

Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica

Rubén Darío Candela Orduz

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental
Bucaramanga
2016

Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica

Rubén Darío Candela Orduz

Directora
Janet Bibiana García Martínez
Msc Ingeniería Química

Monografía de grado para optar el título de
Ingeniero Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia
Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente
Ingeniería Ambiental
Bucaramanga
2016

Contenido

Resumen	5
Problemática	7
Objetivos.....	8
Objetivo General.....	8
Marco referencial.....	9
Capítulo I. Las aguas residuales: conceptos, propiedades y tratamientos	13
Capítulo II. Microalgas: características, tipos y medios de cultivo.....	17
Capítulo III. Microalgas en el tratamiento de aguas residuales.....	25
Estudios sobre microalgas aplicadas a aguas residuales en contextos específicos: una revisión bibliográfica	26
Conclusiones.....	43
Recomendaciones	44
Bibliografía.....	45
Anexos	555

Índice de tablas

Tabla 1. Disposiciones de la Organización Mundial de la Salud sobre valores, elementos y sustancias permitidos en el agua para consumo humano.	56
---	----

Resumen

El objetivo principal de este trabajo de grado es hacer una revisión bibliográfica sobre el uso de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales, además reseñar los pronunciamientos internacionales y la legislación nacional sobre el tratamiento de aguas residuales que debe hacerse en Colombia. Partiendo del enunciado anterior se han propuesto tres objetivos específicos: (1) describir qué es el agua residual, sus características y sus principales conceptos relacionados; (2) realizar una apropiación teórica y conceptual sobre el concepto de microalga; (3) exponer estudios de caso llevados a cabo en diferentes contextos en los que se exponga el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales. Para llevar a cabo lo anterior se realizó una búsqueda de publicaciones académicas recientes hechas tanto en Colombia como en América Latina, España y Portugal, en bases de datos digitales como Redalyc, Dialnet, SciELO, OpenAccess, entre otras, y en bibliotecas como la biblioteca de la Universidad de Educación Abierta y a Distancia (UNAD) y en la Biblioteca Luis Ángel Arango, primando investigaciones que se hayan llevado a cabo después del año 2000, aunque sin dejar de lado libros y artículos cuya importancia sea muy relevante para el tema aquí tratado, sin importar el año de su publicación.

Palabras clave: Microalgas, Aguas residuales, Tratamiento, Revisión bibliográfica

Abstract

The purpose of this degree project paper is to make a literature review about the use of microphyte in wastewater treatment, and identify the international declarations and the national legislation about how this one should be done in Colombia. Based on what it was stated above, three specific objectives have been proposed: (1) describe what wastewater is, its characteristics and some related concepts, (2) make a theoretical and conceptual appropriation about the term Microphyte; (3) Explain case studies carried out in different contexts where microphyte is used for wastewater treatment. To accomplish our objectives, it was necessary to conduct a research by checking the current studies made in Colombia, Latin America, Spain and Portugal published in some digital bases such as Redalyc, Dialnet, SciELO, OpenAccess, among others, and in two libraries; the Educación Abierta y a Distancia university (UNAD) and the Luis Ángel Arango one. It was given a significant attention to research that has been carried out after the year 2000 without setting aside important books and articles to this concerning topic regardless of the year of publication.

Key words: Microphyte, Wastewater, Treatment, Literature Review

Problemática

El agua dulce, necesaria para conservar la vida en el planeta se ha convertido en un recurso escaso. Por esta razón, las aguas residuales son usadas cada vez más para la agricultura, especialmente en las zonas más pobres y subdesarrolladas del planeta. Aunque, en principio, esto puede generar beneficios tanto para las plantaciones como para la economía de los agricultores, especialmente aquellos con pequeñas propiedades y recursos para su explotación, si su uso es indiscriminado puede generar problemas serios en la salud humana. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2016), entre las enfermedades que pueden ser transmitidas o desarrollarse por medio de las aguas residuales, especialmente de las aguas residuales domésticas, están la cólera, diarrea, tifoidea y fiebres entéricas paratifoideas, entre otras.

Teniendo en cuenta esto, ha surgido la necesidad de encontrar medios para el tratamiento de las aguas residuales que puedan ser tanto eficientes como de bajo costo con el fin de ser implementados en lugares donde los recursos económicos sean escasos. En las últimas décadas el uso de microalgas se ha convertido en una alternativa viable para llevar a cabo este propósito, por lo que las investigaciones al respecto se han impulsado. Partiendo de ahí, es necesario realizar un recorrido bibliográfico sobre esta temática, con el fin de conocer hasta dónde han llegado los estudios y de esta manera, dar un primer paso en la formulación de nuevas ideas y conceptos sobre este punto, tan esencial en la preservación del bienestar humano.

Objetivos

Objetivo General

Realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales, basada en publicaciones realizadas en Colombia y América Latina entre los años 2000 y 2015.

Objetivos específicos

- Describir qué es *agua residual*, sus características y sus principales conceptos relacionados.
- Realizar una la apropiación teórica y conceptual del concepto de *microalga*.
- Exponer estudios de caso llevados a cabo en Colombia y Latinoamérica, entre el año 2000 y el 2015 en los cuales se ilustre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales.

Marco referencial

Se estima que el volumen de los efluentes domésticos generados por Norte América, Europa y América Latina por cada habitante es de aproximadamente de 70, 63 y 47 m³ por año, respectivamente (UN Water, 2009). Por lo tanto, el principal desafío de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) no sólo es producir agua limpia reutilizable, sino también encontrar nuevas tecnologías para apoyar dicha actividad (Chan, Chong, Lang & Hassell, 2009). Las técnicas convencionales pueden eliminar sólo una fracción total del nitrógeno y fosforo (hasta el 40 y 12% respectivamente) presente en el efluente (Carey & Migliaccio, 2009). Los efluentes de una PTAR comúnmente muestran valores de N y P cercanos a 20-70 y 4-12 mg/L respectivamente (Carey & Migliaccio, 2009) mientras que, de acuerdo con la Directiva Europea 98/15/EC la concentración final de N y P no puede ser superior a 10 mg/L, por lo tanto todavía hay una clara necesidad de nuevos desarrollos y los sistemas biológicos son considerados a menudo como el medio idóneo para responder a tal demanda (Rawat et al., 2011), (citados en Durruty, 2013).

Según la Resolución 0631 del Ministerio de Ambiente de Colombia, se han establecido ocho sectores productores de aguas residuales (servicios públicos, alcantarillado, agricultura, ganadería, minería, hidrocarburos, manufactura y servicios varios) y setenta y tres actividades productivas. Esta resolución actualiza el Decreto 1594 de 1984. En este documento se establecen nuevos límites en las concentraciones de compuestos químicos y biológicos en las aguas residuales para cada uno de los ocho sectores de manera individual. Además, esta misma disposición gubernamental estipula que todos los vertimientos deben estar libres de coliformes y cualquier otro patógeno: en las aguas residuales no domésticas,

por ejemplo, los plaguicidas con Categoría Toxicológica IA, no pueden superar los 0,001mg/L, para los plaguicidas de categoría Toxicológica IB no podrá ser mayor a 0,05mg/L y de 0,10 para los plaguicidas de Categoría Toxicológica II (MinAmbiente, 2015).

Teniendo en cuenta esto, el tratamiento de aguas residuales se realiza por etapas donde el número de fases depende del tipo de agua residual y los costos que se generen. Este proceso se describe a continuación:

Etapas preliminar: en esta etapa se remueven sólidos o materiales de gran tamaño (madera, telas materia fecal, entre otros) que pueden taponar tuberías o dañar equipos. Este proceso se realiza al hacer pasar el caudal a través de barras metálicas espaciadas 20-60 mm que cumplen el papel de un cribado, reduciendo la velocidad de flujo (0.2-0.4 m/s) permitiendo que haya retención de sólidos

Posterior a retirar los materiales de gran tamaño se entra en la Primera etapa del proceso en la cual se busca separar cerca del 70% de los sólidos sedimentables presentes en el agua. Este proceso se realiza en tanques en los que un volumen determinado de agua residual tiene un tiempo de retención hidráulico que permite a los fluidos segregarse y a los materiales diferenciarse por densidad por efecto de la gravedad. Un tanque de sedimentación bien diseñado y con tiempos de retención altos puede llegar a disminuir la DBO en un 40% en forma de sólidos sedimentables. Además de esto, se puede presentar una disminución de los demás parámetros incluyendo los agentes patógenos. Teniendo en cuenta esto, en primer lugar, se hace una remoción de sólidos por medio de rejillas utilizadas para los elementos más grandes; posteriormente, se hace una remoción un escaneo o maceración, con el fin de eliminar

las arenas presentes en las aguas residuales; por último, se hace una sedimentación con tanque, tal como ya fue expuesto (Delgadillo, Pérez, Camacho & Andrade, 2010). En una *Segunda etapa* de tratamiento se busca disminuir la DBO y la DQO reduciendo la materia orgánica. En esta etapa se utilizan métodos biológicos como el uso de algas y/o bacterias que usan la materia orgánica. El agente reductor (alga/bacteria) puede ser manejado como una capa que recubre una superficie por la cual se hace recorrer el agua a tratar o se puede tener una mezcla donde se mantiene el agente reductor disperso en el líquido con ayuda de agitadores mecánicos (Horan, 1990). En esta etapa se puede reducir los agentes patógenos en un 90% pero la remoción de virus es mucho más variable el cual se puede remover de manera exitosa con adsorción.

La última etapa o *Etapa terciaria* está enfocada en reducir iones orgánicos, los cuales se pueden eliminar por medios químicos o biológicos. Sin embargo, la remediación química es por lo general muy costosa y lleva a una contaminación secundaria por lo cual se tiene preferencia por la remediación biológica.

Una etapa terciaria que está diseñada a remover iones amonio, nitratos y fosfatos cuesta cuatro veces más que la etapa primaria y una Cuarta etapa dispuesta a remover metales pesados, compuestos tóxicos y minerales solubles puede costar entre 6 a 8 veces más lo de la primera etapa. (Oswald (1988), citado en Delgadillo, Pérez, Camacho & Andrade, 2010). En estas dos últimas etapas se tiene preferencia por el uso de remediación biológica y más específicamente algas las cuales está demostrado pueden reducir esa clase de contaminantes, incluidos metales pesados.

