

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**ALGAS DE INTERÉS SANITARIO, ABUNDANCIA Y DIVERSIDAD EN
SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.**

Por
BIÓL. JESSICA COSSETTE CANINO GÓMEZ

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS
Con Especialidad en Ingeniería Ambiental.

Abril, 2011

**ALGAS DE INTERÉS SANITARIO, ABUNDANCIA Y DIVERSIDAD EN
SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA.**

Aprobación de tesis:

Director de la Tesis:
Dr. Benjamín Limón Rodríguez

Co Director de la Tesis:
Dr. Sergio M. Salcedo Martínez

Evaluador de la Tesis:
Dra. Martha Leticia Herrejón Figueroa

El Subdirector de Estudios de Posgrado:
Dr. Pedro L. Valdez Tamez

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 El Proceso de potabilización.....	16
1.2 Etapas del proceso de potabilización	17
1.3 Antecedentes	19
1.3.1 Los factores que favorecen el desarrollo de las FAN pueden resumirse principalmente en	22
1.4 Las algas.....	25
1.5 Clasificación del las algas.....	26
1.6. Las líneas filogenéticas	28
1.7. Concentración de algas	31
1.8. Casos atribuidos a cianotoxinas en el agua potable	33
1.9. Métodos para el control de algas.....	34
1.9.1 El Control biológico	35
1.9.2 El control ecológico	35
1.9.3 El control físico.....	35
1.9.4 El control químico.....	36
1.10. Descripción del problema	37
1.11 Objetivos del trabajo	37
1.11.1 Objetivo general	37
1.11.2 Objetivos específicos	37

1.12 Definición del proyecto.....	38
1.13 Metas	38
1.14 Hipótesis	39
1.15 Justificación	39
CAPÍTULO 2	
2. MÉTODO EXPERIMENTAL	40
2.1 Toma de muestras.....	40
2.2 Análisis de las muestras de agua	42
2.2.1 Concentración de las muestras de agua	42
2.2.2 Elaboración del catálogo de algas	43
2.2.3 Estimación de la abundancia de algas	43
CAPÍTULO 3	
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
3.1 Catálogo de algas	45
3.2 Observación de las muestras	50
3.3 Conteo de los diferentes grupos de algas por estación	52
3.4 Comparación de resultados de los análisis del agua de las tres Presas por cada estación del año	60
3.5 Descripción de los grupos más abundantes y/o frecuentes encontrados en este estudio	63
3.5.1 Chlorophyta	63
3.5.2 Cyanophyta	65
3.5.3 Ochrophyta.....	67
3.5.4 Phyrrophyta	68
3.6 Algas de importancia en los procesos de potabilización de agua superficial con filtración directa	68

3.7 Comparación de los grupos y especies de algas entre el influente y el efluente del agua en una Planta Potabilizadora	69
3.8 Control de algas	73
CAPÍTULO 4	
4. CONCLUSIONES	75
CAPÍTULO 5	
5. RECOMENDACIONES.....	79
REFERENCIAS	80

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los grupos de algas encontradas.....	27
Tabla 2. Resultados promedio finales, de algas por grupo, en el agua de las Presas Cerro Prieto y El Cuchillo en la estación del año: otoño.....	52
Tabla 3. Resultados promedio finales de algas por grupo, de agua de las Presas La Boca y El Cuchillo, en la estación del año: invierno	55
Tabla 4. Resultados promedio finales de algas por grupo en el agua de las Presas: La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo, en la estación del año: primavera.....	57
Tabla 5. Alguicidas recomendados según el género de algas	74

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.	Proceso general de potabilización	16
Figura 2.	Muestras y submuestras utilizadas para fines prácticos	53
Figura 3.	Resultados finales de las Presas: La Boca y El Cuchillo, en la estación del año: otoño	56
Figura 4.	Resultados promedio finales de las Presas: La Boca y El Cuchillo, en la estación del año: invierno.....	59
Figura 5.	Resultados promedio finales de las Presas: Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo, en la estación del año: primavera	60
Figura 6.	Resultados promedio finales de la Presa Cerro Prieto.....	61
Figura 7.	Resultados promedio finales de la Presa La Boca.....	62
Figura 8.	Resultados promedio finales de la Presa El Cuchillo.....	71

