



## **ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO DE AGUA NIXTAMALIZADA: UNA PROPUESTA DE USO CON CEPAS ALGALES.**

Itzia Almendra Palacios-Pérez <sup>a</sup>, Araceli Guadalupe Romero-Izquierdo <sup>a,\*</sup>, Juan Manuel Vera-Morales <sup>a</sup>, Oscar Daniel Lara-Montaña <sup>a</sup>, Claudia Gutiérrez-Antonio <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala, Carretera a Chichimequillas s/n km. 1, Amazcala, El Marqués, Querétaro, 76265, México.

[araceli.romero@uaq.mx](mailto:araceli.romero@uaq.mx)

### **Resumen**

La tortilla es un alimento indispensable en la dieta de los mexicanos, tanto ésta como sus derivados son elaborados a partir de masa de maíz nixtamalizado. La nixtamalización del maíz es un proceso de cocción térmico-alcalino necesario para la obtención de masa de buena calidad, ya que induce cambios en la estructura del grano, tales como su composición química y valor nutritivo. En México, 2,437,552 ton maíz/año son sometidas al proceso de nixtamalización para la obtención de harina, lo cual representa por lo menos 4,875,103.99 m<sup>3</sup> de agua utilizada en el proceso, que es posteriormente desechada. Debido a la alta cantidad de materia orgánica que posee este tipo de agua, así como a sus altos niveles de alcalinidad, es considerada una fuente de contaminación importante. Dentro de los métodos para la remediación de aguas de nixtamalización, el uso de cepas micro y macro algales ha cobrado relevancia por su capacidad de remediación, recuperación de nutrientes y producción de biomasa de interés comercial. Es por ello que, en este trabajo se presenta una propuesta de uso de cepas algales para el tratamiento de aguas residuales nixtamalizadas.

*Palabras clave:* Tratamiento de agua nixtamalizada, nejayote, micro y macro algas.

## **ALTERNATIVES FOR TREATMENT OF NIXTAMALIZED WATER: A USE PROPOSAL WITH ALGAL STRAINS**

### **Abstract**

The tortilla is an indispensable food in the diet of Mexicans, and those and its derivatives are mainly made from nixtamalized maize dough. The nixtamalization of maize is a heat-alkaline cooking process necessary to obtain good quality dough, as it induces changes in the structure of the grain, such as its chemical composition and nutritional value. In Mexico, 2,437,552 tons of maize/year are subjected to the process of nixtamalization to obtain flour, which represents at least 4,875,103.99 m<sup>3</sup> of water used in the process, which is subsequently discarded. Due to the large amount of organic matter it possesses, as well as its high alkalinity, it is considered a major source of pollution. Within the methods for the remediation of nejayote water, the use of micro and macro algal strains has gained relevance for its remediation capacity, nutrient recovery and production of biomass of commercial interest. Thus, this paper presents a use proposal of algal strains for the treatment of nejayote waste water.

*Keywords:* nixtamalized water treatment, nejayote, micro and macro algae.



## 1. Introducción

Uno de los alimentos emblemáticos de México es la tortilla de maíz, cuya cadena productiva es un importante generador de empleos y de riqueza en la economía mexicana (Núñez et al. 2016). En México, el consumo anual per cápita de tortilla ronda entre los 66 kg a 79.5 kg, representando el 6.78 % del gasto alimentario de los hogares (CEDRSSA, 2014; Núñez et al. 2016). De acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se tienen contabilizados 78,872 molinos y tortillerías, sin considerar el número de hogares (principalmente rurales) en donde se elabora este producto de forma artesanal para su autoconsumo (García et al., 2008; CEDRSSA, 2014).

El maíz es la materia prima para la elaboración de la tortilla; su proceso de conversión consiste en un tratamiento térmico alcalino conocido como nixtamalización, dando como producto principal la masa de maíz. El proceso de nixtamalización produce cambios importantes en los valores nutritivos del maíz haciendo más asimilables las proteínas y otros nutrientes de su endospermo para el cuerpo humano (Núñez et al. 2016).

La nixtamalización se describe como el proceso de cocción del maíz en la siguiente proporción: una parte de los granos de maíz entero por cada dos partes de solución acuosa al 1 % de cal, la cual debe contener un mínimo de 90 % hidróxido de calcio u óxido de calcio, así como 5 % de hidróxido de magnesio de acuerdo a la NOM-187-SA1/SCF1-2002 (DOF, 2003); la mezcla resultante se calienta a 80 °C durante 20-45 min con agitación constante, dejando reposar entre 8 y 14 h. Posteriormente, el agua de remojo de color amarillo lechoso, conocida

como agua de nixtamal o nejayote, se remueve del maíz cocido y los sólidos residuales obtenidos se desechan o se destinan como alimento de animales (García et al., 2008).

El nejayote obtenido del proceso de nixtamalización es altamente contaminante debido a la gran cantidad de materia orgánica que posee, así como a su alta alcalinidad debido a las cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$  y otros nutrientes, cuyo valor promedio de pH es aproximadamente 12 (Ferreira Rolón et al., 2014; García et al., 2008). La literatura reporta que su demanda bioquímica de oxígeno (DBO) es mayor a 20,000 mg L<sup>-1</sup> y su demanda química de oxígeno (DQO) ronda entre valores de 7,000 a 10,000 mg L<sup>-1</sup> (De Gante González, 2016). La norma NOM-001-SEMARNAT-2021 (DOF, 2022) señala como límite máximo permisible de descarga en canales y drenes de hasta 150 mg L<sup>-1</sup> de DQO en promedio mensual. En este sentido, los valores contaminantes del agua nixtamalizada exceden la normatividad mexicana, por lo que resulta necesario un proceso apropiado de remediación de agua residual generada del proceso de nixtamalización.

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 2020 la población mundial alcanzó los 8,000 millones de habitantes (ONU, 2020), siendo al mismo tiempo los recursos naturales más limitados. Asimismo, la necesidad y uso de estos recursos van en aumento, no sólo por la velocidad de consumo sino para garantizar el acceso a toda la población. En el caso particular del agua, alrededor de 2 millones de personas viven en países que se enfrentarán a su escasez en el 2025 (ONU,



2020), resultando necesario un manejo apropiado del agua. Este aspecto es especialmente relevante para el agua empleada previamente en los sectores industrial, doméstico o agrícola, es decir, efluentes de agua residual. Es importante señalar que, en términos generales sólo el 20 % de las aguas residuales, domésticas o industriales son sometidas a algún proceso de tratamiento, y un porcentaje menor es reutilizada (Rodríguez et al., 2020).

