmacéutica para extraer compuestos bioactivos tales como aceites esenciales, flavonoides, alcaloides, polisacáridos, ésteres, etc. (Fuentes Campos, Aranda Saldaña 2013). El ultrasonido genera ondas con frecuencia de hasta 20 kHz, mediante éstas se logra irradiaciones ultrasónicas, ya sea en solventes como agua o en solventes orgánicos cuando el extracto es hidrofóbico, generando efecto de cavitación, donde se forman burbujas; debido al crecimiento del núcleo de la biomasa y a su colapso, generando una variación de presión permitiendo una mayor transferencia de masa y mejora de la extracción (González-Fernández y col. 2012). Cuanta más energía específica se aplica, mayor es el rendimiento, pero la alta demanda de electricidad para el proceso puede

desequilibrar la energía consumida y producida haciendo que el proceso no sea viable energéticamente (Rogalla aqualia y col. 2012).

En la tabla 2 se muestra el rendimiento en la extracción de aceite de la microalga estudiada por (Fuentes Campos, Aranda Saldaña 2013), quienes emplearon como solventes cloroformo y metanol, donde el tiempo de sonicación no tuvo efecto en el rendimiento a temperatura constante. El rendimiento depende de la transferencia de masa de las muestras y los solventes a una mayor temperatura debido al incremento de la presión de vapor el cual hace que la viscosidad disminuya. El máximo rendimiento es obtenido para 45 minutos de sonicación a 50 °C. Un extracto con cloroformo puede contener mono, di y triacilglicerol, ácidos grasos libres y feofitinas; en cambio un extracto metanólico contiene fosfolípidos y clorofila, el ciclohexano puede extraer hidrocarburos acíclicos (Hackley, Wiesner 2010).

Tabla 2. Rendimiento de extracción de aceite en microalga.

Muestra de microalgas (g)	Tiempo de sonicación (min)	Temperatura de extracción (°C)	Rendimiento (%)
2,01	10	48	33,90
2,03	20	45	33,59
2,03	30	48	34,87
2,02	45	50	35,55

Fuente: Fuentes Campos, Aranda Saldaña 2013

Dependiendo de la intensidad del ultrasonido, las burbujas son comprimidas hasta implosionar produciendo así, calor, radicales libres, altas presiones y ondas de choque, para finalmente romper la pared celular. Los ultrasonidos aplicados a bajas frecuencias favorecen los efectos mecánicos mientras que las altas favorecen la formación de radicales libres (Passos y col. 2014).

5.1.2 Transesterificación

En este proceso se da la transferencia de un grupo acilo, que puede suceder entre un éster

y un ácido (acidólisis), un éster y otro éster (interesterificación) o entre un éster y un alcohol (alcohólisis) (Figura 3) (Sabourin-Provost and Hallenbeck 2009).

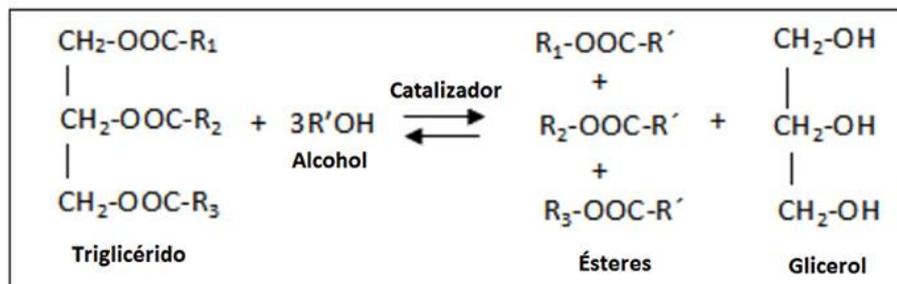


Figura 3. Reacción de transesterificación para la producción de biodiésel.

Fuente: (Sabourin-Provost and Hallenbeck 2009)

La transesterificación, depende de varios parámetros como el tipo de alcohol, la relación molar alcohol/aceite, la cantidad de catalizador, la temperatura de reacción y la velocidad de agitación, los cuales deben mantenerse constantes para garantizar un alto rendimiento (Plata, Kafarov, Moreno 2017). Uno de los grandes problemas que genera este proceso es el empleo de metanol debido a su mayor reactividad y bajo costo, pues el uso de etanol presenta la dificultad de formación de emulsiones muy estables durante la reacción, la temperatura de ebullición del metanol es baja (64,7°C) y la transesterificación se realiza a temperaturas más altas, generando vapores del metanol que son extremadamente tóxicos e inflamables. Esto aumenta los costos, pues se deben tomar medidas de bioseguridad (Meher, Vidya Sagar, Naik 2006). Adicionalmente se requiere el uso de catalizador (H₂SO₄ al 3,5% por 2,4 h) para obtener la producción de biocombustible a partir de biomasa de microalgas (*Chlorella sp*), y esto a su vez provoca corrosión de los equipos empleados en el proceso. Se necesitan relaciones molares altas para alcanzar rendimientos significativos (Gastón, Fernández-Peruchena 2016).

5.1.3 Tratamiento enzimático

Para la producción de biocombustible se usan lipasas obtenidas de hongos (levaduras y hongos filamentosos) (Yunjun y col. 2014). Las lipasas se caracterizan por el poco requerimiento energético, la alta calidad de biodiesel producido y la poca generación de residuos (Meng y col., 2014).

Estudios realizados por (Koby y col. 2014) para obtener la mayor producción de biodiesel a partir de microalgas se desarrolló inmovilizando la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* del bagazo de la caña de azúcar en medio no alcohólico. Los resultados mostraron un 85.2% de rendimiento de biodiesel con una relación 1:12 acetato de metilo/aceite a 40 °C durante 60 h. El método incluyó la inmovilización de celulosas y lipasas con un rendimiento máximo de 93.56% (Duraiarasan y col. 2016).

Aunque las lipasas dan como resultado altos rendimiento en la conversión de biodiesel, y no emplea solventes tóxicos, no se considera que la producción enzimática de biodiesel a base de microalgas sea factible debido al elevado costo de los procesos de aislamiento, purificación, inmovilización y a la baja estabilidad de las lipasas en medio etanólico (Volpe, Goldfarb, and Fiori 2018).

5.1.4 Electro-Fenton

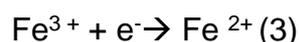
El tratamiento EF es una variación de la reacción de Fenton, proceso avanzado de oxidación. En el proceso realizado con la reacción de Fenton tanto el Fe^{2+} como H_2O_2 son económicos y seguros, pues se puede hacer una recuperación en el proceso y producirse in situ respectivamente, además no hay limitación de transferencia de masa (Pignatello y Col. 2006). La mezcla de H_2O_2 y Fe^{2+} produce $\bullet\text{OH}$ que son altamente oxidantes con respecto a los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales (Yao-Hui Huang y col. 1999). Los $\bullet\text{OH}$, son las principales especies oxidantes en la reacción de Fenton. Esta

se basa en una transferencia de electrones entre H_2O_2 y el hierro ferroso (Fe^{2+}) que actúa como catalizador (Brillas 2017). El destino de los compuestos orgánicos y sus subproductos de degradación depende principalmente de su reacción con $\bullet\text{OH}$ (Pignatello, Oliveros, Mackay 2006). Los radicales hidroxilo atacan a los contaminantes orgánicos y conducen a su destrucción completa generando CO_2 , agua y sales inorgánicas como productos finales (Deng y Englehardt. 2006).