La *etapa de desinfección* se usa únicamente cuando hay presencia de organismos infecciosos aún después de pasar por las cuatro etapas anteriores. Esta etapa es fundamental cuando el agua se va a clasificar como residual. Pueden presentarse procesos como irradiación con partículas (rayos x o ultravioleta) o el uso de ácidos (Delgadillo, Pérez, Camacho & Andrade, 2010).

Además de los métodos de tratamiento de aguas residuales con algas, se está experimentando con procesos innovadores o modificaciones de procesos ya existentes que apuntan a tratar grandes cantidades de aguas residuales en un tiempo aceptable, algo que es necesario para tratar los volúmenes de agua que una industria, un centro urbano o la agricultura generan. Estos procesos son:

Cultivos hiperconcentrados (Solovchenko et al., 2014)

Sistema de celdas algales inmóviles (Markov et al., 1995)

Cultivos de algas por diálisis (Marsot et al., 1991)

Fotobioreactores tubulares (Pirt et al., 1983)

Piscinas de estabilización (Kayombo et al., 1999)

Mantos algales (Adey, 1982)

Así, pues, las algas y especialmente las microalgas, se han ganado un espacio como alternativas para realizar efectivamente tratamientos en las aguas residuales, por lo que ha llegado ser publicada una bibliografía en la que es posible reconocer los alcances de estas técnicas, pero también los limitantes y los vacíos que posee. Todo esto es indispensable para establecer, dependiendo de casos específicos, qué tan viable puede ser el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales.

Capítulo I

Las aguas residuales: conceptos, propiedades y tratamientos

El concepto de *agua residual* hace referencia a todas las aguas que han sido, de una u otra manera, utilizadas en cualquier actividad humana (Romero, 2004, p. 17). De acuerdo con la procedencia de estas, pueden clasificarse en *aguas de escorrentía, domésticas* (fecales y de limpieza), *industriales* (comerciales e industriales) y *comerciales* (agrícolas y ganaderas). Las aguas de escorrentía son todas aquellas que se producen con la lluvia y caen sobre los tejados y los techos de casas y edificios y corren por las superficies hasta llegar a los sistemas de drenaje (González & Lozada, 2013). Las aguas residuales domésticas por su parte, son las aquellas que proceden de zonas residenciales y de servicios y materiales suspendidos tanto orgánicos como inorgánicos que pueden clasificarse en convencionales (sólidos suspendidos, los microorganismos patógenos, los sólidos coloidales y la materia orgánica carbonácea), no convencionales (metales, surfactantes, sólidos disueltos, entre otros) y en emergentes (detergentes sintéticos, antibióticos, hormonas, esteroides, otras medicinas, etc.) (Torres, 2012). Por otro lado, las aguas residuales industriales son todas aquellas que se obtienen de los procesos industriales, especialmente durante el proceso de producción de mercancías.

Las industrias productoras de aguas residuales se dividen en cinco grupos principales: las industrias con efluentes orgánicas (mataderos, lecherías, azucareras, fermentadoras, entre otras), las industrias con efluentes orgánicos e inorgánicos (refinerías, petroquímicas, textiles, etc.), industrias con efluentes inorgánicos (minerías, salinas, químicas, de limpieza, carboníferas, etc.), industrias con efluentes de suspensión (lavaderos minerales y

carboníferos, pulidoras de mármol, de metales, etc.) e industrias con efluentes de refrigeración (centrales térmicas y centrales nucleares) (Revista Ambientum, 2002). De esta manera, los contaminantes que poseen las aguas residuales industriales dependen del tipo de industria y sus características, a saber:

Industria láctea: las aguas residuales que produce la industria láctea son por lo general neutras o poco alcalinas, aunque se vuelven ácidas por la fermentación del azúcar de la leche, lo que produce ácido láctico, especialmente ante la ausencia de oxígeno y la formación de ácido butírico. Por esta razón, el pH puede descender hasta a 4,5–5,0. Las aguas residuales de la industria láctea posee sustancias orgánicas disueltas como lactosa, sales minerales y suspensiones coloidales de proteínas, entre ellas caseína, albúminas, y globulinas, con una DQO de entre 2000 y 4000 mg/L y una DBO de entre 2000 y 3000 mg/L (Arango & Sánchez, 2009).

Industria del curtido: alcalinidad, concentración de materia orgánica, materia en suspensión, materia decantable, sulfuros y metales pesados.

Industria papelera: color, concentración de materia orgánica, materia en suspensión y materia decantable, pH y AOX-EOX (Revista Ambientum, 2002).

Industrias de lavado de mineral: concentración de productos tóxicos empleados, sólidos en suspensión y sedimentables.

Industria de acabado de metales: pH, concentración de cianuros y metales pesados.

Industria siderúrgica: concentración de materia orgánica, fenoles, alquitranes, cianuros libres y complejos, sulfuros, materias en suspensión, hierro, aceites, grasas y pH.

Industria de laminación en caliente: concentración de aceites, grasas y sólidos en suspensión.

Plantas de ácido sulfúrico: concentración de ácidos, sólidos sedimentables, arsénico, selenio y mercurio” (Revista Ambientum, 2002).

De igual manera, y siguiendo su caracterización, las aguas residuales pueden clasificarse en *aguas blancas*, *aguas negras* y *aguas residuales industriales*:

Aguas blancas: las aguas blancas son en su mayoría aguas pluviales, que son, al mismo tiempo, las que generan buena parte de las aportaciones intermitentes de caudales. Estas aguas están la mayoría de las veces contaminadas con residuos producto de la actividad humana y por fugas en las redes de alcantarillado. Entre los componentes más comunes de las aguas blancas están papeles, colillas de tabaco, excrementos de animales, aceites, hidrocarburos, arenas, residuos de origen vegetal, biocidas, aguas solobres, entre otros.

Aguas negras: hacen referencia a las aguas residuales urbanas. Entre los componentes más comunes de estas aguas están microorganismos, urea, almidones, albumina, sulfatos, fosfatos, nitritos, sales, entre otros.

Aguas residuales industriales: son aguas que se producen en cualquier actividad de producción, transformación y manipulación en la que se utilice agua. Poseen diferentes composiciones y caudales, así como las características que componen sus vertidos, debido a la diversidad de industrias. Las aguas residuales industriales también pueden considerarse como aguas residuales urbanas, son las que más componentes contaminantes tienen y los más difíciles de eliminar. A pesar de los múltiples índices orgánicos e inorgánicos que producen las actividades industriales,

entre los componentes más comunes de las aguas residuales industriales están productos petrolíferos, metales pesados, fenoles, cianuros, productos radioactivos, detergentes, entre otros (Muñoz, 2008).

Además, dependiendo de su composición, las aguas residuales poseen características físicas y químicas. Entre las características físicas se encuentran los *sólidos totales* que es toda la materia residual que se obtiene cuando el agua es sometida a un proceso de evaporación a 105°C y pueden ser filtrables (disueltos) o no filtrables (suspensión); los *olores*, que son “producto de los procesos de descomposición de la materia orgánica”; la *temperatura*, que tiende a ser más alta en las aguas residuales que la temperatura de suministro, debido a los diversos procesos a los que es sometida el agua; la densidad, que es igual a la masa por la unidad de volumen y es la causante de la formación de corrientes de densidad en los fangos de sedimentación ; y el *color*, que en las aguas residuales es casi siempre gris por “la formación de sulfuros metálicos por reacción del sulfuro liberado en condiciones anaerobias con metales presentes en el agua residual liberada” (D’Alessandri, 2012)

En cuanto a las características químicas, se encuentra la materia orgánica, que proviene la mayoría de las veces de sólidos y líquidos animales y vegetales y de actividades humanas cercanas a la síntesis de orgánicos; la materia inorgánica como el fósforo, el nitrógeno, los sulfatos, los cloruros y gases como el oxígeno, el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco, el metano, el dióxido de carbono y el nitrógeno (D’Alessandri, 2012).

Capítulo II

Microalgas: características, tipos y medios de cultivo

Característica

Las microalgas pueden definirse como organismos unicelulares eucariotas y fotosintéticos. Las microalgas son esenciales en la producción primaria dentro de la cadena trófica, que es al mismo tiempo, la primera formadora de materia orgánica. poseen un tamaño promedio de entre 5 y 50 μm , lo que las hace fácilmente digeribles por muchos organismos cuya principal fuente alimenticia es el fitoplancton, poseen clorofila-a lo que les da un aspecto verdoso similar al de las plantas, por lo cual necesitan de la luz para desarrollarse y crear materia orgánica. Además, las microalgas son fuente de una buena cantidad de compuestos utilizados en diferentes industrias. Entre los principales pueden contarse:

los carotenoides, ficobiliproteínas, lípidos, polisacáridos, y compuestos con actividad biológica provenientes de los géneros más utilizados tales como *Dunaliella*, *Spirulina*, *Porphyridium*, *Chlorella* y *Hematococcus*.

Se han identificado más de 600 carotenoides producidos naturalmente en plantas, animales y hongos, de los cuales 400 han sido aislados y caracterizados; de éstos sólo un número reducido se utiliza comercialmente destacando entre ellos el β -caroteno y la *astaxantina* y solo 50 poseen actividad provitamina A. Los carotenoides hidrocarbonados se denominan colectivamente como carotenos y aquellos que contienen oxígeno se denominan xantofilas (Morales, Callejo & Mejía, 2007).

Las microalgas pueden sobrevivir en condiciones aisladas o en colonias en forma de agregados celulares. Se han encontrado aproximadamente treinta mil especies, que pueden

tener formas esféricas, elípticas, cilíndricas o en espiral, todas ellas contribuyendo de manera activa con el balance del oxígeno en el planeta Tierra representando casi el 50% de la fotosíntesis del mundo. De igual manera, las microalgas suponen la base de la cadena alimentaria global, con alrededor del 70% de la producción total de materia orgánica. Las microalgas, por tanto, pueden crecer y desarrollarse en casi todos los ambientes, aunque la mayoría pertenecen a sistemas marinos o de agua dulce, y en zonas maderables o húmedas. Su capacidad de adaptación depende. En cuanto al crecimiento y desarrollo de las microalgas, pueden evidenciarse cinco fases principales:

Tabla 1. Fases del crecimiento y desarrollo de microalgas

Fase	Duración	Características
Inducción	1 – 3 días	Comienza la absorción de nutrientes por parte de las células, además del proceso de adaptación al medio ambiente en el que se han desarrollado. En este estado, las células no tienden a dividirse, debido a que no existe todavía un contexto apropiado para este proceso, pues aún es necesario que se den ajustes en cuanto a las condiciones bioquímicas de los cultivos.
Exponencial	4 días	Se inicia cuando las células ya han logrado adaptarse, por lo que también su posible la multiplicación. Durante la fase exponencial, la división celular es mucho más rápida que en el resto de fases.
Estacionaria		La población algal se vuelve constante, sin llegar a aumentar. Su duración tiende a ser demasiado corta como para ser perceptible.
Declinación relativa del crecimiento	1 – 2 días	Durante esta fase disminuye la división celular, pues se dan factores desfavorables en los cultivos, además de agotamiento de los nutrientes, desajustes en el pH, disminución de irradiaciones solares, entre otros.
Muerte		Por el aumento en el número de bacterias, hongos y espumas presentes en el cultivo, las condiciones comienzan a hacerse cada vez más desfavorables para el desarrollo de microalgas. Se produce, pues, la muerte del cultivo.