Hasta el 2020, se había estimado una generación mundial de aguas residuales de 359.4 mil millones  $m^3/año$  (Amin et al., 2022), siendo específicamente en la región de Latinoamérica y el Caribe sólo el 5 % del agua tratada reutilizada (Jones et al., 2021). De acuerdo al Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR) y al Banco Mundial, históricamente este 5 % de aguas residuales tratadas y reutilizadas ha sido destinadas con propósitos de uso no potable, tales como riego de áreas verdes, parques, jardines y generación de energía.

Una alternativa aplicada al tratamiento de aguas residuales se lleva a cabo a través de métodos biológicos basados en bacterias, hongos y algas; lo anterior se debe a su habilidad de absorber y acumular minerales, metales y otros contaminantes como parte de su biomasa. La flexibilidad metabólica de estos organismos los hace candidatos a tratar diversos tipos de aguas residuales, con potencial para convertirse en un bio-producto sustentable en un contexto de biorrefinerías y economía circular (Amin et al., 2022).

Las algas poseen alta capacidad fitorremediadora, lo que consiste en la eliminación o biotransformación de contaminantes de un medio líquido o gaseoso. Estos compuestos contaminantes son captados por la biomasa algal y pueden ser recuperados mediante su cosecha. Esta

capacidad resulta en un sistema de cultivo con dos propósitos principales: eliminación de contaminantes y producción de biomasa con fines comerciales (Hernández-Pérez et al., 2014).

Es por ello que, en este trabajo se presenta una propuesta de uso de cepas algales para el tratamiento de aguas residuales nixtamalizadas.

## 2. El nejayote como efluente contaminante

El nejayote surge de la cocción alcalina del grano de maíz. Un proceso tradicional de nixtamalización requiere cerca de 7.5 L de agua por kilogramo de maíz, la cual después de la cocción se convierte en nejayote (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2022). En México, la creciente demanda de productos derivados del proceso de nixtamalización ha incrementado la industrialización del maíz, generando más de 22 millones de  $m^3/año$  de agua residual de nejayote; catalogando al nejayote como un residuo alcalino, con un pH en rangos de 9 a 14, cuya composición química se basa en carbohidratos (37.8 - 55.7%), fibra (22.8-25.5%), proteína (4.9-7.4%) y lípidos (0.4-1.5%) (Díaz-Montes et al., 2016). Adicionalmente, el nejayote tiene alto contenido de compuestos fenólicos simples y compuestos, responsables de la pigmentación y actividad antioxidante del maíz (Díaz-Montes & Castro-Muñoz, 2022). Esta composición ha ocasionado contaminación en cuerpos receptores de agua, e incluso taponamiento de las alcantarillas y drenaje, debido a que es frecuentemente vertido al alcantarillado público, con pocos reportes de tratamientos previos (Díaz-Montes et al., 2016).

Es importante señalar que el proceso de nixtamalización del maíz mejora sus características nutricionales y sensoriales, ya que permite la eliminación total o parcial del



pericarpio del núcleo, la gelificación del almidón y la hidrólisis de las fibras (Díaz-Montes et al., 2016). López-Pacheco et al, (2019) reportan la caracterización del nejayote con un contenido de nitrógeno total de 120.60 mg L<sup>-1</sup>, oxígeno disuelto 4.8 mg L<sup>-1</sup>, fósforo total de 41.16 mg L<sup>-1</sup>, DQO 9,153.30 mg L<sup>-1</sup>, sólidos sedimentables 3.86 ml L<sup>-1</sup> y sólidos totales de 9.06 g L<sup>-1</sup>.

La caracterización del nejayote en términos fisicoquímicos reportada por diversos autores se presenta en la Tabla 1. Como se puede observar de la Tabla 1, esta agua residual posee altas concentraciones de los contaminantes previamente mencionados, los

cuales también pueden ser reutilizados bajo esquemas de aprovechamiento integral. La literatura señala que la revalorización del nejayote se enfoca principalmente en la recuperación de sólidos y la extracción de compuestos de interés, o bien para su reinsertión a la cadena alimenticia (Acosta-Estrada et al., 2019; Díaz-Montes et al., 2016; Valderrama-Bravo et al., 2022). No obstante, la fase líquida sigue siendo una fuente importante de contaminación por su alto contenido de calcio, nitrógeno y fósforo, siendo estos dos últimos causantes de la eutrofización del suelo (De Gante González, 2016; Ferreira Rolón et al., 2014; López-Pacheco et al., 2019), considerándose un

**Tabla 1.** Características fisicoquímicas del nejayote reportadas en la literatura (mg L<sup>-1</sup>). NR= no reportado.

Referencia	pH	Nitrógeno total (NT)	Fósforo total (FT)	Calcio	DQO	DBO	Sólidos totales
López-Pacheco et al., 2019	9.8	120.69	41.16	NR	9153.3	NA	9060
Díaz-Montes et al., 2016	12-14	200-300	NR	1526.21	25000-30000	NR	11680
Meraz et al., 2016	11.6	418	1321	NR	28450	3320	46523
De Gante González, 2016	11.5	290	178	NR	21280	7875	1940
Ferreira-Rolón et al., 2014	12.01	NR	NR	3900	24600	NR	6600



residuo acuoso altamente contaminante. En la Tabla 2 se presentan algunos trabajos en torno al aprovechamiento de este efluente residual en diversas aplicaciones. Como se puede observar, la mayoría de los trabajos han sido enfocados en el aprovechamiento de los residuos sólidos que contiene, para su posterior uso en la industria alimenticia, principalmente animal; esto permite la disminución de la carga orgánica del efluente, mejorando la disposición final del agua.

### 3. Tratamientos de efluentes residuales

De acuerdo a Amin et al, (2022) dentro de la clasificación de aguas residuales industriales, se incluyen aquellas provenientes de diversos sectores industriales, tales como el automotriz, de alimentos, de energía, farmacia, petroquímico, acero, textil, entre otros. Cada uno posee características y composiciones distintas. Existen efluentes que presentan un pH muy ácido como el proveniente de la industria de procesamiento de alimentos (3.65-5.92), o sumamente alcalino como el de la industria textil (8.75-11.53), o ambos como lo reportado para la industria petroquímica (1-13.41) (Amin et al., 2022).