En el proceso de EF, el H_2O_2 se suministra continuamente a una solución acuosa con ácido, preferiblemente a $\text{pH} \sim 3$, contenida en una celda electrolítica a partir de la reducción de dos electrones de oxígeno gaseoso, inyectado directamente como gas puro o aire burbujeado (reacción 1) (Sakai, Quan Zhang, Koide 1986).

Las principales ventajas de este método de oxidación electroquímica indirecta en comparación con el proceso Fenton convencional son (Zhou, Oturan, and Sires 2018):

1. La producción in situ de H_2O_2 , cuya concentración y tasa de acumulación se puede modular simplemente ajustando la corriente o el potencial aplicados.
2. El control en la temperatura sobre la cinética de degradación.
3. La mayor tasa de degradación de los contaminantes orgánicos debido a la regeneración continua de Fe^{2+} a partir de la reducción catódica de Fe^{3+} mediante (reacción 3), con la consiguiente minimización de la producción de lodos.



4. La viabilidad de la mineralización total a un costo relativamente bajo cuando se optimizan los parámetros de operación, siendo los costos muy reducidos cuando el suministro eléctrico proviene de fuentes de energía renovables.

La eficiencia actual para la acumulación de H_2O_2 , determinada por la ley de Faraday,

depende principalmente de la configuración de la celda, que incluye el uso de celdas divididas y no divididas con dos o tres electrodos. El material del cátodo y las condiciones de operación también afectan en gran medida la generación de H_2O_2 para cada configuración (Pliego y col. 2015). Los cátodos más usados son de grafito y carbón activado. Las condiciones óptimas de trabajo son la densidad de corriente aplicada es de 68 A / m^2 , pH óptimo de la solución fue 3, y temperatura que oscilen entre 12 y 25°C (Wang y col. 2008).

Los estudios realizados en la producción de biocombustibles utilizando como pretratamiento el EF en la biomasa de microalga *Chlorella sp*, resaltan algunas ventajas sobre otras vías de producción de biocombustibles, tales como, uso de aguas residuales, reciclar nutrientes, máxima utilización de biomasa, mínima producción de lodos, menores costos operativos, menor consumo de energía y producción sostenible de biogás (Ganesh Saratale y col. 2018). Para obtener una producción de biogás a base de microalgas son necesarias especies con alto contenido de lípidos (Frigon y col. 2013). De este modo se produciría biodiesel a partir de lípidos y los residuos extraídos de lípidos contienen cantidades sustanciales de proteínas y carbohidratos que pueden biodegradarse en biogás durante la digestión anaeróbica (Sialve y col. 2009).

En un estudio donde se empleó el proceso EF para mejorar la recolección celular y la extracción de lípidos de microalgas, se realizó la extracción de lípidos en microalgas *Chlorella sp*. empleando EF como pretratamiento para romper la pared celular (Zhang y col. 2020). Se determinaron los factores principales; concentración de $FeSO_4$, densidad de corriente y el tiempo de electrólisis que afectaron en gran medida el rendimiento de extracción de lípidos (Tabla 3). En la tabla se resalta el rendimiento de extracción de lípidos alcanzado fue de 88,6% máximo (% en peso, lípido neutro total).

Tabla 3. Rendimiento de extracción de lípidos mediante el proceso de electro-Fenton.

Orden de estado	Orden de corrida	Concentración de Fe ²⁺ (mM)	Densidad de corriente (mA*cm ²)	Tiempo (min)	Extracción de lipido total (%)
17	1	10.00	17.50	30.00	84.00
11	2	10.00	5.00	60.00	64.97
6	3	15.00	17.50	0.00	43.31
3	4	5.00	30.00	30.00	58.41
10	5	10.00	30.00	0.00	40.36
12	6	10.00	30.00	60.00	54.80
13	7	10.00	17.50	30.00	81.71
16	8	10.00	17.50	30.00	84.99
4	9	15.00	30.00	30.00	46.60
15	10	10.00	17.50	30.00	88.60
14	11	10.00	17.50	30.00	85.64
5	12	5.00	17.50	0.00	46.27
7	13	5.00	17.50	60.00	66.28
1	14	5.00	5.00	30.00	57.75
2	15	15.00	5.00	30.00	56.11
9	16	10.00	5.00	0.00	41.67
8	17	15.00	17.50	60.00	46.92

Fuente: Zhang, Shuai y col.

En este proceso, tres factores jugaron un papel importante en la extracción de lípidos al variar la cantidad de •OH y su tiempo de contacto con las microalgas, los cuales son directamente proporcionales a la concentración de Fe²⁺ y la densidad de corriente (Pimentel y col. 2008). El rendimiento de extracción de lípidos sin tratar fue de aproximadamente 40%, que fue mucho más bajo que los electro-tratados. Por lo tanto, el tratamiento con EF jugó un papel importante en la mejora de la extracción de lípidos (Kim y col. 2016).

Aunque el rendimiento que generan los biocombustibles, aún no alcanza la demanda que cubren los combustibles fósiles, se han venido implementando procesos que permiten generar energías renovables. Sin embargo, esto no garantiza que sean procesos eficientes (tabla 6). Trabajar con enzimas para producir biocombustibles a partir de biomasa de la microalga *Chlorella sp* es una de los procesos que más rendimiento genera, pero también

es uno de los procesos más costosos, y para aumentar su rendimiento se puede poner en marcha paralelamente con el proceso de transesterificación, el ultrasonido aunque es un proceso no tan costoso como el enzimático, no genera suficiente rendimiento. La eficiencia del proceso de EF radica en un similar e incluso mayor que el enzimático, adicionalmente es un proceso más económico (Oturán 2018).

5.1. 4.1 Análisis bibliométrico

De la reacción de Fenton se han derivado varios procesos fisicoquímicos, entre ellos el proceso de EF. En las bases de datos Scopus y Web of Science se reporta la primera investigación realizada con la reacción de Fenton, Walton JH y Christensen CJ investigaron la influencia catalítica de los iones férricos en la oxidación del etanol por el peróxido de hidrógeno en 1926, y en 1996 Brillas E, MooreE y Casado J, realizaron la primer investigación con el proceso EF, se estudió la mineralización de anilina en solución ácida (pH 3,0) usando una celda no dividida con un cátodo alimentado con carbono-politetrafluoroetileno O_2 que electro genera continuamente H_2O_2 operando a corriente constante.

En la bibliografía reportada en los últimos 10 años (tabla 4) se encuentran diferentes estudios realizados aplicando el proceso de EF, tanto en investigaciones generales como específicas para la producción de biocombustible a partir de microalgas. La mayoría de investigaciones realizadas con el proceso EF se han orientado, al tratamiento de aguas residuales para degradar contaminantes orgánicos.