Fuente: Autor, basado en el texto de Peña & Quiroz, 2013

Estas etapas de crecimiento y desarrollo de microalgas están ligadas a la existencia de cultivos artificiales, los cuales buscan asimilar lo más cercanamente posible al ambiente

natural, pero generando las condiciones para un cultivo controlado y funcional. Para que este propósito se lleve a cabo, es necesario que se den un número de condiciones garantizadas por parámetros como la iluminación, la temperatura, la salinidad y la aireación:

- Iluminación: fundamental para la fotosíntesis de las microalgas, por lo que no puede verse afectada por ningún obstáculo que impida su presencia.
- Temperatura: la reproducción de celular es mucho mayor cuando se encuentran a temperaturas favorables y estables. Las microalgas, casi todas sus especies, crecen en temperaturas que oscilan entre los 10 y los 35°C, aunque el rango óptimo se sitúa entre los 16 y los 24°C.
- Salinidad: la mayoría de especies de microalgas marinas se reproducen en salinidades cercanas al 30% e incluye a todas las sales que se encuentran disueltas en el medio, además de los carbonatos y de los bicarbonatos.
- Aireación: permite que los nutrientes que se encuentran en el medio posean una mayor difusión, además de conservar la suspensión de las microalgas y de suministrar el dióxido de carbono (CO₂), que sirve como fuente para la fotosíntesis y la estabilidad del pH en los cultivos (Peña & Quiroz, 2013).

Tipos de microalgas

Pueden encontrarse en la naturaleza diversas clases de microalgas. Generalmente, las microalgas son fotoautótrofas (obtienen la energía de la luz solar y se desarrollan a partir de

la materia inorgánica existente). Sin embargo algunas especies pueden crecer en condiciones fotoheterótrofas (obtienen la energía desde la luz del sol pero emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono). De igual manera, existen microalgas que pueden ser mixotróficas, ya que pueden crecer tanto por procesos fotoautótrofos como por fotoheterótrofos, por lo que las fuentes de energía provienen tanto de la luz del sol como de compuestos orgánicos. Ejemplos de este tipo de algas son las *Spirulina platensis* y *Chlamydomonas reinhardtii*. Por último, pueden encontrarse microalgas heterótrofas, las cuales se caracterizan por tomar la energía y el carbono únicamente de fuentes orgánicas. Por esta razón, esta especie de microalgas pueden desarrollarse en ausencia de luz solar. Un ejemplo de este tipo es *Chlorella protothecoides* (Ruiz, 2011).

Existen microalgas de agua fresca, que dependen de factores bióticos y abióticos con intercambios cíclicos que no se cierran completamente. Pueden encontrarse en diferentes hábitats naturales, desarrollando formas variadas, de acuerdo con el territorio: algunas de ellas, por ejemplo, que se desarrollan en ecosistemas acuáticos, poseen características físico-químicas particulares, como las *Coccomonas sp.* y *Hydrurus sp.*, las cuales habitan aguas que tienen contenidos elevados de calcio, mientras que en las aguas distróficas y con bajos valores de pH, las microalgas que más se desarrollan son las desmidiáceas. En otro tipo de aguas más ricas en nutrientes predominan las *Volvocales*, *Chlorococcales* y *Euglenofíceas*.

Existe un patrón de distribución que es predominante para ecosistemas acuáticos lóticos y otro para los ecosistemas acuáticos lénticos. Los ecosistemas acuáticos lóticos poseen la característica de estas en constante movimiento, por lo que se puede generar una oxigenación constante, además de renovar continuamente los nutrientes, por lo que es común la presencia de *Fragilaria sp.*, *Amphora sp.*, *Cocconeis sp.*, *Spirogyra sp.*, *Tribonema sp.*,

entre otras. De otro lado en aguas lóxicas con cargas minerales puede encontrarse cianofitas y diatomeas, mientras que en los ambientes acídulos predominan la *Chlamydomonas acidophila*, *Euglena mutabilis*, *Stichococcus minor* y *Microspora tumidula*, etc. Por último, en ríos y arroyos la flora fitoplanctónica es bastante diversa, con predominio de clorofitas o cianofitas, diatomeas y algas rodofíceas: *Ulotrix sp.*, *Spirogyra sp.*, *Achnantes sp.*, *Oedogonium sp.*, *Tribonema sp.*, *Cymbella sp.*, *Euglena sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Chlorella sp.*, *Navicula sp.*, *Nitzchia sp.*, *Zygnema sp.*, *Mougeotia sp.*, entre otras (Gómez, 2007).

Formas de cultivo

Existen dos tipos básicos de cultivo de microalgas: los cultivos abiertos, en los cuales la biomasa se encuentra expuesta a las condiciones del ambiente, y los cultivos cerrados (también llamados fotobiorreactores) en los que es posible aislar la biomasa de factores ambientales tales como contaminación y la lluvia; la escogencia del sistema de cultivo dependerá principalmente de las características de la biomasa a obtener (monoalgal o mezcla de varias), la resistencia de la cepa a contaminación (alta salinidad, alta temperatura, etc) la capacidad del escalado, la transparencia y durabilidad del material disponible, los costos de su construcción y las posibilidades comerciales (Hernández-Pérez & Labbé, 2014).

Los sistemas de cultivo abierto de microalgas, que se han popularizado desde los años cincuenta del siglo XX, se componen tanto de medios naturales (lagunas y estanques), como de otros artificiales con diseños variados: inclinados o de capa fina, circulares o de tipo carrusel. Posee grandes ventajas en el proceso de producción comercial de las microalgas, aunque las posibilidades de contaminación biológica, por la apertura constante, hacen muy difícil que pueda cultivarse un solo tipo de microalga, pues la contaminación del cultivo por

bacterias y demás microorganismos tiende a ser bastante elevada. Otro inconveniente que puede presentarse constantemente está relacionado con la temperatura, ya que en los cultivos abiertos es bastante complejo mantenerla estable, pues, aunque la evaporación ejerce efecto de refrigeración, las oscilaciones diarias que se presentan no son amortiguadas, además de que la evaporación provoca cambios en la composición iónica del medio de cultivo (AST Ingeniería, 2014).

Los sistemas de cultivo cerrado fueron desarrollados para suplir las necesidades y las desventajas que poseen los sistemas tradicionales de cultivo abierto, lo que los ha hecho también exitosos. A diferencia de estos últimos, los sistemas de cultivo cerrado se encuentran aislados de la atmósfera, lo que presupone una reducción de la contaminación y la posibilidad de llevar a cabo mayores controles en las condiciones presentes en el cultivo, lo que se traduce en mayor rentabilidad y comercialización. Hasta el momento, se han desarrollado cuatro formas de cultivo cerrado, dependiendo de las necesidades y de las condiciones de las microalgas:

- *Cámaras de algas*: son sistemas adaptados para las pequeñas escalas de producción. Se caracterizan por ser cultivos de algas escalares, en donde el volumen del cultivo va en constante aumento. En las cámaras de algas, el control de la temperatura se hace por medio de la combinación de termostatos y calefactores, mientras la luz, que siempre es artificial, llega por medio de tubos fluorescentes, con el fin de distribuirse de forma homogénea, emitiendo bajas cantidades de luz. Los controles de luz en las cámaras de algas son especialmente estrictos, por lo que los recipientes poseen tamaños diversos, de acuerdo con las

especificaciones tenidas en cuenta, entre 2,000 y 4,000 lux y una temperatura promedio entre 15 y 22°C.

- *Fotobiorreactores:* los fotobiorreactores tienen la función de forzar al máximo las condiciones necesarias para el crecimiento óptimo de las microalgas, reduciendo lo más posible las condiciones de contaminación y las pérdidas de CO₂. Teniendo en cuenta el tipo de diseño que se realice, los fotobiorreactores pueden ser planos o tubulares, horizontales, verticales, inclinados (verticales), serpentines o múltiples. Si se toma como referencia el modo de operación, estos pueden ser impulsados por aire o por bombas, reactores de una fase o reactores de dos fases. Para escoger un tipo de fotobiorreactor debe tenerse en cuenta la especie de microalga a cultivar, los niveles de resistencia a condiciones medioambientales, los costos derivados de la operación, y los recursos hídricos y de suelo con los que se cuente.

Además de los sistemas de cultivo abiertos y cerrados, en la actualidad se ha optado por llevar a cabo sistemas híbridos que mezclan pasos del sistema de fotobiorreactores y de lagunas abiertas o estanques. En la mayoría de los casos los sistemas de cultivo abierto poseen una primera etapa en la que se da la producción de biomasa por medio de fotobiorreactores para lograr un mejor control del contexto ambiental, por lo que la contaminación baja, mientras se propicia una elevada división celular y por consiguiente, un crecimiento más acelerado de las microalgas. Cuando el cultivo ha llegado a los niveles deseados se pasan al sistema abierto de lagunas o estanques con el fin de complementar la adquisición de nutrientes y demás productos que durante la etapa de los fotobiorreactores fueron deficientes o inexistentes (AST Ingeniería, 2014).

Los sistemas de cultivo heterotróficos se caracterizan por permitir el crecimiento de algas sin la necesidad de luz empleando altas concentraciones de carbono orgánico. En estos sistemas el cultivo se lleva a cabo en biorreactores agitados, lo anterior permite un cambio sencillo de escala, además de generar mayor densidad en la biomasa producida. De igual manera, los sistemas de cultivo heterotróficos poseen un control bastante elevado del crecimiento y reducen los gastos de producción, aunque también generan un consumo de energía elevado (AST Ingeniería, 2014).