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.	<i>Merismopedia</i> sp	45
Fotografía 2.	<i>Anabaena</i> sp	45
Fotografía 3.	<i>Calothrix</i> sp.....	46
Fotografía 4.	<i>Spirulina</i> sp.....	46
Fotografía 5.	<i>Pediastrum duplex</i> 46	46
Fotografía 6.	<i>Staurastrum</i> sp	46
Fotografía 7.	<i>Pediastrum</i> sp	46
Fotografía 8.	<i>Scenedesmus acuminatus</i>	46
Fotografía 9.	<i>Staurastrum</i> sp	47
Fotografía 10.	Clorofita colonial cocal	47
Fotografía 11.	Clorofita filamentosa.....	47
Fotografía 12.	<i>Pediastrum simplex</i>	47
Fotografía 13.	Clorofitas filamentosas	47
Fotografía 14.	Clorofitas filamentosas	47
Fotografía 15.	Clorofitas filamentosas	48
Fotografía 16.	Clorofitas filamentosas	48
Fotografía 17.	<i>Navicula</i> sp	48
Fotografía 18.	<i>Diatomea</i> sp	48
Fotografía 19.	<i>Euglena</i> sp	48
Fotografía 20.	<i>Phacus</i> sp.....	48
Fotografía 21.	<i>Ceratium</i> sp.	49
Fotografía 22.	<i>Pseudostaurastrum</i> sp.	49
Fotografía 23.	Observaciones al microscopio del agua de la Presa Rodrigo Gómez La Boca	51
Fotografía 24.	Observaciones al microscopio de agua de la Presa El Cuchillo.	51
Fotografía 25.	Observaciones al microscopio del agua de la Presa Cerro Prieto.	51

Anexo

- Fotografía 26.** Toma de muestra de agua de una de las líneas de conducción.
- Fotografía 27.** Toma de muestra de agua de la Presa El Cuchillo.
- Fotografía 28.** Toma de muestra de agua de la Presa Cerro Prieto.
- Fotografía 29.** Toma de muestra de agua de la Presa La Boca.
- Fotografía 30.** Toma de muestra de agua en el tanque de recepción de la Planta Potabilizadora
- Fotografía 31.** Toma de muestra de agua al final del proceso de potabilización.

NOMENCLATURA

CINARA - Centro Internacional de Abastecimiento y Remoción de Agua.

CCL - Lista de contaminantes del agua potable.

EPA - Agencia de Protección Ambiental.

FAN - Floraciones algales nocivas.

HPC - Conteo de placas heterotróficas.

NERL - Laboratorio Nacional de Investigación de la Exposición de la EPA.

Blooms - Floraciones algales.

DAC - Alguicida - Cloruro de dodecil acetamido dimetil benzil amonía.

DQN - Alguicida - 2,3 diclonaftoquinona.

CMU - Alguicida - 3(p-clorofenil)-1, 1 dimetil urea.

RESUMEN

Actualmente existen registros de problemas de algas en las Plantas Potabilizadoras, que se presentan principalmente como un taponamiento en los filtros durante el proceso; los problemas actuales consisten en que no se cuenta con la identificación de las algas para aplicar tratamientos específicos para su control; por lo tanto en el presente estudio se realizó la identificación de las algas presentes en las fuentes de abastecimiento (Presas); así como en las líneas de conducción que transportan agua de las presas a las plantas y al final se realizó una evaluación de la eficiencia del proceso en una planta potabilizadora con respecto a la eliminación de las algas.