Tabla 4. Reporte bibliométrico del proceso electro-Fenton

Proceso para generar los radicales hidroxilo	Artículos utilizando el proceso	Artículos con el proceso en microalgas	Artículos con el proceso en <i>Chlorella sp</i> para producir biocombustible
Electro-Fenton	1.720	11	3

En los últimos 10 años las investigaciones del proceso EF, se evidencia un paulatino aumento de publicación de artículos (figura 4), los cuales han generado diversos aportes al mundo científico, tales como tratamiento de aguas residuales mediante degradación de compuestos orgánicos (Coha y col. 2021), eliminación de nanocompuestos (Martínez-Pachón y col. 2021) y optimización del proceso EF para lograr mayor mineralización de los componentes (Liang y col. 2021). Cada investigación ha aportado en el mejoramiento del proceso EF, lo que representa beneficios en la remediación y disminución de problemas ambientales, y mejoramiento en técnicas de producción de productos a nivel agroindustrial y farmacéutico. La optimización del proceso se basa en la preparación del electrodo, disminución en la generación de lodos de hierro y eficiencia en la utilización de H₂O₂ (Zhang y col. 2021).



Figura 4. Reporte de artículos del proceso electro-Fenton publicados en los últimos 10 años.

Las bases de datos Scopus y Web of Science reportan 11 investigaciones donde aplican el proceso EF como pretratamiento de microalgas (tabla 5), y de estos, específicamente 3 artículos aplicando el proceso EF como pretratamiento de biomasa de microalgas *Chlorella sp* en la producción de biocombustible. En general los hallazgos de las investigaciones, plantea el proceso EF como un método económico y eficiente para la extracción de lípidos

de microalgas húmedas, que podría controlarse fácilmente mediante la regulación de FeSO_4 . Además, podría ser un proceso prometedor para la reducción de lodos y la recuperación de biogás. Estas investigaciones abren nuevas puertas para la aplicación de filtros de carbono en áreas industriales, para disminuir el costo del tratamiento y mejorar su eficiencia, el sistema EF se ha mejorado mediante el uso de electrodos modificados o nuevas fuentes de catalizador.

Tabla 5. Reporte de artículos con el proceso electro-Fenton en *Chlorella sp* cultivada en aguas residuales

Artículo	Autor	Año de publicación	Fuente	Resultado
Técnica basada en electro-Fenton para mejorar la recolección celular y la extracción de lípidos de microalgas.	Zhang S, Hou Y, Liu Z, Ji X, Wu D, Weijiewang, Zhang D, Wang W, Chen S, Chen F.	2020	Elseiver	Se utilizó el proceso EF para mejorar la extracción de lípidos de la biomasa húmeda de <i>Nannochloropsis oceanica</i> . Los resultados mostraron que el rendimiento de extracción de lípidos neutros de las microalgas fue del 87,5% en biomasa húmeda y 26,7% en peso seco. Además, la biomasa de las microalgas cultivadas en las aguas residuales por electrólisis tratadas con nutrientes frescos alcanzó 3 g / L, que es 12 veces mayor que la inicial a los 24 días.
Digestión anaeróbica de alta velocidad de lodos residuales activados mediante la integración del proceso electro-Fenton	Feki E, Battimelli A, Sayadi S, Dhouib A, Khoufi S.	2020	Multidisciplinary Digital Publishing Institute	Se determinó que la producción de biogás mejora durante la fermentación semicontinua de lodos pretratados con EF que se lleva a cabo en un reactor a escala de laboratorio. En comparación con el lodo crudo, el lodo pretratado con EF produjo el mayor rendimiento de biogás. Los resultados revelaron que el proceso EF podría ser un método eficaz de desintegración de lodos

				activados residuales con una recuperación máxima de bioenergía durante la EA.
Comparación entre el efecto de desintegración termoalcalina y electro-Fenton en la digestión anaeróbica de lodos activados por residuos	Feki E, Sayadi S, Loukil S, Dhouib A, Khoufi S.	2019	BioMed Research International	Mediante termoalcalina y electro-Fenton se investigó y comparo la desintegración de lodos activados residuales municipales en términos de eficiencia de solubilización de lodos y mejora de la biodegradabilidad anaeróbica. El rendimiento de la solubilización de materia orgánica de lodos pretratados con electro-fenton demostró ser mejor que el del pretratamiento con termoalcalina, lo que resultó en una mejora de la biodegradabilidad anaeróbica. El lodo pretratado con electro-Fenton dio el mejor rendimiento de biogás (0.6 L de biogás / g DQO) y (0,3L de biogás / g de DQO) con termoalcalina.
Electrodos a base de filtro de carbono para aplicaciones energéticas y medioambientales: una revisión	Huong Le T.X., Bechelany M, Cretin M.	2017	Elsevier	Los materiales carbonosos se utilizan abundantemente para aplicaciones electroquímicas y especialmente con fines energéticos y medioambientales. En esta revisión, los electrodos basados en filtro de carbono (CF) se analizan de manera holística. Este estudio se realizó en el tratamiento de aguas residuales que contienen contaminantes biorrefractarios. El resultado de degradación del proceso EF mineraliza la mayoría de los contaminantes tóxicos a compuestos no tóxicos al final del electrólisis.
Una nueva técnica de disrupción celular para	Alberto Steriti, Roberto Rossi, Alessandro	2016	Elsevier	Se propone un método novedoso basado en el uso de H ₂ O ₂ con o sin FeSO ₄ , para romper la pared

<p>mejorar la extracción de lípidos de microalgas</p>	<p>Concas, Giacomo Cao</p>			<p>celular de <i>Chlorella vulgaris</i> y favorecer la posterior extracción de lípidos de la biomasa húmeda. Los resultados experimentales muestran que, cuando la ruptura se realiza en condiciones operativas adecuadas, la cantidad de lípidos extraídos aumenta significativamente con respecto al caso en el que se aplica un enfoque clásico.</p>
<p>Lípido extracción y esterificación para microalgas producción de biodiésel a base de pirita (FeS₂)</p>	<p>Seo Y.H, Sung M, Oh Y.K, Han J.I.</p>	<p>2015</p>	<p>Elsevier</p>	<p>En este estudio, se utilizó pirita (FeS₂) en la extracción de lípidos, para la producción de biodiesel a base de microalgas. La reacción de oxidación mediada por hierro, produjo un grado esperado de extracción de lípidos, pero la pirita fue menos efectiva que el FeCl₃. Esa baja eficiencia se mejoró usando pirita oxidada, la cual se empleó en la etapa de esterificación y convirtió los ácidos grasos libres en ésteres metílicos de ácidos grasos en condiciones ácidas. Este estudio mostró claramente que la pirita podría utilizarse como un catalizador económico en las etapas de extracción y esterificación de lípidos para la producción de biodiésel a base de microalgas.</p>
<p>Un proceso integrado para la recolección de microalgas y la alteración celular mediante el uso de iones férricos.</p>	<p>Kim D.Y, Oh Y.K, Park J.Y, Kim B, Shoi S.A, Han J.I.</p>	<p>2015</p>	<p>Elsevier</p>	<p>En este estudio, se intentó un proceso simultáneo de recolección de biomasa y extracción de bioaceite crudo a partir de biomasa de microalgas húmedas utilizando FeCl₃ y FeSO₄ como coagulante y agente disruptor celular. Dado que las sales de hierro eran un coagulante de referencia en el</p>