Por último, teniendo en cuenta lo anterior, las microalgas han cobrado importancia en diversos campos de producción. Así, entonces, las microalgas han comenzado a ser relevantes en la acuicultura, en los biocombustibles, en estudios sobre contaminación, en las mareas rojas, en la productividad acuática, entre otros. En el caso de la acuicultura, las microalgas han sido importantes para el desarrollo y crecimiento de diversos organismos acuáticos; para el de especies diminutas como los copépodos, los rotíferos y la artemia; de larvas de moluscos gasterópodos y bivalvos como caracoles, almejas, mejillones, ostiones y callos de ancho; de camarones blancos, azules y cafés; de ranas toro; de peces como pargos y botetes; y de dulceacuícolas como carpas, tilapias y de ornato (Medina, Piña, Nieves, Arzola & Guerrero, 2012).

Capítulo III

Microalgas en el tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales es esencial, puesto que es un paso determinante para que el agua que ha sido usada por los seres humanos regrese al medio de forma aceptable y que continúe el ciclo hidrológico. Uno de los métodos más usados en la actualidad es la remediación biológica, que puede ser biorremediación, ficorremediación y rizorremediación. La biorremediación busca lograr el tratamiento de aguas residuales empleando microalgas y

cianobacterias. Las microalgas son muy efectivas en el tratamiento de aguas residuales especialmente porque tienen la capacidad de remover nutrientes y xenobióticos en estas aguas. Especies como *Scenedesmus quadricauda*, *Chlorella miniata*, *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sorokiniana* destacan por eliminar de manera eficiente metales pesados en las aguas residuales, además de poder crecer en medios contaminados (Forero, 2007).

C. vulgaris y *S. dimorphus* son muy eficaces (>95%) en la biorremediación de amoníaco y fósforo que se encuentran en las aguas residuales, de igual manera, *Tetraselmis sp*, *Chlamydomonas sp*, y *Nannochloris sp* tienen una alta tolerancia a altas concentraciones de CO₂ (Forero, 2007). Teniendo en cuenta esto, el uso de las microalgas se ha posicionado como uno de los métodos más eficaces para el tratamiento de aguas residuales. Su aplicación, se viene dando desde la primera mitad del siglo XX, de la mano de Cadwell, quien fue el primero en realizar estudios serios sobre el tema, y desarrollados con mayor profundidad a finales de la década de 1950, por Oswald, y durante los años sesenta por las investigaciones llevadas a cabo en Hollister, California – Estados Unidos (Salazar, 2005). En los últimos quince años se han llevado a cabo diversos estudios en América Latina sobre este punto, aunque ya a finales del pasado siglo se habían realizado investigaciones al respecto. A continuación, se llevará a cabo una descripción de algunos de estos, con el fin de comprender las técnicas y los procedimientos más usados.

Estudios sobre microalgas aplicadas a aguas residuales en contextos específicos: una revisión bibliográfica

Uso de *Tetraselmis* e *Isochrysis* T-ISO. Este ha sido un estudio realizado en aguas residuales de piscifactorías en la ciudad de Oporto, en Portugal, durante el año 2013. Se llevó a cabo un cultivo en cuadruplicado de minifotobiorreactores tubulares en 80 mL con aireación continuada y controlando el pH entre los 7,5 y los 8,0. De igual manera, los cultivos fueron mantenidos en un fotoperiodo de 12 horas de luz y otras 12 horas de oscuridad, dentro de una cámara termostataada con una temperatura promedio entre los 15°C y los 21°C. Teniendo en cuenta esto, se desarrollaron dos tipos de ensayos, de acuerdo con dos condiciones presentes en las aguas residuales de las piscifactorías: por un lado, efluentes que no habían sido tratados ni con filtración ni con tratamiento térmico de agua (EF-NT); por otro lado, aguas residuales que habían sido tratadas mediante una malla de 100µm y autoclavados a 121 °C durante veinte minutos. Por último, en cuanto al cultivo de *T. suecica* y T-ISO, este comenzó con densidad de 2,0 y 7,1x10⁶ células/mL, al tiempo que se llevaron a cabo dos tasas de renovación diariamente durante la fase de cultivo de las microalgas en un cultivo semicontinuo que fue entre el 15% y el 25% del volumen total (Freire, Sarradeiro, Lranjeira, Peña & Seixas, 2013).

Uso de microalgas en lagunas para depuración de aguas residuales urbanas. El trabajo investigativo titulado *Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas* fue realizado por Escorihuela et al (2007) en la ciudad de Zulia en Venezuela. El punto de partida de este proyecto fue comprender cómo es posible optimizar el uso de aguas residuales en el riego y la piscicultura, actividades en donde este tipo de líquido es muy apreciado. Los efluentes poseen nutrientes muy importantes que sirven para fertilizar y acrecentar el rendimiento de los cultivos y de las plantas. Por esta razón, las microalgas pueden cumplir una función

esencial en el proceso de tratamiento de las aguas residuales destinadas a este tipo de cultivos, pues, como ya fue dicho páginas atrás, los gastos operacionales y de mantenimiento son mucho más bajos y la eficiencia es igualmente alta.

Primer lugar se realizó un muestreo de nueve semanas durante dos meses, más exactamente entre el 14 de marzo y el 14 de mayo de 2005, en la laguna construida en el Centro de Investigación del Agua de la Universidad del Zulia. Las muestras fueron colectadas en vasos cerrados semitransparentes puestos en una cava portátil con hielo en el Laboratorio de Microorganismos Fotosintéticos del Departamento de Biología de la misma universidad. De igual manera, la densidad celular fue medida por medio de recuento celular, utilizando el hematocitómetro Neübauer. Por último, se realizó un muestreo de parámetros fisicoquímicos, teniendo en cuenta las siguientes variables: “demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), pH, nitrógeno total Kjeldahl y fósforo total (1) en el afluente y efluente del sistema estudiado” (Escorihuela et al, 2007).

A partir de estos procesos metodológicos y de método, el estudio encontró que la más abundante de las divisiones se dio entre la *Cyanophyta*, con un porcentaje de entre el 99,5% y el 98,11%, tanto en la población de entrada como en la de la salida. Entre la división presente, *Synechocystis* llegó a ser el más abundante, con aproximadamente el 96% del total de la población fitoplanctónica. De igual manera, se constató que el número de la población de entrada en la laguna fue superior a la de salida, con $303,73\text{cel.mL}^{-1}$ y $98,35\text{cel.mL}^{-1}$ respectivamente (Escorihuela & Otros, 2007). Teniendo en cuenta esto, la investigación puntualizó que:

- Las microalgas cianofitas del género *Synechocystis* tuvieron predominancia durante todo el monitoreo.

- Existió una importante disminución de los valores de entrada y salida de 60; 38; 31,5 y 7,64% para SST, DQO y NTK, mientras que el fósforo sólo disminuyó de forma moderada.
- La presencia de la comunidad de microalgas favorece la remoción de nutrientes, exponiendo la importancia que posee el tratamiento avanzado o pulimento de aguas residuales por medio de la remoción de la carga orgánica que se encuentre presente en ellas.

Microalgas clorofitas en el tratamiento de aguas residuales anaerobias. El uso de microalgas clorofitas en las aguas residuales puede significar una opción eficaz y rentable en la remoción efectiva de microorganismos indeseados en el líquido. Las microalgas clorofitas llegan a ser una herramienta eficaz si se tienen en cuenta variables precisas en cuanto a la luz, la temperatura, el efluente a tratar, el tipo de microalgas y la clase de cultivo. Teniendo en cuenta esto, Salazar, Bernal & Martínez (2005) llevaron a cabo una investigación para acotar cuáles son los factores favorables que permiten un uso ventajoso de estas algas en las aguas residuales.

De esta manera, el primer paso fue construir un lote de invernadero en condiciones controladas, en temperatura que oscilaba entre los 28°C y los 30°C, bajo iluminación fluorescente fotoperiodo y agitación de 100rpm. Los efluentes anaerobios, por su parte, provinieron de reactores UASB que se hallaban en distintos tratamientos: desnitrificante, sulfatorreductor y rastro municipal. Además, los parámetros determinados que se tuvieron en cuenta fueron: densidad óptica (665 nm), conteo celular pH, oxígeno, morfología al

microscopio, a la clorofila y a nutrientes como los nitratos, los nitritos, los fosfatos y los sulfatos. A partir de ahí se obtuvieron los siguientes resultados: hubo un mayor crecimiento poblacional de las microalgas clorofitas en las aguas residuales desnitrificantes y sulfatorreductores, cuando se hace una comparación entre las temperaturas y los cultivos utilizados; existe una mayor remoción de nutrientes en cultivos mixtos a temperaturas de 30°C; se presentaron alteraciones morfológicas en las aguas residuales utilizadas, en los desnitrificantes agregados de cuatro células y en el sulfatorreductor; y, por último, no se dieron agregados, aunque fueron observadas varias células muy grandes con vacuolas dominancia de depredadores al final del cultivo.

En conclusión, la investigación encontró que se evidencia un mayor crecimiento de las microalgas cuando hay presencia de efluentes anaerobios, por la mayor concentración de nutrientes. De igual manera, se expuso que las microalgas *Chlorella vulgaris* y *Sphaerocystis sp* tienen mayor tolerancia a los efluentes anaerobios, que hay una disminución en el efluente de rastro por la presencia de *Paramecium*, y que el tratamiento es mucho más eficiente si se realiza sobre cultivos mixtos, con altas temperaturas y con una mayor velocidad de reacción (Salazar, Bernal & Martínez, 2005).

Planta piloto con microalgas para aguas residuales urbanas. En la provincia de Catamarca, en Argentina, el agua es un bien bastante apreciado, especialmente por su escasez. Por esta razón, el tratamiento de las aguas residuales ha sido un tema que ha cobrado mucha importancia en esta zona del país, pues, esta necesita ser utilizada en los cultivos y para el consumo humano, como es lógico, y por su escasa presencia, la reutilización es indispensable. Partiendo de ahí, se formuló la creación de una planta piloto de 5 hectáreas

que se ubicara junto a la ya existente planta de tratamiento de agua potable La Viñita, en el Valle Viejo de Catamarca. Junto a este proyecto, el estudio también buscó comprender conceptualmente la combinación de microalgas como tratamiento posterior en las aguas residuales y como agentes fijadores de dióxido de carbono, teniendo en cuenta dos cosas: por un lado, el CO₂ que viene de los gases de combustión y, por otro lado, la depuración de biogás, que puede producirse a partir de piscinas anaerobias utilizadas para el tratamiento de las aguas residuales existentes (Codina, García, Barón, Da Silva & Bosch, 2014). Así, pues, el proyecto original de este estudio fue mejorar la calidad del agua tratada por medio del uso de microalgas a la salida de piscinas de maduración, teniendo en cuenta que:

las microalgas captarían los nutrientes inorgánicos (fuente de P y N) presentes en el agua provenientes de la descomposición aeróbica de la materia orgánica por acción de bacterias en las etapas anteriores de tratamiento. Así, se aprovecharían los nutrientes para producir biomasa útil y a la vez se reduciría la capacidad del efluente de provocar eutrofización en cauces naturales (por volcado de efluente -tratado de forma incompleta- en cuerpos de agua receptores).