En este trabajo se investigó algunas soluciones alternas a éste problema, buscando, además, el mejoramiento del ambiente. Se encontraron 6 diferentes grupos taxonómicos, dentro de los cuales se identificó una gran variedad de géneros, y se presentó una variación de grupos taxonómicos con respecto a las estaciones del año, demostrando que existen dos grupos problemáticos: el Cyanophyta, que ocasiona problemas de salud y el Ochrophyta, que causa taponamiento de los filtros y éstos presentan una mayor abundancia en las estaciones del año de otoño e invierno; así mismo, el grupo Chlorophyta en primavera presenta una dominancia ante los demás grupos encontrados. Con respecto a la eficiencia de la Planta Potabilizadora, el estudio indicó que el proceso presentó una disminución de los grupos algales del 93%, que no es lo óptimo, pero su retención durante el proceso es notable.

ABSTRACT

Currently there are records of algae problems in drinking water treatment plants, which occur mainly as a blockage in the filters during the process, the current problem is that there is no identification of the algae to apply specific treatments to control and therefore in this study was conducted to identify the algae in the supply sources (dams), as well as on the pipes that carry water from the dams to the plants and finally an evaluation of the efficiency of the process a water treatment plant with respect to the removal of algae was made.

This work represents an opportunity to seek an alternative solution to this problem and also improving the environment, the results show that 6 different taxonomic groups were found in which were identified a variety of genera, and presented a variation of the taxonomic groups with respect to the seasons, showing that there are two problem groups, the Cyanophyta causing health problems and the Ochrophyta that causes plugging of filters and they have a higher abundance in the seasons of autumn and winter, likewise the Chlorophyta group is dominant in spring compared to the other groups found. With regard to plant efficiency the study indicated that the process had a decrease of 93% of the algal groups, which is not optimal, but its retention during the process is remarkable.

The present study provided a greater overview on the problem of drinking water treatment, allowing us to take various measures to improve the quality of this water.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la Visión Mundial del Agua para el año 2025, dada a conocer en el Segundo Foro Mundial del Agua de La Haya, Holanda, se estableció que: «Todo ser humano debe tener acceso seguro al agua para satisfacer sus necesidades de consumo, saneamiento y producción de alimentos y de energía, a un costo razonable. El abastecimiento del agua para la satisfacción de estas necesidades básicas debe realizarse en armonía con la naturaleza» [1].

El agua es indispensable para la vida y es necesario poner a disposición de los consumidores un abastecimiento satisfactorio, haciendo todo lo posible para obtener la mejor calidad de agua que la tecnología permita. El primer objetivo es proteger al agua de la contaminación, lo que se logra mediante la protección de la fuente de abastecimiento, antes que la remoción de contaminantes del agua para hacerla apta para el consumo [2].

En el ámbito doméstico, el agua que se usa debe ser potable, esto es, apta para el consumo humano. Sin embargo, el agua se utiliza en otras actividades como: el lavado de ropa, de aceras y autos, el aseo personal y de hogares, así como para cocinar. Finalmente, sólo para beber se destinan 800 litros por persona al año, mientras que el consumo para todo uso, *per cápita*, anual, puede ascender a diez mil veces más.

La dotación es el volumen medio de agua a suministrar por cada habitante y se expresa habitualmente en litros por cada habitante y día, variando fundamentalmente en función del número de habitantes, el nivel socioeconómico, el País y el Estado, etc.

En el año 2010 se tenía un abasto de agua: en el Distrito Federal de 400

L/hab/día; Monterrey 250 L/hab/día; Estados Unidos 200 a 1500 L/hab/día; Europa 225 L/hab/día y Asia menos de 100 L/hab/día [3].

Para ser apta para el consumo humano, el agua requiere una serie de tratamientos que se establecen acordes con su calidad inicial. La fuente de abastecimiento y las circunstancias en el sitio en particular son los que definirán la calidad del agua de dicha fuente, las dificultades que tendrán que enfrentarse para hacerla potable y las complejidades de los tratamientos que se deberán aplicar para convertirla en inocua (una de las características principales que debe cumplir el agua para ser considerada apta para el consumo humano).