				tratamiento del agua en general y en la recolección de microalgas en particular, el enfoque actual de usarlo para la recolección y extracción de aceite de manera simultánea puede servir como una ruta práctica para la producción de biodiesel derivado de microalgas.
Proceso posterior a base de cloruro férrico para la producción de biodiésel a base de microalgas.	Seo Y.H, Sung M, Kim B, Oh Y.K., Kim D.Y., Han J.I.	2015	Elsevier	En este estudio, se utilizó cloruro férrico (FeCl_3) para integrar procesos posteriores (recolección, extracción de lípidos y esterificación). Se utilizó la reacción Fenton, para extraer lípidos de la biomasa cosechada, y se obtuvo una eficiencia del 80% con H_2O_2 al 0,5% a 90°C . Este estudio mostró claramente que el FeCl_3 en el proceso de cosecha es beneficioso en todos los pasos posteriores y tiene el potencial de reducir en gran medida el costo de producción del biodiesel de origen microalgas.
Extracción de lípidos de células de microalgas mediante oxidación a base de persulfato.	Seo Y.H, Sung M, Oh Y.K., Han J.I.	2015	Elsevier	En este estudio, se adoptó persulfato, un oxidante de tipo sólido, como sustituto del peróxido de hidrógeno en la extracción de lípidos de la biomasa de microalgas. Se obtuvo una eficiencia de extracción excesivamente alta por encima del 95%, que fue mayor que con peróxido de hidrógeno. Parece que la combinación de coagulación a base de hierro y extracción de lípidos a base de persulfato es de hecho un enfoque competitivo que posiblemente puede aliviar la carga del proceso para la producción de biodiesel derivado

				de microalgas.
Los efectos de la alteración de las células de microalgas a través del efecto sinérgico basado en FeCl ₃ entre la reacción de ácido de Lewis y tipo Fenton para la extracción de lípidos	Kim D.Y, Park J.Y, Choi S.A, Oh Y.K, Lee I.G, Seo Y.W, Han J.-I.	2014	Elsevier	Se extrajo petróleo crudo de <i>Nannochloropsis</i> salina para la producción de biodiesel utilizando FeCl ₃ como catalizador. Se evaluó una condición de extracción óptima, mediante la metodología de superficie de respuesta (RSM), con respecto a la concentración de FeCl ₃ . En vista de que el FeCl ₃ es un coagulante de referencia, incluso para la recolección de microalgas, se espera que su uso para la extracción de lípidos reduzca posiblemente el costo total de la producción de biodiésel derivado de microalgas.
Extracción de aceite mediante activación de H ₂ O ₂ a base de aminopartículas mediante recolección húmeda de microalgas	Lee Y.C, Huh Y.S, Farooq W, Han J.I, Oh Y.K, Park J.Y.	2013	The Royal Society of Chemistry	La producción • OH se producen mediante la activación de H ₂ O ₂ por los átomos metálicos incrustados en las aminopartículas, provocando daño celular y liberando eficazmente los lípidos internos de la biomasa húmeda de microalgas. Se cree que nuestras aminopartículas de funcionalidad múltiple representan un medio prometedor de reducir sustancialmente el costo unitario de las biorrefinerías de microalgas en general y la producción de biodiesel a base de microalgas en particular.

Los tres autores que mayor número de artículos reportan las bases de datos Scopus y Web of Science, en investigaciones realizadas con el proceso EF son, en primer lugar, Enric Brillas de Barcelona, España, quien es el autor y coautor con mayor número de investigaciones publicadas en este proceso (172 artículos), los cuales abordan el proceso

EF de cara a problemáticas ambientales, como el mejoramiento del proceso EF para lograr una degradación rápida y completa de los contaminantes orgánicos en aguas residuales. En segundo lugar, Mehmet Ali Oturan, con 161 artículos, los cuales están enfocados en el tratamiento con el proceso EF de aguas contaminadas con plaguicidas y compuestos orgánicos, y aplicación de catalizadores a base de hierro para el mejoramiento del proceso. En tercer lugar, Ignasi Sirés de Marne-La-Vallee, Francia, con 133 artículos.

6. DISCUSIÓN

6.1 1. Matriz comparativa de los principales procesos de disrupción celular para obtener de biocombustible a partir de biomasa de *Chlorella sp*

En este trabajo se compararon cuatro técnicas de disrupción celular, se determinó mediante el porcentaje de rendimiento y variables de producción, el proceso EF como el mejor tratamiento para la biomasa de microalgas *Chlorella sp.*, alcanzando 88.6% de rendimiento (tabla 6), aunque el tratamiento enzimático tiene un alto rendimiento, es un proceso mucho más costoso y requiere del control de condiciones específicas (Violeta y col. 2014).

Tabla 6. Rendimiento de procesos disrupción celular en la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal.

Alga	Proceso	Condiciones de operación	Rendimiento de lípidos	Referencia
Chlorella sp	Ultrasonido	Solventes: Ciclohexano, cloroformo y metanol Energía 20 KHz Temperatura: 50°C	40,3%	(Neto y col. 2013) (S. Soto-León y col. 2014) (Luo y col. 2013)
	Transesterificación	Solventes: Metanol Catalizador: H ₂ SO ₄ al 3,5% por 2,4h Temperatura: 100°C	60%	(Fernández-Peruchena and Gastón 2016) (Gastón. 2016).
	Enzimático	Lipasas	85,2%	(Kobya y col. 2014) (Angel González y col. 2009)
	Electro-Fenton	HCl H ₂ O ₂ FeSO ₄	88,6%	(Sabourin-Provost and Hallenbeck 2009) (Zhang et al. 2020) (Feki y col. 2019)

Algunos procesos se pueden combinar para obtener una mayor producción de biocombustible, pero esto demanda que el proceso sea más largo y costoso, como ocurre con el tratamiento enzimático y transesterificación (Gastón 2016). En la extracción enzimática se degrada la pared celular de las microalgas mediante el empleo de enzimas. Estas enzimas son utilizadas para transformar los ácidos grasos presentes en las microalgas, en lípidos aptos para su posterior transesterificación, sin embargo, la actividad enzimática se ve afectada por muchas variables como la naturaleza de la enzima, las concentraciones y los reactantes, la composición de los aceites o mezclas de ácidos grasos, la composición de la pared celular, el contenido inicial de agua, la temperatura, entre otros (Angel González y col. 2009).

Teniendo en cuenta que la alteración de la pared celular de las microalgas permite una rápida y mayor eficiencia en la extracción de lípidos, en la tabla 7 se evalúan las ventajas y desventajas de los cuatro procesos.

Tabla 7. Matriz comparativa de los procesos de obtención de biocombustible a partir de la biomasa de *Chlorella sp*

PROCESO	COMENTARIO
<p style="text-align: center;">ULTRASONIDO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas El tiempo que toma realizar la disrupción de la pared celular es muy corto, los procesos más rápidos se han realizado en 70 seg (Rica 2017). • Desventajas Biomasa microalgal debe ser secada previamente y suspendida en un disolvente orgánico (cloroformo:metanol), ya que los lípidos de las células rotas tienden a quedarse con los restos celulares en lugar de ser liberados al medio acuoso. Altos costos en la puesta en marcha del proceso, con altas densidades de corriente, utiliza potencia de 400 W a una temperatura de 100°C por un periodo de 70 seg (Velasco, 2017).