El objetivo principal del tratamiento de aguas residuales es reducir significativamente la carga de nutrientes al nivel mínimo antes de su descarga (Liu et al., 2020); lo anterior de acuerdo a los límites permisibles establecidos en cada país y/o normas internacionales aplicadas a los recursos hídricos. De acuerdo a las normas mexicanas vigentes, tal como la Norma Oficial Mexicana NOM-002-ECOL-1996 (DOF, 1998) ha sido establecido que los principales parámetros de aguas residuales descargadas son la temperatura, pH, alcalinidad, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos, sólidos totales, demanda química de oxígeno, nitrógeno total y fósforo total. Se tienen valores de referencia sobre los

límites permisibles en promedio mensual para nitrógeno total ( $40 \text{ mg L}^{-1}$ ), fósforo total ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) y DBO ( $200 \text{ mg L}^{-1}$ ) en aguas residuales (DOF, 1998); así como límites permisibles de calidad del agua entorno a sulfatos ( $400 \text{ mg L}^{-1}$ ) y carbonato de calcio ( $500 \text{ mg L}^{-1}$ ) (DOF, 1994).

El tratamiento de aguas residuales de la agroindustria involucra principalmente la remoción de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo, metales pesados y otros contaminantes (Liu et al., 2020). Dentro de los procesos convencionales de remediación se identifican tratamientos por métodos físicos, químicos y biológicos, tal como se describen en la Tabla 3 (Amin et al., 2022; Cao et al., 2022; Li et al., 2019).

Es importante señalar que los procesos convencionales de tratamiento de agua residuales altamente alcalinas y con alta concentración de carga orgánica, tal como el nejayote requieren de aireación intensiva; lo anterior con el objetivo de promover la oxidación bacteriana del carbono orgánico, así como una etapa de nitrificación para la eliminación biológica de nitrógeno. La energía requerida para llevar a cabo estos procesos representa el mayor porcentaje de los costos de operación para su remediación; además, tanto el nitrógeno como el fósforo que pueden ser removidos no son usualmente recuperados para su aprovechamiento (Liu et al., 2020), lo que implica impactos negativos en los ecosistemas. Es por ello que el uso de métodos biológicos, tal como el uso de cepas algales ha emergido como una alternativa eficiente sobre el tratamiento de este tipo de efluentes, dada su alta capacidad de absorción de minerales, metales y otros componentes necesarios para su crecimiento, junto con su potencial de producción de biomasa hacia la obtención de bioenergía y/o productos de valor agregado.



**Tabla 2.** Aplicaciones del nejayote.

<b>Referencia</b>	<b>Objeto de estudio</b>	<b>Finalidad</b>	<b>Resultados</b>
<b>Velasco-Martínez et al (1997)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Alimentación de ganado	Factible para su uso en forraje para aumento de peso en ganado.
<b>Domínguez-Espinosa y Pacho-Carrillo (2003)</b>	Extracto de nejayote	Producción de enzimas	42% de reducción de sólidos solubles 21% de reducción de la DQO Producción de extracto enzimático con actividad amilolítica mediante la incubación de <i>Aspergillus awamori</i> en el extracto de nejayote.
<b>González et al. (2003)</b>	Extracto de nejayote	Medio aglutinante para obtención de aglomerados de carbón negro	Pellets de Nejayote con resistencia al agrietamiento similar a los generados con aditivos comerciales, con aplicaciones posibles en la industria de polímeros.
<b>Salmerón-Alcocer et al. (2003)</b>	Extracto de nejayote	Tratamiento de nejayote	Tratamiento biológico con bacterias; Aislamiento de bacterias con posible aplicación para degradar hidrocarburos aromáticos y derivados Disminución en DQO.
<b>Carvajal-Millán, Rascón-Chu y Márquez-Escalante (2005)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Obtención de goma de maíz	Patente de la obtención de goma de maíz.
<b>Niño-Medina, Carvajal-Millán, Gardea-Bejar, Rascón-Chu, y Márquez-Escalante (2007)</b>	Extracto de nejayote	Obtención de goma de maíz	Caracterización de la goma obtenida a partir del medio alcalino; Xilosa y arabinosa y obtención de goma de maíz con posibles aplicaciones en la industria alimenticia.
<b>Durán-de Bazúa, Sánchez-Tovar, Hernández-Morales, y Bernal-González (2007)</b>	Extracto de nejayote	Tratamiento de nejayote	Tratamiento para capacidades bajas (0.5 a 50 cm <sup>3</sup> /día), poco redituable, Tratamiento para capacidades altas (2500 m <sup>3</sup> /día), con producción de 9.6-16.8 m <sup>3</sup> de metano por tonelada de maíz, 23 kg de residuos sólidos y 10.6 kg de biomasa para elaboración de pellets como alimento de peces.
<b>Ferreira-Rolón, Ramírez Romero y Ramírez-Vives (2014)</b>	Extracto de nejayote	Tratamiento de nejayote	Tratamiento de nejayote con burbujeo previo de CO <sub>2</sub> ; 90 % de remoción de materia orgánica total 50 % de recuperación de sólidos y sedimentación de calcio. Generación de metano del 90 % del biogás obtenido.



<b>Blanco-Gómez et al. (2008)</b>	Extracto de nejayote	Aislamiento y caracterización de bacterias	Microorganismos bacilos gram positivos con actividad catalítica con un 96-99 % de similitud a <i>Bacillus megaterlum</i> , productora de enzima penicilina G acilasa.
<b>Niño-Medina et al (2009) y Paz-Samaniego et al. (2015)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Obtención de polifenoles	Se obtuvieron valores de rendimiento superiores al 81 % de AX y presencia de polifenoles con una diferencia significativa a partir de nejayote en diferentes tiempos de nixtamalización.
<b>Sánchez-González et al. (2011)</b>	Extracto de nejayote	Aislamiento y caracterización de bacterias	Obtención de <i>Bacillus flexus</i> , cepa NJY2, enzimas endo-1,4-B-xilanasas y esterases, importantes en la industria del papel, removiendo hasta el 95 % de la lignina de la madera, además de participar en la clarificación de jugos y vinos, en la obtención de saborizantes como la vainillina y mejoran la textura y sabor de productos de panificación.
<b>Ramírez-Romero, Reyes-Velázquez y Cruz-Guerrero (2013)</b>	Extracto de nejayote	Medio de cultivo para bacterias	Bacterias ácido lácticas para generación de probióticos con producción de bacteriocinas.
<b>Acosta-Estrada et al. (2014)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Productos de panificación	Mejora en características sensoriales y nutritivas
<b>López-Pacheco et al. (2019)</b>	Extracto de nejayote	Tratamiento de nejayote	Medio de cultivo para microalgas a base de nejayote y aguas residuales porcinas
<b>Acosta estrada et al. (2019)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Obtención de polifenoles	Aumento en el contenido fenólico y propiedades antioxidantes por fermentación por hongos
<b>Díaz-Montes et al. (2022)</b>	Sólidos del extracto de nejayote	Obtención de polifenoles	Se logró obtener ácidos fenólicos a través de micro y ultrafiltración