El primer paso para potabilizar el agua, es determinar su calidad inicial en la fuente de abastecimiento, lo que permitirá diseñar el tratamiento necesario. Es posible que el agua contenga metales, materia orgánica disuelta o particulada, color, sabor y olor desagradables, bacterias, virus, parásitos y otros microorganismos, grandes cantidades de calcio y magnesio, hierro y manganeso, carbonatos, bicarbonatos, cloruros o sulfatos en exceso, sustancias orgánicas de toxicidad elevada, etc. La lista puede ser muy larga y, sin embargo, son pocas las sustancias cuya presencia se verifica en el agua para consumo [4].

Históricamente, a los servicios de agua potable se les ha inscrito en el campo de la salud pública. La razón es que, siendo el agua fuente de vida, también es paradójicamente vehículo para la transmisión de gérmenes, patógenos, algas y bacterias, las cuales ocasionan numerosas enfermedades a la población; así como otros problemas diversos dentro de las Plantas Potabilizadoras, durante su proceso.

Con la finalidad de brindar agua potable a la ciudades y a las poblaciones, se implantó el tratamiento de potabilización del agua, el cual se ha ido modificando con el paso de los años, para brindar un servicio más eficiente y con mayor

calidad de agua para el consumo de la población; así mismo, al incrementarse la demanda de agua potable, se ha detectado que dentro de las Plantas Potabilizadoras existen y se presentan graves problemas ocasionados por partículas suspendidas presentes durante el tratamiento de potabilización, dentro de las cuales se encuentran las algas.

El propósito de la Planta Potabilizadora es dar un tratamiento de clarificación y desinfección al agua “cruda”, para que el efluente cumpla con los parámetros incluidos en la MODIFICACIÓN A LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

En las Plantas Potabilizadoras de agua, las algas causan diversos problemas durante el proceso y en la operación del mismo, tales como la obstrucción de las tuberías de conducción, de los filtros y la corrosión de los mismos, además de daños a las instalaciones. También producen cambios químicos en el agua, causantes de sabores y olores desagradables [5].

Es importante destacar que la radiación solar juega un papel determinante en el crecimiento microbiano, especialmente en el crecimiento logarítmico de las algas [6]. Estos microorganismos son importantes en el proceso de tratamiento del agua, ya que aportan el oxígeno que necesitan las bacterias, los protozoos tales como los rizópodos o ciliados y los gusanos acuáticos, para degradar la materia orgánica. Cuando el número de algas es tal, que supera la capacidad depuradora de la capa biológica y la relación simbiótica que tiene con los otros microorganismos presentes en ella, sus efectos positivos se transforman en negativos, porque obturan el material filtrante, los conductos y las válvulas de la planta de tratamiento [7].

En la zona tropical, Brasil es uno de los pocos países latinoamericanos que ha

realizado estudios de clasificación de los microorganismos que forman parte de la microfauna y microflora presente en los filtros lentos de arena (FLA) y ha desarrollado técnicas para la identificación de los mismos [7]. Ni la composición ni el comportamiento de estos microorganismos son los mismos para todos los países ubicados en la zona tórrida, ya que las condiciones de temperatura y sustrato disponibles en esta parte de la tierra son especiales y permiten un metabolismo y un crecimiento microbiano bastante rápido [7].

La mayoría de las veces, la bibliografía técnica sólo reporta estudios realizados en Europa o en los Estados Unidos [12], dando lugar a un vacío técnico y de conocimiento en lo referente al estudio específico para los sistemas que utilizan esta tecnología.

El Centro Internacional de Abastecimiento y Remoción del Agua (CINARA) ha realizado un despliegue de esta tecnología en el Valle del Cauca, Colombia y parte de la zona cafetalera [13]. No se conocen trabajos realizados de la clasificación de los organismos que intervienen en el tratamiento del agua, ni tampoco sobre aquellos microorganismos que generan graves problemas en la obturación de los filtros, como las algas.

En consecuencia, cabe preguntarse: ¿Cuáles son los tipos de microorganismos algales que están presentes en el proceso de potabilización?