<p>TRANSESTERIFICACIÓN</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas <p>Reacción reversible entre triglicéridos y un alcohol para producir alquilésteres de ácidos grasos (biodiesel) y glicerol como subproducto. La reacción de transesterificación se realiza mediante alcoholes alifáticos monohídricos de cadena corta, principalmente: metanol, etanol, propanol y butanol (Abdullah y col., 2007).</p> <p>La conversión de ácidos grasos en metil-ésteres mediante el proceso de transesterificación reduce la viscosidad a una séptima parte, reduce el peso molecular a una tercera parte, incrementa ligeramente la volatilidad, y reduce el punto de fluencia considerablemente (Demirbas, 2009).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desventajas <p>Condiciones supercríticas. Altas temperaturas.</p> <p>Los productos correspondientes son una mezcla de alquilésteres de los ácidos grasos constituyentes de los triglicéridos, y glicerina. Una vez finalizada la reacción, la mezcla así formada debe someterse a un proceso de separación de la glicerina, neutralización y lavado (Van Gerpen, J.2015).</p> <p>Se requiere el uso de un catalizador para mejorar la conversión, el cual puede ser ácido o básico, homogéneo o heterogéneo (Sharma y col.2009).</p>
<p>TRATAMIENTO ENZIMÁTICO</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas <p>Algunas enzimas tienen el potencial de romper la pared celular de las células de microalgas. El uso de tales enzimas para la alteración de las células de microalgas mejora la extracción de la recuperación de lípidos (Zhou y col. 2018). El procesamiento de extracción acuosa asistido por enzimas (EAEP) aumenta el rendimiento de lípidos cuando se usa con sonicación. El procesamiento de extracción acuosa asistida por enzimas extrae y separa el aceite directamente de la biomasa de algas húmedas (Hong y col. 2012).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desventajas <p>Variables exactas. Altos costos en la adquisición de enzimas. Enzimas específicas y selectivas, con alto riesgo en contaminación para un alto rendimiento (Taher y col. 2014).</p>
<p>REACCIÓN FENTON</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas <p>Muy útil y eficaz en la destrucción de contaminantes y estructuras celulares No ataca acetona, ni a los ácidos acéticos y oxálico (Martínez y col. 2018) utilizaron ácidos orgánicos como: cítrico, tartárico</p>

	<p>y oxálico como agentes complejantes de los iones de hierro para mantener rendimiento de la reacción de Fenton a un valor de pH casi neutro. Tanto el Fe^{2+} con el H_2O_2 son ambientalmente benignos. No tiene problemas de transferencia de masa por ser un sistema homogéneo.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desventajas <p>No conduce a una mineralización total de los compuestos. Requiere alimentación continua de los reactivos, y el exceso de hierro y peróxido puede ser contraproducente. Genera barros. Se debe mantener un pH entre 2.5 y 3.0.</p>
<p>ELECTRO-FENTON</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventajas <p>Condiciones ambientales. Producción in situ de H_2O_2. Costos operativos bajos. La mineralización total a un costo relativamente bajo cuando se optimizan los parámetros de operación, siendo los costos muy reducidos cuando el suministro eléctrico proviene de fuentes de energía renovables (Zhou y col. 2018). Los radicales hidroxilo atacan a los contaminantes orgánicos y conducen a su destrucción completa generando CO_2, agua y sales inorgánicas como productos finales (Deng y Englehardt).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Desventajas <p>Para obtener un mayor rendimiento en el proceso, se requiere que este esté a un pH~3, generación de lodos (Sakai, Quan Zhang, Koide 1986).</p>

Aunque todos los procesos son aplicados para generar la disrupción de la pared celular de las microalgas, los mecanismos de funcionamiento de los procesos son diferentes. Estos procesos se reportan en la revisión bibliométrica mayor rendimiento como tratamientos de biomasa microalgal en la producción de biocombustibles (Lee y col. 2010). El proceso EF es óptimo para generar la disrupción de la pared celular de las microalgas *Chlorella sp*, con este proceso se pueden obtener los más altos rendimientos en la extracción de lípidos, se emplea como tratamiento de aguas residuales a la vez que funciona como cultivo de la

biomasa microalgal, además la implementación y puesta en marcha no es costoso (Zhou y col. 2018).

El proceso electro-Fenton, es un proceso eficiente que permitirá el tratamiento de la biomasa de microalgas *Chlorella sp* para producir biocombustibles, con este proceso se genera mayor porcentaje en la ruptura de la pared celular de las microalgas, es decir, mayor rendimiento. Éste proceso ofrece solución a un problema ambiental, al ser aplicado a gran escala, actúa disminuyendo el nivel de gases de efecto invernadero, tratamiento de aguas residuales y remplazando fuentes de energías no renovable.

CONCLUSIONES

- Inicialmente el proceso EF tenia como finalidad el tratamiento de aguas residuales, pero investigaciones han destacado de este proceso mas funciones especificas, tales como la obtención de biocombustible empleando microalgas.
- La eficiencia y viabilidad de un tratamiento esta dado por los datos obtenidos, los costos y tiempo de montaje y produccion. El empleo del pretratamiento EF en la biomasa de *Chlorella sp* resulta ser muy eficiente y viable, respecto a otros procesos en la producción de biocombustible. Aunque procesos como ultrasonido y enzimatico, producen grandes volumenes de biocombustible, son costosos tanto en el montaje del sistema como en la puesta en marcha de cada una de sus etapas de producción. El ultrasonido requiere como fuente principal, grandes y constantes suministros de energia, por otro lado el proceso de transesterificación, requiere para una buena producción de biocombustible, y elevados niveles de agua.
- En el pretratamiento EF en la biomasa de *Chlorella sp* para la obtención de biocombustible, las investigaciones se han centrado en la obtención de lípidos de microalgas *Chlorella sp*, pues en la obtención de lípidos se generan a la vez residuos de la ruptura de la pared celular de la microalga. Permitiendo de este que el proceso EF sea multiproposito.

PERSPECTIVAS

- Con la matriz comparativa realizada entre los diferentes procesos de disrupción celular se estableció un aporte significativo para estudios futuros, debido a que presenta las diferencias y beneficios que trae la implementación del proceso EF en la producción de biocombustibles, que permite a los investigadores obtener una base fundamental en el desarrollo de sus investigaciones.
- Se debe continuar con una investigación de laboratorio que permita poner en marcha el proceso de EF para producir biocombustible a base de biomasa de *Chlorella sp*, y reconocer sus debilidades para mejorar dicho proceso.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo que he recibido de las personas que han estado conmigo en la realización de este trabajo de grado.

A la Universidad Antonio Nariño, como institución por la formación educativa.

Al Doctor Jaime Vargas Rodríguez, quien me guio en el desarrollo de esta monografía como mi tutor, por aportarme su conocimiento, consejo, tiempo y su constante colaboración.

A mi familia por su comprensión y apoyo durante todo el proceso, por su animo para no permitir desfallecer a pesar de las dificultades.

A mis amigas y amigos, por sus consejos y preocupación por el progreso en la realización de este trabajo de grado.

Gracias.