**Tabla 3.** Ejemplos de procesos convencionales de tratamiento de agua.

<b>Métodos Físicos</b>	<b>Métodos Químicos</b>	<b>Tratamiento Biológico</b>
Principalmente utilizados para la separación de partículas sólidas, en función de la composición fisicoquímica del agua residual.	Implican altos costos de material invertido en el proceso, así como elevado consumo energético, representando alrededor del 50% de los costos operativos.	Generan residuos secundarios, presentando poca eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo, los cuales son los principales causantes de la eutrofización en cuerpos de agua receptores.
Filtración, Sedimentación, Filtración por membrana, Floculación	Tratamientos Electroquímicos, Intercambio Iónico, Adsorción, Coagulación, Precipitación Química	Lodos activados, lagunas de Oxidación, Digestión anaerobia, Filtros Biológicos
Principalmente utilizados para la separación de partículas sólidas, en función de la composición fisicoquímica del agua residual.	Implican altos costos de material invertido en el proceso, así como elevado consumo energético, representando alrededor del 50% de los costos operativos.	Generan residuos secundarios, presentando poca eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo, los cuales son los principales causantes de la eutrofización en cuerpos de agua receptores.



#### **4. Sistemas algales como estrategia de remediación de aguas residuales: una propuesta de uso**

El término algas comprende un amplio espectro de organismos fotosintéticos eucarióticos que crecen en diferentes entornos acuáticos; éstas han sido estudiadas por sus aplicaciones potenciales en alimentos, biocombustibles, agricultura, tratamiento de aguas, cosméticos, nutraceúticos entre otros, al ser una fuente de biomoléculas y metabolitos de gran importancia económica (López et al., 2019; Álvarez-Díaz et al., 2017; Colorado Gómez et al., 2013).

Las algas incluyen a las cianobacterias procariontas o también conocidas como algas verde-azules (Liu et al., 2020), abarcando desde organismos procariontas unicelulares hasta eucariotas multicelulares. Asimismo, pueden ser categorizadas con base en su tamaño, en microalgas y macroalgas (Liu et al., 2020). Por un lado, las microalgas son de tamaño microscópico (1 a 200  $\mu\text{m}$ ), típicamente unicelulares y clasificadas en procariontas, tales como cianofíceas y proclorófitas; y eucariotas, tales como clorocifeas, crisofíceas, haptofíceas, bacilarofíceas, pirrofíceas y euglenofíceas (González Céspedes, 2015). Por su parte, las macroalgas son organismos multicelulares visibles al ojo humano (mayor a 2 mm) (Chaturvedi et al., 2020; Núñez Avellaneda et al., 2008); siendo estas últimas clasificadas en tres grandes grupos: 1) las algas verdes (chlorophyta), algas pardas (pheophyceae) y algas rojas (rhodophyta) (Zhao et al., 2018).

Es importante señalar que, típicamente en ambientes acuáticos, el carbono inorgánico se encuentra en las formas de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  dependiendo principalmente de las condiciones del medio: pH, temperatura y salinidad. A un pH de 6, cerca del 50 % del carbono inorgánico se encuentra en forma de

$\text{CO}_2$ , y el otro 50% en forma de bicarbonato; mientras que a un pH de 9, el 50 % de carbono orgánico se encuentra como bicarbonato, y el otro 50 % en forma de carbonato con poco o nada de  $\text{CO}_2$ . Estos son datos relevantes, ya que todas las algas requieren una fuente de carbono para su desarrollo. Estos organismos pueden recolectar  $\text{CO}_2$  y nutrientes como el bicarbonato (Borowitzka, 2018); siendo la temperatura un parámetro importante en su proceso nutritivo, ya que la solubilidad del carbono inorgánico disminuye cuando ésta aumenta (Borowitzka, 2018; Kumar et al., 2022). Asimismo, dentro de los medios acuáticos de cultivo algal también existen otras fuentes orgánicas y nutritivas de carbono como ácidos orgánicos, glucosa, acetato o glicerol (Kumar et al., 2022), lo cual los convierte en medios eficientes de producción de biomasa.

El nitrógeno, fósforo y azufre son otros de los principales nutrientes requeridos por los sistemas algales (Álvarez-Díaz et al., 2017; López-Sánchez et al., 2022) para la producción de biomasa con aplicaciones comerciales (López-Sánchez et al., 2022). Lo anterior, ha aumentado el interés en la producción de estos organismos acoplada al tratamiento de aguas residuales, como una alternativa a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales (Rearte et al., 2021). La fuente de nitrógeno dentro de un sistema de cultivo algal puede ser de forma inorgánica ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) u orgánica ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ); en orden de preferencia el alga consumirá principalmente  $\text{NH}_4^+$  antes que  $\text{NO}_3^-$ ; en agua  $\text{NH}_4^+$  existe en equilibrio con  $\text{NH}_3$ , por lo que mientras mayor alcalinidad exista en el medio, se incrementarán los niveles de  $\text{NH}_3$ , lo que puede resultar tóxico para las algas (Borowitzka, 2018), ya que en concentraciones mayores a 100  $\text{mg L}^{-1}$  algunas especies pueden verse afectadas.