1.1 El proceso de potabilización

Una Planta Potabilizadora convencional, generalmente consiste de una serie de unidades de proceso específico, cuyo número y características dependerán de la calidad del agua del influente, como se indica en la Figura 1.

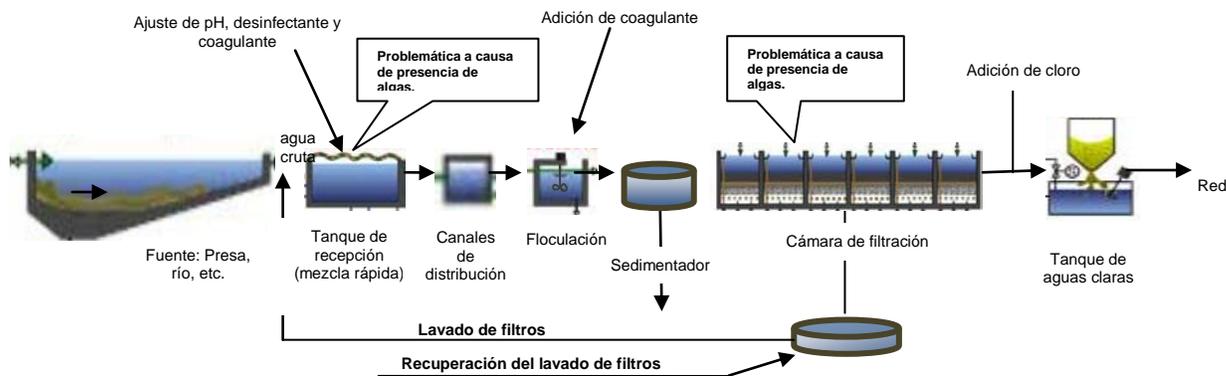


Figura 1. Proceso general de potabilización.

Dependiendo de la calidad del agua de la fuente seleccionada y de la cantidad de agua que se desee potabilizar, se seleccionan las distintas unidades del proceso que pueden ser desde la colocación de rejillas en las obras de toma, aereadores en algunos casos, tanques sedimentadores primarios, unidades de floculación-coagulación, sedimentadores secundarios, filtros rápidos a gravedad con distintos tipos de lechos filtrantes, desinfección y conducción a los tanques reguladores para la distribución del agua en la red.

Algunas potabilizadoras pueden funcionar con distintas modalidades tales como:

- Con filtración directa, cuando la calidad del agua de la fuente lo permite, en algunos casos se efectúa la medición en canales Parshall, aplicándose coagulantes aprovechando la turbulencia de los canales
- Cuando el agua de la fuente presenta alta turbiedad, generalmente se requiere de coagulación-floculación previo a la filtración en filtros rápidos a gravedad [8].

1.2 Etapas del proceso de potabilización

En la Planta Potabilizadora seleccionada para esta investigación, se recibe el agua de tres fuentes superficiales, con calidad del agua variable durante el año, siendo dichas fuentes la Presa el Cuchillo, la Presa Cerro Prieto y la Presa La Boca.

Durante la mayor parte del año, la Potabilizadora es abastecida con agua de la Presa El Cuchillo y de la Presa Cerro Prieto, suspendiéndose el suministro por reparaciones en los acueductos o en las estaciones de bombeo y el agua de la Presa de La Boca es suministrada como complemento de las dos fuentes anteriores y en algunos casos durante algunas horas del día, cuando el costo del bombeo presenta tarifas más altas.

El agua de las distintas fuentes llega a un tanque de recepción, que sirve para homogeneizar el agua, pasando a distintos canales en donde se ubican los medidores Parshall para medición del flujo de agua, y aprovechando la turbulencia generada se adiciona en estos puntos los reactivos químicos para efectuar la coagulación, aplicándose en esta parte del proceso una pre cloración.

El agua con reactivos químicos, en el trayecto hacia los filtros sufre un proceso de coagulación de las partículas presentes, las cuales son retenidas durante la filtración, siendo estas eliminadas hacia el drenaje de los filtros mediante acciones de retrolavado de los filtros, cuando la pérdida de carga indica que se requiere el mismo.