A partir de ahí, se buscó mejorar los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno ya que este es indicativo de los niveles de materia orgánica susceptibles a degradación biológica en forma aeróbica, que se determina mediante el consumo que se haya realizado de oxígeno y las microalgas, como consumidoras de oxígeno que utilizan para respirar, aumentan, precisamente la DBO. De esta forma, el mejoramiento en el tratamiento de las aguas residuales se daría como producto secundario de la biomasa de las microalgas, que es útil para la quema directa y para producir energía térmica, aceite de biodiesel, fermentar anaerobiamente biogás, entre otros. Para ello, el proyecto se formuló en el uso de sistemas

de tipo hipódromo o carrusel, que es un canal de recirculación de lazo cerrado, con una profundidad de aproximadamente 0,3 metros, por donde circula el medio de cultivo. El flujo, por su parte, ha sido establecido con paletas rotatorias, que han sido guiadas por tabiques. Estas paletas facilitan el impulso del flujo y, también, crean el mezclado que se vuelve necesario para evitar que la biomasa se sedimente, permitiendo que los nutrientes se distribuyan efectivamente y la luz solar llegue homogéneamente a todas las células presentes (Codina, García, Barón, Da Silva & Bosch, 2014).

Asimismo, la recuperación de la biomasa se ha llevado a cabo con filtraciones tangenciales de los cultivos, para obtener concentrados de microalgas, además de agua separada que se lleva hasta la descarga final. Para ello, se utiliza una membrana de cerámica de alrededor de 0,2 μ m. Todo esto ha sido ensayado exitosamente en escalas más pequeñas, lo que ha permitido llevar a cabo una extrapolación a escala del sistema final utilizar, en un régimen de filtración de aproximadamente 150m³/día. Esto ha significado, entonces, un trabajo preliminar, que ha desembocado, precisamente, en la construcción de una planta piloto, pero que no ha sido desarrollado todo el proceso, por lo que las conclusiones hasta el momento son parciales. Así, pues, el uso de las microalgas parece ser muy efectivo, aunque no se pueden descartar determinados problemas que, probablemente, surgirán conforme el proyecto vaya avanzando (Codina, García, Barón, Da Silva & Bosch, 2014).

Cultivos semicontinuos de algas *Chlorella sp.* para el tratamiento de aguas residuales de la industria pesquera. Con el fin de encontrar una solución para el tratamiento de aguas residuales en la industria pesquera, Romero, Fresneda & Hernández (2001) llevaron a cabo un estudio, que tuvo como base la experimentación a escala en el laboratorio, por medio del uso de Erlenmeyer de 500mL y con la preparación de los cultivos en un volumen

de 200mL, fuente de luz fluorescente con intensidad lumínica de 10 Klux, rotando los recipientes a diario para lograr una adecuada distribución de la luz. De igual manera, la agitación fue mantenida de forma constante, con el fin de garantizar una disponibilidad adecuada de los nutrientes, para que llegaran a todo el medio, permitiendo que hubiese re-suspensión celular y restablecimiento del CO₂ que fuera necesario.

Partiendo de ahí, se llevó a cabo una simulación de cultivo semicontinuo con microalgas *Chlorella* sp. en aguas residuales. Para ello fue inoculado diariamente un porcentaje de agua residual pretratada por filtración, de la que se extrajo un volumen equivalente del medio. *Chlorella* sp fue primariamente adaptada a las aguas residuales pesqueras, en su fase exponencial. Posteriormente, la renovación del residual fue hecha diariamente sobre la misma hora (13.00hrs), mientras la toma de las muestras se llevó a cabo justo antes del recambio, con el fin de hacer una lectura detallada del pH y de la densidad óptica (DO) a 560nm, que es el valor máximo que puede registrarse para una ecuación de regresión, cuya variable dependiente fueron las células y la independiente la DO en un rango de trabajo que fue entre los 600nm y los 780nm.

En una segunda etapa de la experimentación se pudo determinar el peso seco de la biomasa producida por las microalgas, el pH y el DO. La calidad del agua centrifugada, por su parte, fue medida a partir de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), teniendo en cuenta el método APHA. Después, “se efectuó un bioensayo a cielo abierto en peceras de 5 litros de capacidad, con un volumen del medio de 4 litros, como fuente de energía se utilizó la radiación solar sin interferencia con una intensidad lumínica media de 1365 Klux”. Esta última parte fue llevada a cabo únicamente con los dos mejores resultados que arrojaron los experimentos llevados a cabo desde el laboratorio, siendo replicados una vez más. De igual

manera, se midió diariamente el pH del cultivo, se realizó control del crecimiento celular por medio de DO, del peso húmedo y seco, antes de realizar el intercambio. Por último, la DO fue evaluada durante días intermedios, determinando la eficacia del método a través de la comparación de aguas residuales sin tratar, que fueron utilizadas en los ensayos como caldos de cultivo (Romero, Fresneda & Hernández, 2001).

Teniendo en cuenta esto, el estudio arrojó que hubo un mayor crecimiento de las microalgas durante los tratamientos, con un aporte residual que osciló entre el 12,5% y el 25% y con un rango de DO que estuvo entre el 0,6 y el 0,65. Asimismo, el pH mantuvo índices que fueron entre 7,8 y 8,5, niveles que son característicos entre las microalgas *Chlorella* sp. si se mantienen estables los desarrollos de las células fitoplanctónicas en las aguas residuales. En cuanto a la segunda etapa de la experimentación, se observó que los mayores crecimientos se dieron entre los dos primeros tratamientos, con unas DO que oscilaron entre el 0,6 y el 0,7, mientras el pH alcanzó cifras de entre 7,8 y 8,7.

Por otro lado, se determinó un peso húmedo en concentraciones entre los 4,3g/L y los 5,2g/L, mientras el peso seco lo fue entre 0,32g/L y 0,5g/L, durante los dos primeros tratamientos. Durante los dos últimos, se evidenció una disminución del peso húmedo en 2,0g/l y del peso seco en 0,5g/L. En cuanto a la DBO del agua centrifugada, esta disminuyó conforme la renovación se hacía también menor: 95,0°; 44,0°; 38,0mg/L y 26,0mg/L respectivamente. Por último, La DO de los cultivos se mantuvo estable entre el 0,5 y el 0,6, con renovación diaria. Los valores encontrados en condiciones de laboratorio fueron, por tanto, similares a los que se dieron en esta etapa. La variación entre el tratamiento primario y el secundario no fue, entonces, significativa: la T calculada fue de 0,69 y la T tabulada de 4,49, a pesar de que siempre los mejores resultados se apreciaron cuando la renovación fue

menor (12,5%). El peso húmedo, por otra parte, se mantuvo entre los 5,1g/L y los 6,6g/L y el peso seco entre el 0,48g/L y 0,61g/L, razón por la cual se justifica la productividad abundante de biomasa y la estabilidad del cultivo fitoplanctónico que se hizo diariamente (Romero, Fresneda & Hernández, 2001).

Microalgas inmovilizadas en biofilm en el tratamiento de aguas residuales. Otro trabajo de investigación que merece ser reseñado fue el llevado a cabo por Fernández (2014) con apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid. De acuerdo con el autor entre las ventajas de esta es técnica pueden contarse: “a) Facilidad para la cosecha, b) Mayor concentración por unidad de volumen de medio, c) reducción o ausencia de células en el efluente, d) reducción en la necesidad de energía y e) mayor eficiencia en el empleo de la radiación recibida por unidad de superficie de suelo”. Teniendo en cuenta esto, la investigación reseñada tomó como base un fotobiorreactor laminar, que sirve para absorber gases de emisión con altos contenidos de dióxido de carbono. Se conforma, además, de una recirculación continua de un medio líquido que contiene a las microalgas mediante una o varias láminas que se encuentran superpuestas de tejido, lo que permite que el CO₂ sea absorbido y que las microalgas accedan a una mayor iluminación. Este fotobiorreactor puede usarse para la producción de biomasa de algas, concentrar dicha biomasa y facilitar su cosecha. Entre sus ventajas están:

- Aplicación a gran escala
- Bajo coste en producción y puesta en marcha
- Alta eficiencia en la iluminación de las microalgas

- Intercambio fácil de dióxido de carbono entre los gases emitidos por el cultivo.
- Posibilidad de llevar a cabo sedimentación de las microalgas en el medio líquido, sin llegar a las embebidas que se encuentran en las láminas de geotextil, que continúan con su proceso de multiplicación
- Permite que algas desecadas en la lámina de tejido puedan ser recolectadas
- Reduce las posibilidades de calentamiento del cultivo, por el dispositivo de refrigeración natural que posee.

El fotobiorreactor laminar se compone de por paneles que vierten todos en un canal común, desde donde es bombeado el medio de cultivo de dichas unidades. El conjunto de los medios de las microalgas que posee cada unidad puede llegar a ser transferido en un depósito común en donde se pueden separar las microalgas y recircular las demás unidades sobrantes. Asimismo, el CO₂ y el NO_x, que producen gases enriquecedores, pueden llegar al fotobiorreactor laminar por medio de un conducto unificado, que se distribuyen a través de todas las unidades presentes por medio de una red de distribución que ha sido adecuada en paralelo (Fernández, 2014).

Por otra parte, junto al fotobiorreactor laminar fue implementado un fotobiorreactor de soporte flotante, el cual puede entenderse como un:

fotobiorreactor rotatorio de biodiscos flotantes utilizable para la depuración de aguas residuales y producción de biomasa algal. Este sistema está formado por diversos elementos, estando el cuerpo principal formado por un conjunto de discos que giran arrastrados por un eje central paralelo a la superficie del agua. Entre cada 2 discos existen unos elementos separadores, que a la vez actúan como flotadores. El

conjunto gira en posición perpendicular a la superficie de un medio acuoso sin necesidad de cojinetes ni soportes mecánicos, sustentado por el empuje del agua, según el Principio de Arquímedes. A medida que el sistema funciona en el medio acuoso contaminado con materia orgánica y/o elementos eutrofizantes, se van desarrollando sobre ambas caras de cada disco un conjunto de microorganismos, que llegan a formar una película continua que constituye el denominado 'biofilm'.