Sin embargo, muchas especies son altamente tolerantes a concentraciones más altas ( $180 \text{ mg L}^{-1}$ ), lo cual está relacionado con el control de las condiciones del medio de cultivo como pH, temperatura e intensidad lumínica (Dai et al., 2012; Kumar et al., 2022)

En este contexto de aprovechamiento de medios nutritivos, las microalgas y macroalgas son consideradas una alternativa amigable, particularmente en la remoción y aprovechamiento de nitrógeno y fósforo. Como organismos fotosintéticos generan oxígeno y asimilan  $\text{CO}_2$ , lo que puede beneficiar la interacción alga-bacteria, donde el oxígeno generado puede ser utilizado por las bacterias para la oxidación del carbón orgánico; mientras que el  $\text{CO}_2$  generado puede ser utilizado por las algas como fuente de alimento (Liu et al., 2020). Es por ello que las algas han cobrado importancia como alternativa tecnológica para recuperación de nutrientes de aguas residuales. En el caso del agua residual del proceso de nixtamalización, Delgadillo et al. (2018) reportaron crecimiento algal y remoción de nutrientes usando la microalga *Coelastrella sp.*, en medios de cultivo de nejayote con concentraciones al 50 % y 20 %; mientras que otros trabajos (López-Pacheco et al., 2019) reportaron el uso de *Chlorella vulgaris* para remediación de agua residual de cerdos en combinación con nejayote logrando una remoción del 91 % del nitrógeno total, en un periodo de 20 días en un medio de cultivo con mayor proporción de nejayote que de agua residual de cerdos.

La producción de biomasa algal se considera un parámetro importante a considerar en su crecimiento, debido a la relación entre el incremento de biomasa y la capacidad de remoción de nutrientes (Cao et al., 2022; Kumar et al., 2022). La biomasa obtenida de las algas puede tener distintos propósitos y

aplicaciones, que incrementan la rentabilidad de su uso. Si bien, en su mayoría los estudios se han orientado al uso de las microalgas, a pesar de las ventajas que representan, esta tecnología busca ser mejorada debido a los cuellos de botella que limitan su escalamiento (Cao et al., 2022).

Uno de los mayores retos en el escalamiento de un proceso de cultivo de microalgas es la recuperación completa de la biomasa, lo que puede representar hasta un tercio de los costos operativos del proceso. Las tecnologías de cosecha más usadas se enfrentan a desafíos relacionados principalmente a los tamaños microscópicos de las células, su baja densidad y su estabilidad coloidal. Algunas microalgas como *Arthrospira*, *Chaetoceros*, *Chlorella*, *Dunaliella* e *Isochrysis* son las cepas más cultivadas con fines comerciales y su tamaño ronda de los 2 a  $20 \mu\text{m}$  (González Céspedes, 2015; Suparmaniam et al., 2019).

Por otro lado, las macroalgas, respecto a las microalgas poseen mayor resistencia a la depredación, así como mayor facilidad de cosecha de su biomasa, debido al tamaño macroscópico que presentan, el cual está entre los 0.001 y 2 mm; lo anterior reduce significativamente el costo y complejidad de su implementación en sistemas de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, este tipo de cepas algales presentan una productividad menor de lípidos, de biomasa, y de moléculas de alto valor agregado, respecto a las microalgas (Liu et al., 2020).

Un tipo de macroalgas usadas para la remediación de efluentes residuales son las algas filamentosas, reportándose casos de éxito en torno a su uso para la remoción de nutrientes y producción de biomasa (Liu et al., 2020; Rearte et al., 2021). Asimismo, este tipo de organismos poseen mayor resistencia a la depredación por otros organismos, y



debido a su mayor tamaño se facilita la recuperación de biomasa (Liu et al., 2020).

Un proceso de biorremediación con algas filamentosas tiene la capacidad física de retener el alga filamentosa y enriquecer el monocultivo de una sola especie, obteniendo una biomasa más consistente. La capacidad de las algas filamentosas de aumentar el tiempo de retención de sólidos por encima del tiempo de residencia hidráulica de las aguas residuales asegura operaciones robustas a pesar de las fluctuaciones, incluso durante eventos de lluvia intensa que pueden ser particularmente problemáticos para las microalgas (Liu et al., 2020). En la Tabla 4 se presenta una recopilación de trabajos en torno al uso de algas filamentosas para la biorremediación de aguas residuales para el aprovechamiento eficiente de los nutrientes contenidos en las mismas.

Algunas otras especies de algas filamentosas identificadas como especies dominantes en los sistemas de biorremediación de agua son *Cladophora*, *Klebsormidium*, *Stigeoclonium* y *Rhizoclonium* (Hariz et al., 2023). Éstas especies presentan tolerancias a amplios rangos de temperatura y salinidad (Hariz et al., 2023), por lo que podrían ser una alternativa factible y de bajo costo para la remediación del agua proveniente del proceso de la nixtamalización del maíz.

En el caso particular de *Rhizoclonium* su clasificación científica (*Rhizoclonium* sp.) pertenece al reino Plantae, del orden Cladophorales, phylum Chlorophyta, familia Cladophoraceae, clase Ulvophyceae y género *Rhizoclonium*. Esta alga se describe como filamentos uni-seriados no ramificados, con células cilíndricas y estructura rizoidal (Zhao et al., 2018). Las células suelen ser más del doble de largas que anchas, a veces con paredes gruesas y laminadas, cada una con un cloroplasto parietal reticulado y varios

pirenoides y núcleos. Su reproducción es por fragmentación o acinetos: zoosporas biflageladas y gametos cuadriflagelados (Saengsawang et al., 2020). Con un diámetro de 10-50  $\mu\text{m}$  es una especie dominante y a menudo se encuentra en ambientes acuáticos de características alcalinas o salinas, con tolerancia a temperaturas reportadas desde los 15 °C a los 24 °C (Liu et al., 2020).

Las algas filamentosas pueden ser cultivadas en sistemas depuradores de nutrientes o FANS (sistema depurador de nutrientes con algas filamentosas, por sus siglas en inglés) diseñados para promover el tratamiento de aguas residuales en un sistema controlado (Hariz et al., 2023), tal como se presenta en la Figura 1; demostrado un gran potencial para biorremediación sustentable de un amplio espectro de aguas residuales debido a su efectividad y bajo costo (Sutherland et al., 2020). Se ha reportado que en un sistema FANS protegido o en interiores es posible obtener monocultivos de algas filamentosas como la especie dominante (Hariz et al., 2023).