REFERENCIAS

- Aderemi, Adeolu, Colin Hunter, Ole Pahl, and Xinhua Shu. 2015. "Optimization of Cell Disruption in *Raphidocelis Subcapitata* and *Chlorella Vulgaris* for Biomarker Evaluation." *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences* 4(6):481–84.
- André, F. J., De Castro, L. M., & Cerdá, E. 2012. "Las Energías Renovables En El Ámbito Internacional." *Universidad Complutense de Madrid*. Retrieved October 7, 2020 (https://www.researchgate.net/profile/Francisco_Andre/publication/277269010_Las_energias_renovables_en_el_ambito_internacional/links/5582861308ae12bde6e4c5bf.pdf).
- Ángel Darío González-Delgado, Andrés Fernando Barajas-Solano, Ana María Ardila-Álvarez. 2017. "Producción de Biomasa y Proteínas de *Chlorella Vulgaris* Beyerinck (Chlorellales: Chlorellaceae) a Través Del Diseño de Medios de Cultivo Selectivos." *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria, Mosquera (Colombia)* 18(3):451–61.
- Angel González, Ing D., Viatcheslav Kafarov, and Alexander Guzmán Monsalve. 2009. *Desarrollo de Métodos de Extracción de Aceite En La Cadena de Producción de Biodiesel a Partir de Microalgas Development of Methods of Extraction of Oil in the Production Line of Biodiesel from Microalgae*. Vol. 7.
- Austin, Culture collection of algae of the University at Texas of. 2021. "UTEX 2168 *Chlorella* Sp. | UTEX Culture Collection of Algae." *Chlorella Sp.* Retrieved April 19, 2021 (<https://utex.org/products/utex-2168?variant=30991923707994>).
- Badii, M. H., A. Guillen, and J. L. Abreu. 2016. *Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation)*. Vol. 11.
- Bermúdez-Sierra, J. J., Oliveira-Leite, M., Reis-Coimbra, J. S., & Aredes-Martins, M. 2013.

“Desempeno de Dos Tecnicas de Rompimiento Celular En La Caracterizacion de Ficobiliproteinas En La Microalga Scenedesmus Sp.” *Revista Tumbaga* 2(8):65–80.

Brennan, Liam and Philip Owende. 2010. “Biofuels from Microalgae” A Review of Technologies for Production, Processing, and Extractions of Biofuels and Co-Products.” *Elsevier* 21.

Brillas, Enric. 2017. “Electro-Fenton Process : Fundamentals and Reactivity.”

Camilo, Jhonnathan, Tovar Salamanca, Jenny Paola, and Ruíz Díaz. 2016. *Propuesta de Escalamiento de Un Fotobioreactor Para La Microalga Chlorella Vulgaris a Nivel Piloto*. Bogotá D.C.

Carlos Fernández-Linares, Luis, Jorge Montiel-Montoya, ; Aarón Millán-Oropeza, Y. Jesús, and Agustín Badillo-Corona. 2012. *Producción de Biocombustibles a Partir de Microalgas Production of Biofuels Obtained from Microalgae*. Vol. 8.

Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., & Rodríguez-Núñez, J. R. 2017. “Producción de Biodiésel a Partir de Microalgas: Avances y Perspectivas Biotecnológicas.” Retrieved October 7, 2020 (http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-88972017000300337&script=sci_arttext).

Castillo, Omar S., Sandra G. Torres-Badajoz, Carlos A. Núñez-Colín, Vicente Peña-Caballero, Carlos H. Herrera Méndez, and Jesús R. Rodríguez-Núñez. 2017. “Producción de Biodiésel a Partir de Microalgas: Avances y Perspectivas Biotecnológicas.” *Hidrobiología SciELO*. Retrieved (http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-88972017000300337).

Clarence Lehman and Noelle Eckley Selin. 2020. "Biofuel ." *Encyclopedia Britannica*.

Retrieved April 19, 2021 (<https://www.britannica.com/technology/biofuel>).

Coha, Marco, Giulio Farinelli, Alberto Tiraferri, Marco Minella, and Davide Vione. 2021.

"Advanced Oxidation Processes in the Removal of Organic Substances from Produced Water: Potential, Configurations, and Research Needs." *Chemical Engineering Journal* 414.

Concas, Alessandro, Massimo Pisu, and Giacomo Cao. 2015. "Disruption of Microalgal

Cells for Lipid Extraction through Fenton Reaction: Modeling of Experiments and Remarks on Its Effect on Lipids Composition." *Chemical Engineering Journal* 263:392–401.

Deng, Yang and James D. Englehardt. n.d. *Treatment of Landfill Leachate by the Fenton*

Process 1.

Domozych, David S., Marina Ciancia, Jonatan U. Fangel, Maria Dalgaard Mikkelsen, Peter

Ulvskov, and William G. T. Willats. 2012. "The Cell Walls of Green Algae: A Journey through Evolution and Diversity." *Frontiers in Plant Science* 3(MAY):82.

Dudley, B. 2019. *Statistical Review of World Energy*.

Duraiarasan, Surendhiran, Sirajunnisa Abdul Razack, Anandan Manickam, Anbarasu

Munusamy, Mahin Basha Syed, Mohammed Yousuf Ali, Gulam Muzaffar Ahmed, and Md Sadiq Mohiuddin. 2016. "Direct Conversion of Lipids from Marine Microalga *C. Salina* to Biodiesel with Immobilised Enzymes Using Magnetic Nanoparticle." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 4(1):1393–98.

Feki, Emna, Sami Sayadi, Slim Loukil, Abdelhafidh Dhouib, and Sonia Khoufi. 2019.

"Comparison between Thermo-Alkaline and Electro-Fenton Disintegration Effect on

Waste Activated Sludge Anaerobic Digestion.” *BioMed Research International* 2019.

Fernández-Peruchena, Carlos M. and Martín Gastón. 2016. “A Simple and Efficient Procedure for Increasing the Temporal Resolution of Global Horizontal Solar Irradiance Series.” *Renewable Energy* 86:375–83.

Fernando Daniel Ramos, María soledad Díaz, and Marcelo Armando Villar. 2016. “Biocombustibles.” 5–25. Retrieved April 19, 2021 (https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/25791/CONICET_Digital_Nro.cf291889-a370-4b7a-915b-4de3e1058c97_A.pdf?sequence=2).

Frigon, Jean Claude, Frédérique Matteau-Lebrun, Rekia Hamani Abdou, Patrick J. McGinn, Stephen J. B. O’Leary, and Serge R. Guiot. 2013. “Screening Microalgae Strains for Their Productivity in Methane Following Anaerobic Digestion.” *Applied Energy* 108:100–107.

Fuentes Campos, María E. and Marleny D. Aranda Saldaña. 2013. *Metodología Para Extracción de Aceite de La Microalga Nannochloropsis Oculata Usando Ultrasonido Methodology for Oil Extraction from the Microalgae Nannochloropsis Oculata With*. Vol. 16.

Ganesh Saratale, Rijuta, Gopalakrishnan Kumar, Rajesh Banu, Ao Xia, Sivagurunathan Periyasamy, and Ganesh Dattatraya Saratale. 2018. “A Critical Review on Anaerobic Digestion of Microalgae and Macroalgae and Co-Digestion of Biomass for Enhanced Methane Generation.” *Bioresource Technology* 262:319–32.