El propulsor del conjunto se encuentra conformado por una rueda hidráulica que gira sobre su propio eje por el peso que ejerce el agua que es recibida por los cangilones (recipiente para el transporte de agua), lo que da como resultado que se cree un motor proporcional al peso que posee el agua y a la proyección horizontal del radio de giro en el centro de gravedad que posee cada cangilón con respecto al agua.

Partiendo de ahí, el trabajo de las microalgas, por medio de los fotobiorreactores, es crear biomasa, disponiendo, claro está, de la iluminación necesaria para llevar a cabo la fotosíntesis y de una fuente de dióxido de carbono. Su objetivo es la generación de biomasa que permita una reducción del nivel de elementos minerales que se vierten al medio, especialmente de nitrógeno y fósforo. De ahí se podrían obtener producciones medias de alrededor de 10g de materia seca diariamente y por metro cuadrado de superficie del suelo que haya sido ocupado por el fotobiorreactor. El contenido medio del nitrógeno y fósforo, por su parte, se puede estimar entre el 7,5% y el 1,15% respectivamente, de acuerdo con el peso seco de la biomasa que haya sido cosechada, lo que puede significar que por cada kilogramo de biomasa algal estarían retirándose en promedio 75g de nitrógeno y 11,5g de fósforo. Estas cifras coinciden con la de otros hallazgos, que han propuesto una producción

media de 10g de materia seca m²/día, lo que supondría una producción media anual de 36,5 toneladas de materia seca por hectárea cultivada (Fernández, 2014).

Producción de biomasa con *Scenedesmus sp.* en el tratamiento de aguas residuales de pescadería. Similar a la investigación de Romero, Fresneda & Hernández (2001), Andrade, Vera, Cárdenas & Morales (2009), llevaron a cabo un trabajo, cuyo objetivo principal fue usar aguas residuales de pescadería para producir biomasa de la microalga *Scenedesmus sp.*, con el fin de realizar una evaluación de la capacidad de remoción de nutrientes de dichas microalgas y de la calidad de la biomasa producida en relación con el tratamiento mencionado. Para ello, fueron utilizados cultivos unialgales de *Scenedesmus sp.*, las cuales fueron aisladas de la Laguna Gato Negro, en la costa Noroeste del Lago de Maracaibo, Municipio Maracaibo del Estado Zulia, en Venezuela. Esta microalga fue elegida por la capacidad que posee para soportar elevadas concentraciones de nutrientes que se encuentran en las aguas residuales, además de poseer actividad metabólica elevada y una capacidad importante para resistir variaciones ambientales, lo que le permite estar presente en aguas residuales.

El medio de cultivo utilizado fue Nitrofoska Foliar, a una concentración de 5 mL/L, o sea que se dio a una concentración de 3,08 mg/L de nitrógeno amoniacal, de 7,84 mg/L de nitrógeno total kjeldahl, de 7,21 mg/L de fosfato y de 30,97 mg/L demanda química de oxígeno. En un primer momento, el inóculo fue reproducido a nivel de laboratorio, con condiciones de temperatura controladas en 26±2°C, una iluminación de 156 μmol.quanta/m².s, un fotoperiodo 12h:12h y una aireación constante sin CO₂. Cuando fueron alcanzados los 12 L, se mostró un pH de 7,80. Después, fue transferido a tanques de asbesto a cielo abierto,

con capacidad aproximada de 600 L de capacidad, en donde el volumen fue aumentado hasta los 150 L, para que fuera apto para el ensayo.

Por otro lado, fueron usadas aguas residuales de la industria pesquera, las cuales fueron preparadas de una mezcla de 7,5 Kg de restos de pescado, que estaban compuestos de 30% piel, 30% cabezas y colas, y un 40% vísceras, con 80 litros de agua potable. Estos litros fueron agitados y se filtrados por gravedad, con gasa tipo USP VII, con el fin de poder separar los restos sólidos de mayor tamaño. El volumen de agua residual obtenido se mantuvo con una aireación constante a temperatura ambiente bajo sombra de $26\pm 2^{\circ}\text{C}$, por tres días, para inducir a la biodegradación aeróbica de la misma, por parte de la flora bacteriana asociada que contiene. Posteriormente, el residual fue aumentado con agua potable hasta los 150, para obtener una concentración de final de 50 gresiduos/L. De este proceso se produjo: nitrógeno amoniacal 23,52 mg/L, nitrógeno total kjeldahl 25,20 mg/L; fosfato 6,01 mg/L, demanda química de oxígeno 75,83 mg/L y un pH de 9,80.

Con este procedimiento se obtuvo un crecimiento exponencial de *Scenedesmus sp.* con una rápida adaptación al medio residual en condiciones mixotróficas. Además, se constató que la microalga no tuvo un crecimiento diferenciado en ninguno de los dos medios de cultivo, a pesar de que las aguas residuales de la industria pesquera poseía una concentración de nitrógeno bastante mayor, con un $p < 0,05$. Por otro lado, se pudo constatar que la remoción de materia orgánica en las aguas residuales de la industria pesquera fue de 26,99 mg/L (35,59%), mientras que en el control fue de 22,97 mg/L (71,17%). Por último, es necesario reseñar que la producción de biomasa seca de microalga *Scenedesmus* fue levemente mayor en las aguas residuales pesqueras, mientras que la humedad fue menor al 10% tanto para las aguas residuales como para las de control.

Tratamiento de aguas residuales con lagunas algales de alta tasa. Cerón, Madera & Peña (2015), todos miembros del grupo CINARA de la Universidad del Valle (Colombia), realizaron un estudio compilatorio en el que expusieron los principales procesos en los que las microalgas, por medio de la creación de suplementos de oxígeno generado con la fotosíntesis, permiten tratar las aguas residuales municipales, industriales y de los sistemas agropecuarios. Las lagunas algales, creadas e implementadas por William J. Oswald han sido uno de los principales métodos para llevar a cabo los procesos ya descritos, las cuales han resultado ser bastante efectivas y, sobre todo, de bajo costo, por lo que su puesta en marcha no merece grandes esfuerzos técnicos ni económicos.

De acuerdo con los autores, las lagunas algales pueden clasificarse como sistemas de alta tasa, pues poseen mejoras en el rendimiento de la biomasa algal y su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales, en comparación con las lagunas de estabilización, pues el tiempo de retención celular que pueden lograr las lagunas algales es mucho mayor que el de retención hidráulico. Las lagunas algales, en su mayoría, poseen una profundidad entre 0,2 y 1 m, entre 2 y 3 metros de largo, con formas abierta y circular, mezcla completa continua, con tiempos de resistencia hidráulico de entre 2 y 8 días, tiempo de resistencia celular entre 4 y 13 días y funcionan con luz solar (Hernández, Madera & Peña, 2015).

Es necesario destacar, también, que, de acuerdo con la investigación reseñada, las lagunas algales se ven bastante influenciadas por el ritmo solar diurno, debido a que su estructura funcional depende enteramente de la fotosíntesis de las microalgas en la mezcla y en la columna de agua, por lo que se generan variaciones en las concentraciones de oxígeno disuelto y del pH durante el tiempo del día en el que está el sol presente. Las lagunas algales

se basan en su funcionamiento, precisamente, en la oxidación de la materia orgánica por medio de la oxigenación fotosintética de las microalgas, por lo que necesitan constantemente de la energía solar, del CO₂ disuelto en el agua (Cerón, Madera & Peña, 2015).

Tratamiento de aguas residuales in vitro, por medio del uso de *Chlorella sp.* Un último trabajo a exponer es el de Tafur & Estrada (2015), llevado a cabo en la ciudad de Barrancabermeja (Colombia), cuyo objetivo fue determinar cuál fue el efecto del cultivo de la microalga *Chlorella sp.* como método de tratamiento in vitro de aguas residuales, con el fin de remover nitratos y fosfatos. Para ello se tomó una muestra simple de 0,5L de la ciénaga Miramar, con la que se hizo un prefiltrado para que fueran eliminados todos los microorganismos de gran tamaño. Posteriormente, se preparó un medio de cultivo a base de fertilizante foliar (NPK) a 0,5 ml/L de agua purificada más agar-agar de 0,6 gr/L con un pH de 8,3. Además, para aislar la *Chlorella sp.* se utilizó estriado en placas de agar.

En cuanto al agua residual utilizada, se llevó a cabo un muestreo simple por recolección de 20 litros de agua residual sin tratamiento. Estas muestras fueron posteriormente esterilizadas para determinar el efecto específico de la *Chlorella sp.* sobre esta. Posteriormente, se llevó a cabo un bioensayo con botellas de plástico de 1,5L de agua residual y medio fertilizante foliar, con concentraciones de 1×10^2 células por cada mililitro de *Chlorella sp.* Con esto, se llevaron a cabo dos tipos de tratamientos diferentes: el primero con agua residual al 100%; el segundo, con agua residual en un 75% y 25% de agua purificada. La determinación de nitratos y fosfatos, por su parte, se realizó por espectrofotometría, basada en reducción de cadmio y espectrofotometría ultravioleta.

Con esta metodología, pudo constatar que la microalga *Chlorella sp.* creció en densidades importantes en aguas residual, tanto en el tratamiento 1 como en el tratamiento 2: $8,9 \pm 0,90 \times 10^6$ cel/mL para el primero y $5,0 \pm 10^6$ cel/ml para el segundo. Esto evidenció que la microalga se adapta rápidamente al medio, tanto en las aguas residuales, al 100% y al 75%, como en los fertilizantes foliares. De todas maneras, la investigación demostró que durante el bioensayo el crecimiento era menor. De otro lado, fue posible ver que el consumo de nitrato por parte de la *Chlorella sp.*, tanto en los tratamientos 1 y 2 como en el medio controlado, fue de aproximadamente 64,6%, a partir del octavo día de experimentación, hasta el 21. Por lo tanto, fue posible afirmar que la eficiencia del cultivo monoalgal con esta microalga fue de 50,1% para el primer tratamiento y de 49,8% para el segundo.