El sistema FANS fue desarrollado en los años 80's como una tecnología para tratamiento de aguas residuales basada en la asociación de comunidades complejas de microorganismos conocidos como perifiton. El perifiton consiste en comunidades microbianas de auto-siembra que incluyen algas filamentosas adheridas a una pantalla.



**Tabla 4.** Sistemas de algas filamentosas la para biorremediación de aguas residuales.

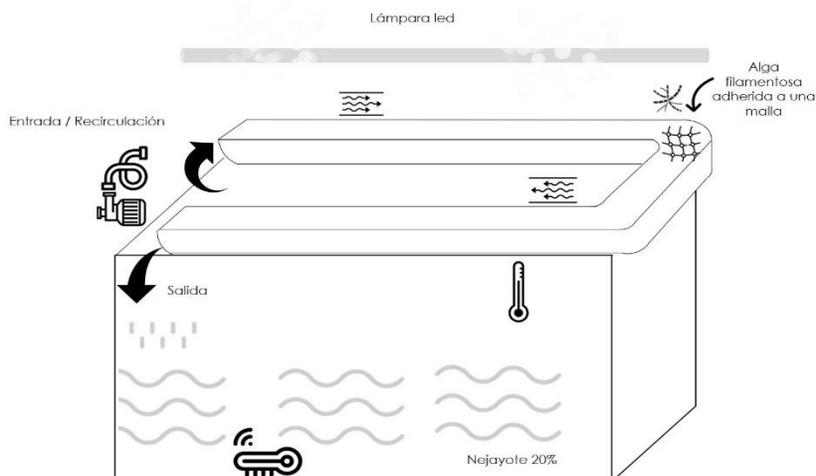
Referencia	Especie	Hallazgos y tipo de efluente utilizado
Liu et al., 2016	<i>Stigeoclonium sp.</i>	Se reportó crecimiento algal y remoción de nutrientes en agua residual hortícola, además de ser la especie predominante con velocidad de flujo de 2 L min <sup>-1</sup>
Rearte et al., 2021	<i>Stigeoclonium</i>	Presentó un mejor desempeño en remoción de nutrientes y producción de biomasa, en un medio de agua residual proveniente de rastro, en comparación con <i>Chlorococcum sp.</i> (microalga).
Cao et al., 2022	<i>Leptolyngbya</i> , <i>Geitlerinema</i>	Se observó el crecimiento y la proliferación de estas especies filamentosas en un sistema granular microalgal-bacteriano de tratamiento de aguas residuales salinas, con un impacto positivo en la remoción y en el contenido de lípidos en la biomasa.
Kangas y Mulbry, 2014 <sup>a</sup>	<i>Ulothrix</i>	Esta especie fue utilizada para realizar un estudio de costos y determinar la tasa de remoción de nutrientes, N y P, de agua residual proveniente de esorrentía agrícola, reportando una remoción de 125 mg de Nitrógeno y 25 mg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> de fósforo.
Ray et al., 2015 <sup>b</sup>	<i>Ulva intestinalis</i>	Reportada como la especie dominante en un sistema ATS (Algal Turf Scrubber) para remediación de agua residual acuícola de ostras.
Kebede-Westhead et al., 2006 <sup>c</sup>	<i>Microspora willeana</i> , <i>Ulothrix ozonata</i> , <i>Rhizoclonium hieroglyphicum</i> y <i>Oedogonium sp.</i>	Se evaluó la producción, recuperación y composición de la biomasa de un consorcio de algas filamentosas, obtenida de la remediación de efluentes de estiércol porcino en cuatro tasas de carga de efluente, obteniendo los mejores resultados a 0.40 L m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> .
Marella et al., 2019 <sup>d</sup>	<i>Spirogyra</i>	Se utilizó esta especie para la obtención de biodiésel a partir de biomasa obtenida por el tratamiento de aguas residuales domésticas primarias.

\*De acuerdo al autor, proveniente de la industria petroquímica, farmacéutica, curtidora y de procesamiento de mariscos.

<sup>a, b, c y d</sup> Adaptado de Liu et al., 2020.

La pantalla se sumerge a poca profundidad en aguas residuales para que los nutrientes puedan ser absorbidos por los organismos en

el perifiton. Posteriormente la biomasa puede ser removida físicamente usando un raspador y tiene aplicaciones principalmente en la



**Figura 1.** Sistema FANS.

industria de biocombustibles (Hariz et al., 2023; Saengsawang et al., 2020).

Si bien la implementación de un sistema FANS para biorremediación de agua residual presenta ventajas, tales como la facilidad de recuperación de biomasa, eficiencia en remoción de nutrientes y costos operativos más bajos por la incorporación de algas filamentosas frente a los sistemas de biorremediación con microalgas, es importante señalar que la selección adecuada de la especie de alga filamentosa a utilizar es uno de los parámetros más importantes (Hariz et al., 2023). En torno al cultivo usando estos sistemas deben considerarse algunos criterios claves, tal como su productividad por área, adaptabilidad a condiciones variables, dominio competitivo sobre especies no deseadas (habilidad de establecer rápidamente densidad algal constante) y capacidad de mantener una composición bioquímica consistente (Liu et al., 2020). Condiciones de cultivo en donde sea regulado el pH, intensidad lumínica, temperatura y velocidad del flujo de agua (Park et al., 2022), pueden favorecer el dominio de una especie

sobre otra dentro de este tipo de sistemas (Hariz et al., 2023).

Es importante señalar que las algas filamentosas también pueden causar algunos inconvenientes en su cultivo dentro de este tipo de sistemas, tales como su adhesión a las salidas de las tuberías o paredes de estanques, por lo que pueden requerir un paso adicional en el proceso de remoción periódica. Además, si se permite que se desarrollen mantos extensos en la superficie del agua, puede resultar en una reducción en el uso de la luz en las secciones más profundas de los estanques (Liu et al., 2020), causando menor densidad de crecimiento.