Gastón, Martín and Carlos M. Fernández-Peruchena. 2016. “A Simple and Efficient Procedure for Increasing the Temporal Resolution of Global Horizontal Solar Irradiance Series A Simple and Efficient Procedure for Increasing the Temporal

Resolution of 1 Global Horizontal Solar Irradiance Series 2 5 6 *Correspondin.”

Renewable Energy 86:375–83.

González-Fernández, C., B. Sialve, N. Bernet, and J. P. Steyer. 2012. “Comparison of Ultrasound and Thermal Pretreatment of Scenedesmus Biomass on Methane Production.” *Bioresource Technology* 110:610–16.

Guillermo Berra, Ricardo Bualo, Ricardo Arias, Roberto Callieri, Néstor Hilfer (Instituto de Patobiología CICV y A INTA Castelar) Ariel Perini, Diego Mena. 2014. “Producción de Energía a Partir de Los Gases Ruminales Del Bovino - Engormix.” Retrieved October 7, 2020 (<https://www.engormix.com/ganaderia-leche/articulos/produccion-energia-partir-gases-t30783.htm>).

Hackley, Vincent A. and Mark Wiesner. 2010. “Ultrasonic Dispersion of Nanoparticles for Environmental, Health and Safety Assessment Issues and Recommendations Membrane Fabrication View Project Powder Processing of Structural and Electronic Ceramics View Project.”

Hernández-Pérez, Alexis and José I. Labbé. 2014. “Microalgas, Cultivo y Beneficios.” *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 49(2):157–73.

Infante, Cherlys, Edgardo Angulo, Ana Zárate, July Z. Florez, Freddy Barrios, and Cindy Zapata. 2012. *Propagación de La Microalga Chlorella Sp. En El Cultivo Por Lote: Cinética Del Crecimiento Celular Cultivation of Chlorella Sp. Microalgae in Batch Culture: Cell Growth Kinetics.*

International Energy Agency, Iea. 2013. *World Energy Outlook RESUMEN EJECUTIVO Spanish Translation.*

Kim, Dong Yeon, Durairaj Vijayan, Ramasamy Praveenkumar, Jong In Han, Kyubock Lee,

Ji Yeon Park, Won Seok Chang, Jin Suk Lee, and You Kwan Oh. 2016. "Cell-Wall Disruption and Lipid/Astaxanthin Extraction from Microalgae: *Chlorella* and *Haematococcus*." *Bioresource Technology* 199:300–310.

Kobyas, M., M. S. Oncel, E. Demirbas, E. Şik, A. Akyol, and M. Ince. 2014. "The Application of Electrocoagulation Process for Treatment of the Red Mud Dam Wastewater from Bayer's Process." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2(4):2211–20.

Lee, Jae Yon, Chan Yoo, So Young Jun, Chi Yong Ahn, and Hee Mock Oh. 2010. "Comparison of Several Methods for Effective Lipid Extraction from Microalgae." Pp. S75–77 in *Bioresource Technology*. Vol. 101. Elsevier Ltd.

Liang, Jiexiang, Qi Xiang, Weidong Lei, Yun Zhang, Jie Sun, Hongxiang Zhu, and Shuangfei Wang. 2021. "Ferric Iron Reduction Reaction Electro-Fenton with Gas Diffusion Device: A Novel Strategy for Improvement of Comprehensive Efficiency in Electro-Fenton." *Journal of Hazardous Materials* 412.

Luis, Juan and Ramos Suárez. 2014. "Producción de Biogás a Partir de Biomasa de La Microalga *Scenedesmus* Sp. Procedente de Diferentes Procesos." *Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos* 283.

Luo, Jia, Zhen Fang, and Richard L. Smith. 2013. "Ultrasound-Enhanced Conversion of Biomass to Biofuels."

Luque, Rafael, Lorenzo Herrero-Davila, Juan M. Campelo, James H. Clark, Jose M. Hidalgo, Diego Luna, Jose M. Marinas, and Antonio A. Romero. 2008. "Biofuels: A Technological Perspective." *Energy and Environmental Science* 1(5):542–64.

M.A. Oturan. 2000. "An Ecologically Effective Water Treatment Technique Using Electrochemically Generated Hydroxyl Radicals for in Situ Destruction of Organic

Pollutants: Application to Herbicide 2,4.” *Article in Journal of Applied Electrochemistry* (30):475±482.

Martínez-Pachón, Diana, Rodrigo A. Echeverry-Gallego, Efraím A. Serna-Galvis, José Miguel Villarreal, Ana María Botero-Coy, Félix Hernández, Ricardo A. Torres-Palma, and Alejandro Moncayo-Lasso. 2021. “Treatment of Wastewater Effluents from Bogotá – Colombia by the Photo-Electro-Fenton Process: Elimination of Bacteria and Pharmaceutical.” *Science of the Total Environment* 772.

Meher, L. C., D. Vidya Sagar, and S. N. Naik. 2006. “Technical Aspects of Biodiesel Production by Transesterification - A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10(3):248–68.

Meng, Xiao, Gang Xu, Qin Li Zhou, Jian Ping Wu, and Li Rong Yang. 2014. “Highly Efficient Solvent-Free Synthesis of 1,3-Diacylglycerols by Lipase Immobilised on Nano-Sized Magnetite Particles.” *Food Chemistry* 143:319–24.

Neto, Ana Maria Pereira, Rafael Augusto Sotana de Souza, Amanda Denisse Leon-Nino, Joana D. ar. Aparecida da Costa, Rodolfo Sbrolini Tiburcio, Thaís Abreu Nunes, Thaís Cristina Sellare de Mello, Fernando Takashi Kanemoto, Flávia Marisa Prado Saldanha-Corrêa, and Sônia Maria Flores Giancesella. 2013. “Improvement in Microalgae Lipid Extraction Using a Sonication-Assisted Method.” *Renewable Energy* 55:525–31.

Neumann, Patricio and David Jeison. 2015. “Contribución Energética de La Digestión Anaerobia Al Proceso de Producción de Biodiesel a Partir de Microalgas.” *Ingeniare* 23(2):276–84.

Oturan, Nihal and Mehmet A. Oturan. 2018. “Electro-Fenton Process: Background, New

Developments, and Applications.” Pp. 193–221 in *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. Elsevier.

Passos, Fabiana, Javier Carretero, and Ivet Ferrer. 2015. “Accepted Manuscript Comparing Pretreatment Methods for Improving Microalgae Anaerobic Digestion: Thermal, Hydrothermal, Microwave and Ultrasound.” *CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL*.

Passos, Fabiana, Enrica Uggetti, Hélène Carrère, and Ivet Ferrer. 2014. “Pretreatment of Microalgae to Improve Biogas Production: A Review.”

Pignatello, Joseph J., Esther Oliveros, and Allison Mackay. 2006. “Advanced Oxidation Processes for Organic Contaminant Destruction Based on the Fenton Reaction and Related Chemistry.” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 36:1–84.

Pimentel, Marcio A. S., Marcia Dezotti, Marcio Pimentel, Nihal Oturan, and Mehmet A. Oturan. 2008. “Phenol Degradation by Advanced Electrochemical Oxidation Process Electro-Fenton Using a Carbon Felt Cathode SEE PROFILE Phenol Degradation by Advanced Electrochemical Oxidation Process Electro-Fenton Using a Carbon Felt Cathode.” *Applied Catalysis B Environmental* 11.