En cuanto a los fosfatos, la reducción más significativa se dio en el tratamiento 2, en el que el 87% de los mismos fueron removidos de forma exitosa, con valores de absorción de: $0,265 \pm 0,029$ para el día 4, registrado como el más bajo; y $0,305 \pm 0,127$ para el primer día. El segundo mejor valor de absorción para la remoción de fosfatos fue el tratamiento 1, con el 83,8%. Los valores de $0,335 \pm 0,051$ para el día 1 y $0,280 \pm 0,033$ para el día 4. Se observó, por otro lado, que el cultivo entró en una fase estacionaria a partir del día 11, en ambos tratamientos y en el medio controlado, por deficiencias de algún nutriente en el medio de control que había sido utilizado.

Conclusiones

El uso de microalgas como *Cyanophyta* y *Synechocystis* es bastante efectivo para la depuración de aguas residuales urbanas, especialmente en lo que tiene que ver con la remoción de nutrientes y la disminución de parámetros como SST, DQO y nitrógeno, aunque en el caso del fósforo no lo es tanto. Por ello, puede afirmarse que la *Cyanophyta* y la *Synechocystis* no remueven totalmente ni los ortofosfatos solubles, ni los polifosfatos inorgánicos, ni los fosfatos orgánicos. De igual manera, se pudo constatar que las microalgas son efectivas en el tratamiento de aguas residuales, cuando se llevan a cabo de manera anaerobia, aunque resaltando que este proceso eleva la DBO por parte de las microalgas.

Por otra parte, es posible concluir que el uso de las microalgas *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.* es efectivo para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria pesquera, esta última en especial para la remoción de fosfatos y nitrógeno y más modestamente para materia orgánica. Además, *Scenedesmus sp.* puede generar también los

nutrientes necesarios para la producción de biomasa algal, aunque puede llegar a contener metales pesados que no pudieron removerse de las aguas residuales tratadas.

Por último, puede decirse que los sistemas microalgales de alta tasa, especialmente los que se llevan a cabo con *Scenedesmus sp.*, *Microactinium sp.*, *Pediastrum sp.*, *Ankistrodesmus sp.*, *Euglenas sp.* y *Chlamydomonas sp.*, son eficientes para realizar tratamientos de aguas residuales, aunque no se posee mucha información sobre los mecanismos y los procesos biológicos que se generan en estos.

Recomendaciones

Antes de realizar el proceso de escalado en la producción de microalgas para la fermentación en efluentes, se requiere investigación en parámetros adicionales como factores abióticos como la combinación de temperatura, la intensidad de luz, CO₂, control de pH y factores bióticos como la selección de la especies de microalgas.

Además, el análisis de efluentes de fermentación, en términos de componentes como; C, N y P, y crecimiento microbial y sus interacciones son necesarios para el entendimiento y mejor control de la producción de biomasa y lípidos para la integración energética e ingeniería de estos procesos que permitan encontrar una combinación óptima.

Por otra parte, se recomienda estudiar el efecto que tienen otros sustratos diferentes a los estudiados en las investigaciones reseñadas aquí, que se encuentran comúnmente en las aguas residuales, en el crecimiento y procesos metabólicos de las microalgas, con el fin de generar alternativas de uso de la biomasa generada como, por ejemplo, la producción de colorantes o proteínas, grasas y antioxidantes para el sector alimenticio.

Bibliografía

- Alejandro, K. (2012). Recuperación de residuos líquidos industriales mediante *Arthrospira* sp. y *Chlorella* sp., a escala de laboratorio, para la obtención de agua de riego. Región Arica y Parinacota. Proyecto de Grado. Arequipa: Universidad Católica de Santa María. Recuperado de: http://dspace.concytec.gob.pe/bitstream/concytec/28/1/alejandro_pk.pdf.
- An, J. Y., Sim, S. J., Lee, J. S., & Kim, B. W. (2003). Hydrocarbon production from secondarily treated piggery wastewater by the green alga *Botryococcusbraunii*. *Journal of Applied Phycology*, 15 (2-3).
- Arango, O. & Sanches, L. (2009). Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7 (2). Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v7n2/v7n2a04.pdf>
- Andrade, C., Vera, A., Cárdenas, C. & Morales, E. (2009). Producción de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. utilizando aguas residuales de pescadería. *Revista Técnica de Ingeniería de*

la Universidad del Zulia, 32 (2). Recuperado de:
<http://www.scielo.org.ve/pdf/rtfiuz/v32n2/art05.pdf>

Aslan, S., & Kapdan, I.L. (2006). Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *EcolEngineer*, 28 (1).

Asselborn, V. & Zalocar, Y. (2000). Aplicacion de bioensayos algales uniespecíficos para evaluar los efectos de un efluente textil y la calidad del agua de una laguna receptora (Corrientes, Argentina). *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas*. Recuperado de:
http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2000/6_biologicas/b_pdf/b_017.pdf.

AST Ingeniería. (2014). Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica. Gijón (España): AST Ingeniería S.L. Recuperado de: <http://www.ast-ingenieria.com/guia-malgas-1>.

Boursier, H., Béline, F., & Paul, E. (2005). Piggery wastewater characterization for biological nitrogen removal process design. *Bioresour Technology*, 96 (3).

Carey, R. O., & Migliaccio, K. W. (2009). Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review. *Environmental Management*, 44 (2).

Carvajal, E. & Esparragoza, A. (2008). Análisis de la normatividad ambiental colombiana para el vertimiento de aguas residuales al sistema de Alcantarillado público. Proyecto de Grado. Floridablanca: Pontificia Universidad Bolivariana. Disponible en:
http://repository.upb.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/51/1/digital_15337.pdf.

Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155 (1).

Cerón, V., Madera, C. & Peña, M. (2015). Uso de lagunas algales de alta tasa para tratamiento de aguas residuales. *Ingeniería y Desarrollo*, 33 (1), 99 – 125. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v33n1/v33n1a07.pdf>.

- Codina, M.; García, C.; Barón, J.; Da Silva, S. & Bosch, J. (2014). Planta piloto de microalgas para mejoramiento del tratamiento efluentes urbanos en Catamarca, Argentina. *Estrucplan*. Recuperado de: http://www.ina.gov.ar/pdf/ifrrhh/02_012_Codina.pdf.
- D'Alessandri, M. (2012). Caracterización y tratamiento de agua residual proveniente de las plantas de producción. Tesis de grado. Sartenejas (Venezuela): Universidad Simón Bolívar. Recuperado de: <http://159.90.80.55/tesis/000155546.pdf>
- Durruty, I. (2013). Biodegradación anaeróbica de efluentes del procesado de papa. Tesis doctoral. La Plata (Argentina): Universidad Nacional de la Plata: Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26913/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Delgadillo, Pérez, Camacho & Andrade. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Documento de trabajo de la Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba (Bolivia). Recuperado de: http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Escorihuela, A.; Núñez, M.; Rosales, N.; Mora, R & Morales E. (2007). Microalgas presentes en una laguna para pulimento de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas. *Revista Facultad de Agronomía*, 24 (1). Recuperado de: http://www.revfacagronluz.org.ve/PDF/supl_mayo_2007/v24supl39.pdf. Consultado en: 07, diciembre, 2015
- Fernández, J. (2014). Uso de microalgas inmovilizadas en biofilm para tratamiento de aguas residuales. Congreso Nacional de Medio Ambiente. Recuperado de: http://oa.upm.es/36565/1/INVE_MEM_2014_190833.pdf.

- Forero, R. (2007). Aproximación a la problemática del manejo y tratamiento de las aguas residuales del corregimiento de Arauca (Palestina). Tesis de grado. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/973/#sthash.qIKYddPi.dpuf>
- Freire, I.; Serradeiro, R.; Laanjeira, A.; Peña, J.; Seixas, P. (2013). Cultivo de las microalgas *Tetraselmis* e *Isochrysis* T-ISO con efluentes de una piscifactoría en RAS de Portugal. Universidad de Santiago de Compostela. Recuperado de: https://www.usc.es/export/sites/default/en/investigacion/grupos/acuicultura_biotechnologia/descargas/Abstract_Aqua3113_2013.pdf.
- Galvín, R. (2012). Procesos fisicoquímicos en depuración de aguas: Teoría, práctica y problemas resueltos. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- García, J., Mujeriego, R., Hernández-Martínez, M. (2000). High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen. *J App Phycol*, 12.
- Gómez, L. (2007). Microalgas: aspectos biológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, 19 (2). Recuperado de: http://www.researchgate.net/publication/268424391_MICROALGAS_ASPECTOS_ECLOGICOS_Y_BIOTECNOLGICOS.
- González, C. & Lozada, W. (2013). Manejo y control de las aguas de escorrentía para mantener la calidad del agua. Universidad de Puerto Rico – Mayaguez. Recuperado de: <http://www.uprm.edu/agricultura/sea/publicaciones/Manejo%20y%20control%20escorrentia.pdf>

- Hernández-Pérez A. & Labbé, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49 (2). Recuperado de: <http://www.scielo.cl/pdf/revbiolmar/v49n2/art01.pdf>.
- Lafarga, T. (2012). Aspectos prácticos de la producción de microalgas: objetivos y necesidades. Tesis de grado. Almería: Universidad de Almería. Recuperado de: http://repositorio.ual.es:8080/jspui/bitstream/10835/1868/1/Trabajo_7036_83.pdf.
- Lau, P.; Tam, N. & Wong, Y. (1997). Wastewater Nutrients (N and P) Removal by Carrageenan and Alginate Immobilized *Chlorella Vulgaris*. *Environ Technology*, 18 (9).
- Medina, A., Piña, M., Nieves, J., Arzola, F. & Guerrero, M. (2012). La importancia de las microalgas. *CONABIO Diversitas*, 103. Recuperado de: <http://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv103art1.pdf>
- Méndez, L.; Albarracín, I.; Cervero, M. & Salomón, R. (2010). Crecimiento de *Scenedesmus Quadricauda* en efluentes cloacales de la ciudad de Trelew, Chubut, Argentina. *Centro de Investigaciones Pesqueras - Ministerio de Industrias Pesqueras*. Recuperado de: <http://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/3639/135.%20%20CRECIMIENTO%20DE%20SCENEDESMUS%20QUADRICAUDA....pdf?sequence=1>.
- Ministerio de Ambiente. (2015). Resolución 0631, “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Bogotá: Diario Oficial. Disponible en: http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=d195ba34-a531-4d91-bebf-e233a52b5300&groupId=24732.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2014). Decreto 1287, "Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales". Bogotá: Diario Oficial. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/Decretos%20Vivienda/1287%20-%202014.pdf>.

Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2004). Resolución 1433., "por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamiento y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones.". Bogotá: Diario Oficial. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=15603>.

Montaigne, F. & Essick, P., (2002). Water Pressure. *National Geographic*, 20.