Por otro lado, el caudal es un factor vital que determina la capacidad del agua para retener y transportar sólidos en suspensión; éste puede facilitar la absorción de nutrientes al traer metabolitos a los sitios de reacción y llevarse los desechos metabólicos. Otros autores han reportado que, bajo las mismas condiciones de luz y temperatura, la producción de biomasa en algas filamentosas fue significativamente mayor a un caudal de  $100 \text{ L h}^{-1}$  que a  $25 \text{ L h}^{-1}$  (Liu et al., 2016). Sin embargo, el esfuerzo cortante causado por el



flujo de agua puede romper la adherencia de las algas al sustrato de soporte. En este sentido resulta necesario considerar al caudal como un factor crítico en la determinación de la comunidad de algas, la producción de biomasa y eliminación de nutrientes en estos sistemas (Liu et al., 2016; Park et al., 2022). El uso de algas filamentosas cobra importancia principalmente por la ventaja operativa en el proceso de recuperación de la biomasa, lo cual permite reducir los costos asociados con la operación.

## 5. Conclusiones y perspectivas

En este trabajo ha sido presentada una propuesta de uso de cepas algales para el tratamiento de aguas residuales nixtamalizadas; usando cepas de algas filamentosas en sistemas FANS.

El agua nixtamalizada con alto potencial de producción en México es un efluente de contaminación importante, debido a su alcalinidad y a su alto contenido de materia orgánica. Convencionalmente es tratada para el aprovechamiento de su contenido sólido en la industria alimenticia, dejando el remanente líquido como un problema persistente de contaminación.

En este sentido, los sistemas algales, tanto de microalgas como de macroalgas se presentan como una alternativa de remediación a efluentes de aguas residuales agresivos, tal como el agua de nejayote; el alto contenido de nutrientes dentro de estos efluentes contaminantes es útil para el crecimiento de la biomasa algal, al mismo tiempo que se logra su remoción del agua.

Específicamente, el uso de sistemas macroalgales, como las algas filamentosas presentan alta resistencia a condiciones de cultivo altamente alcalinas y con alto contenido de materia orgánica, por lo que

podrían ser una alternativa de remediación del agua de nejayote. En este sentido, su cultivo en sistemas FANS se presenta como una alternativa de bajo costo de inversión y alta eficiencia, debido a su facilidad de uso.

Es importante señalar que, la optimización de este tipo de sistemas en función de sus variables operativas principales, podría ser una alternativa altamente factible en torno tanto a la remediación del agua, como a la obtención de productos de valor dentro de la biomasa algal. Eso último abre la oportunidad hacia esquemas completos de tratamiento de agua integrados bajo esquemas de biorrefinería en donde la biomasa algal sea aprovechada para la obtención de energía y otros productos de valor agregado; al mismo tiempo en el que se logra la integración del agua tratada a otros sectores con alta necesidad.

## Referencias bibliográficas

Acosta-Estrada, B. A., Villela-Castrejón, J., Perez-Carrillo, E., Gómez-Sánchez, C. E., & Gutiérrez-Urbe, J. A. (2019). Effects of solid-state fungi fermentation on phenolic content, antioxidant properties and fiber composition of lime cooked maize by-product (nejayote). *Journal of Cereal Science*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102837>

Álvarez-Díaz, P. D., Ruiz, J., Arbib, Z., Barragán, J., Garrido-Pérez, M. C., & Perales, J. A. (2017). Freshwater microalgae selection for simultaneous wastewater nutrient removal and lipid production. *Algal Research*, 24, 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.02.006>

Amin, M., Tahir, F., Ashfaq, H., Akbar, I., Razzaque, N., Haider, M. N., Xu, J., Zhu, H., Wang, N., & Shahid, A. (2022). Decontamination of industrial wastewater



using microalgae integrated with biotransformation of the biomass to green products. *Energy Nexus*, 6, 100089. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100089>

Borowitzka, M. A. (2018). Biology of microalgae. In *Microalgae in Health and Disease Prevention* (pp. 23–72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811405-6.00003-7>

Cao, J., Chen, F., Fang, Z., Gu, Y., Wang, H., Lu, J., Bi, Y., Wang, S., Huang, W., & Meng, F. (2022). Effect of filamentous algae in a microalgal-bacterial granular sludge system treating saline wastewater: Assessing stability, lipid production and nutrients removal. *Bioresource Technology*, 354. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127182>

Chaturvedi, V., Goswami, R. K., & Verma, P. (2020). Clean Energy Production Technologies Series Editors: Neha Srivastava · P Bioree neries: A Step Towards Renewable and Clean Energy. <http://www.springer.com/series/16486>

Colorado Gómez, M. A., Moreno Tirado, D. A., & Pérez Posada, J. L. (2013). Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La experiencia en La Guajira, Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 17(32), 113–126.

Dai, G. Z., Shang, J. L., & Qiu, B. S. (2012). Ammonia may play an important role in the succession of cyanobacterial blooms and the distribution of common algal species in shallow freshwater lakes. *Global Change Biology*, 18(5), 1571–1581. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02638.x>

De Gante González, A. de L. (2016). Descontaminación por electrocoagulación del líquido residual de nixtamalización. Tesis

de Maestría en Ciencias Ambientales, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Delgadillo, R. A., Chávez Vázquez, M., Cristina, M., & Palacio, R. (2018). Biorremediación del nejayote utilizando la microalga *Coelastrella* sp. (pp. 65-89) Libro Científico II, Universidad Autónoma Metropolitana.

Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2022). Analyzing the phenolic enriched fractions from Nixtamalization wastewater (Nejayote) fractionated in a three-step membrane process. *Current Research in Food Science*, 5, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.11.012>

Díaz-Montes, E., Castro-Muñoz, R., & Yáñez-Fernández, J. (2016). An overview of nejayote, a nixtamalization by product. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 8(2), 41–60. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2016.03.002>

DOF. (1994). Norma Oficial Mexicana DOF\_NOM-127-SSA1-1994.

DOF. (1998). DOF\_NOM-002-ECOL-1996.

DOF. (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-187-SSA1/SCFI-2002. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691995&fecha=18/08/2003&print=true2/27](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691995&fecha=18/08/2003&print=true2/27)

DOF. (2022). Norma Oficial Mexicana DOF\_NOM-001-SEMARNAT-2021. DOF.

Ferreira Rolón, A., Ramírez Romero, G., & Ramírez Vives, F. (2014). Aumento de la actividad metanogénica en lodos granulares, precipitando calcio en el nejayote mediante el burbujeo de CO<sub>2</sub>. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13(2), 517–525.



García, M. E. R., Saldívar, S. R. O. S., & Sinencio, F. S. (2008). *Nixtamalización del maíz a la tortilla: aspectos nutrimentales y toxicológicos* (1a ed.). Universidad Autónoma de Querétaro.