Plata, Ing Vladimir, Viatcheslav Kafarov, and Nelson Moreno. 2017. *Desarrollo de Una Metodología de Transesterificación de Aceite En La Cadena de Producción de Biodiesel a Partir de Microalgas Development of a Methodology of Transesterification of Oil in the Production Line of Biodiesel from Microalgae*.

Pliego, Gema, Juan A. Zazo, Patricia Garcia-Muñoz, Macarena Muñoz, Jose A. Casas, and Juan J. Rodríguez. 2015. “Trends in the Intensification of the Fenton Process for

Wastewater Treatment: An Overview.” *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45(24):2611–92.

Rica, Universidad D. E. Costa. 2017. “Ch/Ore/La vu!Garis.”

Rogalla aqualia, Frank, Me Alzate, R. Muñoz, F. Rogalla, F. Fdz-Polanco, and Si Pérez-Elvira. 2012. “Article in Bioresource Technology.”

Ruvira, Beatriz. 2016. “Estudio Del Efecto De La Aplicación De Ultrasonidos Sobre La Biodegradabilidad Anaerobia De Diferentes Especies De Microalgas.” 87.

S. Soto-León, I. E. Zazueta-Patrón, P. Piña-Valdez, M. Nieves-Soto, C. Reyes-Moreno¹ e I. Contreras-Andrade. 2014. “Extracción de Lípidos de Tetraselmis Suecica: Proceso Asistido Por Ultrasonido y Solventes.” Retrieved May 19, 2021 (http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382014000300007).

S. Soto-Leon, I. E. Zazueta-Patron and C. Reyes-Moreno M. Nieves-Soto. 2014. “Extracción de Lipidos de Tetraselmis Suecica: Proceso Aistido Por Ultrasonido y Solventes.” *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 15. Retrieved April 20, 2021 (<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmiq/v13n3/v13n3a7.pdf>).

Sabourin-Provost, Guillaume and Patrick C. Hallenbeck. 2009. “High Yield Conversion of a Crude Glycerol Fraction from Biodiesel Production to Hydrogen by Photofermentation.” *Bioresource Technology* 100(14):3513–17.

Safi, Carl, Bachar Zebib, Othmane Merah, Pierre-Yves Pontalier, and Carlos Vaca-Garcia. 2019. “Morphology, Composition, Production, Processing and Applications of Chlorella Vulgaris: A Review.”

Sakai, Kunio, Jing Quan Zhang, and Kozo Koide. 1986. *Oxidative Degradation of Aqueous*

Phenol Eluent with Electrogenerated Fenton's Reagent. Japon.

Sialve, Bruno, Nicolas Bernet, and Olivier Bernard. 2009. "Anaerobic Digestion of Microalgae as a Necessary Step to Make Microalgal Biodiesel Sustainable." *Biotechnology Advances* 27(4):409–16.

Steriti, Alberto, Roberto Rossi, Alessandro Concas, and Giacomo Cao. 2014. "A Novel Cell Disruption Technique to Enhance Lipid Extraction from Microalgae." *Bioresource Technology* 164:70–77.

Subía, Soledad and Rodolfo Jefferson Rubio Aguiar. 2018. "Evaluación de Biomasa de Microalgas de La Laguna Limoncocha Como Materia Prima Para La Obtención de Biocombustibles." *Enfoque UTE* 9(2):106–16.

Vacca Jimeno, Victor Alexander, Edgardo Ramon Angulo Mercado, Diana Milena Puentes Ballesteros, José Gregorio Torres Yépez, and Martín Elías Plaza Vega. 2017. "Uso de La Microalga Chlorella Sp. Viva En Suspensión En La Decoloración Del Agua Residual de Una Empresa Textil/Using the Microalgae Chlorella Sp. Live Suspended in Decoloration Wastewater from a Textile Factory." *Prospectiva* 15(1):93–99.

Violeta, Alina, Carl Safi, Alina Violeta Ursu, Céline Laroche, Bachar Zebib, Othmane Merah, Pierre-Yves Pontalier, and Carlos Vaca-Garcia. n.d. "Aqueous Extraction of Proteins from Microalgae: Effect of Different Cell Disruption Methods."

Voigt, Jürgen, Adam Stolarczyk, Maria Zych, Przemysław Malec, and Jan Burczyk. 2014. "The Cell-Wall Glycoproteins of the Green Alga Scenedesmus Obliquus. The Predominant Cell-Wall Polypeptide of Scenedesmus Obliquus Is Related to the Cell-Wall Glycoprotein Gp3 of Chlamydomonas Reinhardtii." *Plant Science* 215–216:39–47.

- Volpe, Maurizio, Jillian L. Goldfarb, and Luca Fiori. 2018. "Hydrothermal Carbonization of Opuntia Ficus-Indica Cladodes: Role of Process Parameters on Hydrochar Properties." *Bioresource Technology* 247:310–18.
- Wang, Chih Ta, Jen Lu Hu, Wei Lung Chou, and Yi Ming Kuo. 2008. "Removal of Color from Real Dyeing Wastewater by Electro-Fenton Technology Using a Three-Dimensional Graphite Cathode." *Journal of Hazardous Materials* 152(2):601–6.
- Yo-Hui Huang, Shanshan Chou, Ming-Ging Perng, Gao-Hao Huang and Sheng-Chung Cheng. 1999. "Case Study on the Bioeffluent of Petrochemical Wastewater by Electro-Fenton Method." *Environmental Technology Division* (November):1–26.
- Yunjun, Yan, Wang Guilong, Xiao Hua Gui, and Guanlin Li. 2014. "Biotechnological Preparation of Biodiesel and Its High-Valued Derivatives: A Review Biodiesel Production View Project Biomineralization View Project." *Applied Energy* 113:1614–1631.
- Zhang, Qizhan, Minghua Zhou, Zhicheng Lang, Xuedong Du, Jingju Cai, and Lujie Han. 2021. "Dual Strategies to Enhance Mineralization Efficiency in Innovative Electrochemical Advanced Oxidation Processes Using Natural Air Diffusion Electrode: Improving Both H₂O₂ Production and Utilization Efficiency." *Chemical Engineering Journal* 413.
- Zhang, Shuai, Yuyong Hou, Zhiyong Liu, Xiang Ji, Di Wu, Weijiewang, Dongyuan Zhang, Wenya Wang, Shulin Chen, and Fangjian Chen. 2020a. "Electro-Fenton Based Technique to Enhance Cell Harvest and Lipid Extraction from Microalgae." *Energies* 13(15).
- Zhang, Shuai, Yuyong Hou, Zhiyong Liu, Xiang Ji, Di Wu, Weijiewang, Dongyuan Zhang,

Wenya Wang, Shulin Chen, and Fangjian Chen. 2020b. "Electro-Fenton Based Technique to Enhance Cell Harvest and Lipid Extraction from Microalgae." *Energies* 13(15).

Zhou, Minghua, Mehmet A. Oturan, and Ignasi Sires. 2018. *Electro-Fenton: New Trends and Scale-Up*.