Montes, M. (2010). Desarrollo de un bioestimulante a base de microalgas y bacterias para el tratamiento de influentes residuales. Tesis de grado. México D.F: Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de: <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/5742/MAR%C3%8DA%20DEL%20ROCIO%20MONTES%20V%C3%81ZQUEZ.pdf?sequence=1>. C

Morales, L.; Callejo M. & Mejía A. (2015). Microalgas y biodiesel. Proyecto de grado. Jalisco (México). Universidad de Guadalajara. Recuperado de: <http://es.slideshare.net/AndyMejia/microalgas-47729027>.

Moreno, M. D. (1991). Depuración por lagunaje de aguas residuales: manual de operadores. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Secretaria General Técnica.

Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de las aguas residuales. Tesis de grado. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Recuperado de: <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/bitstream/handle/231104/514/Caracterizacio>

n%20y%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf;jsessionid=878EF52FF4F6905
A9E0BA0F8667C6F6C?sequence=1

Organización de la Naciones Unidas. (2004). Lineamientos sobre el manejo de aguas residuales municipales. Nueva York: ONU – PNUAM. Recuperado de:
http://esa.un.org/iys/docs/san_lib_docs/lineamientos_sobre_el_manejo_spanish.pdf.

Organización Mundial de la Salud. (2015). Agua. Documento divulgativo. Recuperado de:
<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/es/>

Organización Mundial de la Salud. (1973). Aprovechamiento de efluentes: métodos y medidas de protección sanitaria en el tratamiento de aguas servidas. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. Disponible en:
http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/38641/1/WHO_TRS_517_spa.pdf.

Peña J. & Quiroz C. (2013). Algas diminutas. Un recurso natural renovable, abundante y de gran potencial industrial. Medellín. Empresas públicas de Medellín. Recuperado de:
<http://www.propiedadpublica.com.co/algas-diminutas-un-recurso-natural-renovable-abundante-y-de-gran-potencial-industrial/>.

Presidente de la República de Colombia. (2010). Decreto 3930, “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”. Bogotá: Diario Oficial. Recuperado de:
<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=40620>.

Rawat, I., et., al. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of doQNTic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424.

- Revista Ambientum. (2002). Clasificación de aguas residuales industriales. Revista Ambientum. Recuperado de: http://www.ambientum.com/revista/2002_22/CLSFFCCNG3.asp.
- Rodríguez, J. & Sánchez, J. (2010). Aspectos tecnológicos y aplicación al vertido del Prestige. Biorremediación. *Industria y Menería*, 351. Recuperado de: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=1252086>.
- Rojas, M. (2015). Automatización del ensayo de respirometría para caracterización biocinética de microorganismos. Proyecto de grado. Cuenca: Universidad de Cuenca. Recuperado de: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/21668/1/Tesis.pdf>.
- Romero, J. (2004). Tratamiento de aguas residuales. Teorías y principios de diseño. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, T; Fresneda, I. & Hernández, D. (2001). Cultivo semicontinuo de la microalga *Chlorella* sp. para el tratamiento de residuales pesqueros. Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas, 35 (1). Recuperado de: <http://www.produccioncientifica.luz.edu.ve/index.php/boletin/article/viewFile/206/206>.
- Ruiz, A. (2011). Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente. Tesis de grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12831/Ruiz%20Martinez%20Ana%20-%20Tesina%20Fin%20Master%20-%202011.pdf?sequence=1>.
- Russell, D. (2012). Tratamiento de aguas residuales. Un enfoque práctico. Barcelona: Editorial Reverté.

Salazar, M. (2005). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales.

Contactos, 59. Recuperado de:
<http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n59ne/algas.pdf>.

Salazar, M.; Bernal, V. & Martínez, E. (2005). Tratamiento de efluentes anaerobios con microalgas clorofitas (*Chlorella vulgaris* y *Sphaerocystis* sp). Xi Congreso Nacional De Biotecnología y

Bioingeniería. Recuperado de:
http://www.smbb.com.mx/congresos%20smbb/merida05/TRABAJOS/AREA_IV/CIV-47.pdf.

Satyawali, Y. & Balakrishnan, M. (2008) “Wastewater treatment in molasses-based alcohol distilleries for COD and color removal: A review”. *J. Environ Management*, 83 (3).

Tafur, J. & Estrada, L. (2015). Tratamiento de aguas residuales in vitro por medio de la microalga *Chlorella* sp. en el municipio de Barrancabermeja, Colombia. *Revista para Difusión y Divulgación de Avances de Investigación*, 6 (10). Recuperado de:
http://www.unipaz.edu.co/ojs/index.php/revcitecsa/article/view/94/pdf_31

Torres, P. (2012). Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. *Revista EIA*, 18. Recuperado de:
<http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n18/n18a10.pdf>

Trepanier, C., Parent, S., Comeau, Y. & Bouvrette, J. (2002). Phosphorus budget as a water quality management tool for closed aquatic QNocosms. *Water Res.* 36 (4).

UN Water (2009) *The United Nations World Water Development Report 3 – Water in a Changing World*. (UNESCO Publishing/Earthscan).

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2012). *Procesos de Bioremediación*. Recuperado de:
http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358025/Material_online/protocolo.html.

Valderrama, L. Uso de dos especies de macrófitas acuáticas, *Limnobium laevigatum* y *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales agro industriales. *Universitas Scientiarum*, 3 (12).

ANEXOS

Tabla 2. Disposiciones de la Organización Mundial de la Salud sobre valores, elementos y sustancias permitidos en el agua para consumo humano.

Elemento /sustancia	Símbolo/ Fórmula	Normalmente halladas en agua dulce/agua superficial/acuífero	Valor de referencia en base a la salud según la OMS	Nivel máximo de contaminante según la USEPA (NMC)	Valor guía del nivel máximo de contaminante
Aluminio	Al		200 ug/l		
Amoniaco	NH4	<0,2g (superior a 0,3 mg/l en aguas aneróbicas)	svr*		
Antimonio	Sb	<4 mg/l	5ug/l	6ug/l	6ug/l
Arsénico	As	0,01mg/l		10ug/l	Cero
Asbesto			svr*	7.000.000 fibras/l	7.000.000 fibras/l
Bario	Ba		300ug/l	2000ug/l	2000ug/l
Berilio	Be	<1ug/l	Svr	4ug/l	4ug/l
Boro	B	<1ug/l	300ug/l		
Cadmio	Cd	<1ug/l	Eug/l	5ug/l	5ug/l
Cloro	Cl		250mg/l		
Cromo	Cr ³⁺	<2ug/l	50ug/l	100ug/l total	100ug/l
Color			Svr		
Cobre	Cu		2000ug/l	1300ug/l	1300ug/l
Cianuro	CN-		70ug/l	200ug/l	200ug/l
Flúor	F	0-10mg/l	1500ug/l	4000ug/l	4000ug/l
Hierro	Fe	0-50mg/l	Svr		
Plomo	Pb		10ug/l	<15ug/l	Cero

Manganeso	Mn		500ug/l		
Mercurio	Hg	<0,5ug/l	1ug/l	2ug/l	2ug/l
Molibdeno	Mb	<10ug/l	70ug/l		
Níquel	Ni	<20ug/l	20ug/l		
Nitratos y nitritos	NO ₃ y NO ₂		50.000 mg/l total	Nitrato 10.000ug/l	Nitrato 10.000ug/l
Turbidez			Nitrógeno	Nitrito 1000ug/l	Nitrito 1000ug/l
Selenio	Se	<10mg/l	Svr		
Plata	Ag	5-50mg/l	10ug/l	50ug/l	50ug/l
Sodio	Na	<20.000mg/l	Svr		
Sulfato	SO ₄		200.000ug/l		
Estaño	Sn		500.000ug/l		
Talio	Th	Svr	Svr		
Uranio	U		Svr	2ug/l	0,5ug/l
Zinc	Zn		1400ug/l		
Compuestos orgánicos			3000ug/l		
Grupo	Sustancia	Fórmula			
			Sin valor de referencia en base a la salud según la OMS		
Alcanos clorados					
	Tetracloruro de carbono	CCl ₄	2ug/l		
	Diclorometano	CH ₂ CCl ₂	20ug/l		
	1,1-Dicloroetano	C ₂ H ₂ CCl ₂	Svr		
	1,2-Dicloroetano	ClCH ₂ CH ₂ Cl	30ug/l		
	1,1,1-Tricloroetano	CH ₃ CCl ₃	2000ug/l		
Etenos clorados					
	1,1-Dicloroetano	C ₂ H ₂ CCl ₂	30ug/l		
	1,2-Dicloroetano	C ₂ H ₂ Cl ₂	50ug/l		

	Tricloroeteno	C_3HCl_3	70ug/l		
	Tetracloereno	C_2Cl_4	40ug/l		
Hidrocarburos aromáticos			10ug/l		
	Benceno	C_6H_6	700ug/l		
	Tolueno	C_7H_8	500ug/l		
	Xileno	C_8H_{10}	300ug/l		
	Etilbenceno	C_8H_{10}	2ug/l		
	Estireno	C_8H_8			
	Hidrocarburo aromático policíclico (PAH)	$C_{20}H_{12}O_5P_{13}$	0,1ug/l		
Bencenos colorados					
	Monoclorobenceno (MCB)	C_6H_5Cl	300ug/l		
	1,2-Diclorobenceno (1,2-DCB)	$C_6H_4Cl_2$	1000ug/l	60-75ug/l	60-75ug/l
	1,3-Diclorobenceno (1,3-DCB)	$C_6H_4Cl_2$		60-75ug/l	60-75ug/l
	1,4-Diclorobenceno (1,4-DCB)	$C_6H_4Cl_2$	1000ug/l	60-75ug/	60-75ug/l
	Triclorobenceno	$C_6H_3Cl_3$	20ug/l		
Varios compuestos orgánicos					
	Adipato de diisooctilo (DEHA)	$C_{22}H_{42}O_4$	80ug/l		
	Bis(2-etilhexil)Eftalato (DEHP)	$C_{24}H_{38}O_4$	8ug/l		
	Acrilamida	C_3H_5NO	8ug/l		
	2-(Clorometil)oxirano (ECH)	C_3H_5ClO	0,4ug/l		

Hexaclorobutadieno (HCBd)	C_4Cl_6	0,6ug/l
Ácido etilendiamino- tetraacético (EDTA)	$C_{10}H_{12}N_2O_8$	200ug/l
Ácridonitrilotricético	$N(CH_2COOH)_3$	200ug/l

Fuente: Russell, 2012, p. 31 – 3