González Céspedes, A. (2015). *Microalgas*. ADN Agro, 11, 1–11.

Hariz, H. B., Lawton, R. J., & Craggs, R. J. (2023). Nutrient uptake and biomass productivity performance comparison among freshwater filamentous algae species on mesocosm-scale FANS under ambient summer and winter conditions. *Ecological Engineering*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106910>

Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). *Microalgas, cultivo y beneficios*. In *Revista de Biología Marina y Oceanografía* (Vol. 49, Issue 2, pp. 157–173). Universidad de Valparaíso. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>

Jones, E. R., Van Vliet, M. T. H., Qadir, M., & Bierkens, M. F. P. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 13(2), 237–254. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>

Kangas, P., Mulbry, W., (2014). Nutrient removal from agricultural drainage water using algal turf scrubbers and solar power. *Bioresour. Technol.* 152, 484–489. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.027>

Kumar, N., Banerjee, C., Chang, J. S., & Shukla, P. (2022). Valorization of wastewater through microalgae as a prospect for generation of biofuel and high-value products. *Journal of Cleaner Production*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132114>

Kebede-Westhead, E., Pizarro, C., Mulbry, W.W., (2006). Treatment of swine manure effluent using freshwater algae: production, nutrient recovery, and elemental composition of algal biomass at four effluent loading rates. *J. Appl. Phycol.* 18 (1), 41–46. [10.1007/s10811-005-9012-8](https://doi.org/10.1007/s10811-005-9012-8)Liu, J., Danneels, B., Vanormelingen, P., & Vyverman, W. (2016). Nutrient removal from horticultural wastewater by benthic filamentous algae *Klebsormidium* sp., *Stigeoclonium* spp. and their communities: From laboratory flask to outdoor Algal Turf Scrubber (ATS). *Water Research*, 92, 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.049>

Liu, J., Pemberton, B., Lewis, J., Scales, P. J., & Martin, G. J. O. (2020). Wastewater treatment using filamentous algae – A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 298). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122556>

López, G., Yate, C., Ramos, F. A., Cala, M. P., Restrepo, S., & Baena, S. (2019). Production of Polyunsaturated Fatty Acids and Lipids from Autotrophic, Mixotrophic and Heterotrophic cultivation of *Galdieria* sp. strain USBA-GBX-832. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46645-3>

López-Pacheco, I. Y., Carrillo-Nieves, D., Salinas-Salazar, C., Silva-Núñez, A., Arévalo-Gallegos, A., Barceló, D., Afewerki, S., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2019). Combination of nejayote and swine wastewater as a medium for *Arthrospira maxima* and *Chlorella vulgaris* production and wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 676, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.278>



López-Sánchez, A., Silva-Gálvez, A. L., Aguilar-Juárez, Ó., Senés-Guerrero, C., Orozco-Nunnelly, D. A., Carrillo-Nieves, D., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022). Microalgae-based livestock wastewater treatment (MbWT) as a circular bioeconomy approach: Enhancement of biomass productivity, pollutant removal and high-value compound production. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 308). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114612>

Marella, T.K., Datta, A., Patil, M.D., Dixit, S., Tiwari, A., (2019). Biodiesel production through algal cultivation in urban wastewater using algal flowway. *Bioresour. Technol.* 280, 222–228. [10.1016/j.biortech.2019.02.031](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.031)

Meraz, K. A. S., Vargas, S. M. P., Maldonado, J. T. L., Bravo, J. M. C., Guzman, M. T. O., & Maldonado, E. A. L. (2016). Eco-friendly innovation for nejayote coagulation-flocculation process using chitosan: Evaluation through zeta potential measurements. *Chemical Engineering Journal*, 284, 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.026>

Núñez Avellaneda, M., Marciales Caro, L. J., & Beltrán Gutiérrez, M. (2008). Microalgas acuáticas: La otra escala de la biodiversidad en la Amazonia colombiana.

Núñez, F., & Sempere, J. (2016). Estudio del mercado de producción, procesamiento, distribución y comercialización de la cadena de maíz-harina/nixtamal-tortilla en México. *Colegio de México*.

ONU. (2020). *The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020\_Spanish*.

Ray, N.E., Terlizzi, D.E., Kangas, P.C., (2015). Nitrogen and phosphorus removal by the Algal Turf Scrubber at an oyster

aquaculture facility. *Ecol. Eng.* 78, 27–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.028>

Rearte, T. A., Rodriguez, N., Sabatté, F., & Fabrizio de Iorio, A. (2021). Unicellular microalgae vs. filamentous algae for wastewater treatment and nutrient recovery. *Algal Research*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102442>

Rodriguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). De residuo a recurso Cambiando paradigmas para intervenciones más inteligentes para la gestión de aguas residuales en América Latina y el Caribe. [www.worldbank.org/](http://www.worldbank.org/)

Saengsawang, B., Bhuyar, P., Manmai, N., Ponnusamy, V. K., Ramaraj, R., & Unpaprom, Y. (2020). The optimization of oil extraction from macroalgae, *Rhizoclonium* sp. by chemical methods for efficient conversion into biodiesel. *Fuel*, 274. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117841>

Suparmaniam, U., Lam, M. K., Uemura, Y., Lim, J. W., Lee, K. T., & Shuit, S. H. (2019). Insights into the microalgae cultivation technology and harvesting process for biofuel production: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 115). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109361>

Sutherland, D. L., Burke, J., & Ralph, P. J. (2020). Increased harvest frequency improves biomass yields and nutrient removal on a filamentous algae nutrient scrubber. *Algal Research*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102073>

Valderrama-Bravo, C., Fuentes-Prado, E., Porras-Godínez, M. R., Ramírez-Ortiz, M. E., Reyna-Granados, M. A., & Gutiérrez-Cortez, E. (2022). Mechanical separation of a nixtamalization by-product (nejayote) and



scaling of filtration conditions from a pilot filter to a press filter of higher area. *Journal of Food Engineering*, 328. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111058>

Zhao, Z. J., Zhu, H., Liu, G. X., & Hu, Z. Y. (2018). Phylogenetic analysis of *Rhizoclonium* (Cladophoraceae, cladophorales), and the description of *rhizoclonium subtile* sp. nov. from China. *Phytotaxa*, 383(2), 147–164. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.383.2.2>