En la Planta Potabilizadora el proceso de filtración directa se realiza en 36 filtros rápidos a gravedad, cuya función es la retención de partículas suspendidas en el agua, producto de la floculación previa y otras partículas que no fueron afectadas por dicho proceso, y además de la retención de algunas

especies de algas provenientes de las distintas fuentes de abastecimiento o que se han reproducido durante el proceso de filtración.

Los filtros rápidos a gravedad instalados en la Planta en estudio, disponen de un falso fondo tipo Leopold, una capa de grava, sobre esta una capa de arena especial para filtración y sobre esta una capa de antracita, cada uno de estos materiales filtrantes fueron seleccionados y colocados de acuerdo al diseño original de la Planta Potabilizadora, indicado en las especificaciones respecto a las características físicas, químicas y granulométricas de cada uno de ellos.

La filtración, consiste en hacer pasar el agua a través de los filtros que en este caso son de flujo descendente, con un gasto de acuerdo al diseño con el fin de que en los lechos filtrantes se retenga el mayor porcentaje de partículas suspendidas, y se elimine la turbiedad a niveles tales que cumpla con la normatividad aplicable.

Cuando el gasto filtrado por cada unidad filtrante se disminuye, se observa una elevación del nivel del agua sobre la primera capa filtrante detectándose esto mediante la medición de la pérdida de carga en cada unidad, lo que indica que el filtro debe ser sometido a un proceso de retrolavado de flujo ascendente, aplicando agua en contracorriente y aire, los cuales pueden ser aplicados en forma independiente o en forma simultánea de acuerdo a los parámetros de operación que indiquen los manuales respectivos.

El proceso de retrolavado generalmente oscila entre 10-15 minutos, tiempo que es determinado mediante las pruebas o determinaciones de turbiedad que se realizan en forma periódica para determinar el tiempo óptimo de lavado.

El agua filtrada es sometida a un proceso de desinfección mediante la aplicación de cloro gaseoso, en concentraciones tales que garantiza que en el punto más alejado de la red de distribución se mantenga una concentración de cloro

residual libre que cumpla con la normatividad aplicable, para sistemas de abastecimiento de agua potable.

El agua desinfectada se conduce mediante tuberías a un tanque de regularización para su posterior envío a la red de distribución.

1.3 Antecedentes

Las algas son un grupo heterogéneo y grande de organismos vegetales, preferentemente acuáticos (unos cincuenta mil), entre los que se cuentan desde especies unicelulares de alrededor de 10 micrometros (un micrometro es una milésima parte de un milímetro) hasta plantas con tamaños superiores a los 50 metros; las algas pueden ser de agua dulce o marinas.

Pero no sólo se encuentran algas en los medios acuáticos, sino también en el suelo, sobre la nieve, o bien, sobre la arena del desierto. Pero su mayor desarrollo y diversidad se presenta en el mar.

Las algas se caracterizan por realizar la fotosíntesis, es decir el proceso que convierte la energía lumínica en la energía química necesaria para la síntesis de moléculas orgánicas.

Otras características de las algas son los diversos colores que presentan, según sea el pigmento fotosintético que posean en los denominados cromoplastos. Así, pueden ser verdes, si tienen abundante clorofila; pardas, si predominan otros pigmentos como la ficoxantina de color pardo amarillenta que enmascara a la clorofila y las algas rojas, que presentan la ficoeritrina de color rojo.

Todas las algas se reproducen, tanto sexual como asexualmente. Las algas pluricelulares tienen un sistema de reproducción denominado alternancia de

generaciones. Este sistema consiste en que, tras cada generación, se cambia el tipo de reproducción, de modo que a una fase de reproducción sexual por gametos le sigue una fase de reproducción asexual por esporas, y así sucesivamente.

La fase asexual de las algas se denomina esporofito, ya que en ella se producen esporas flageladas o zoosporas. La fase sexual se denomina gametofito, porque en ella se producen gametos. La meiosis o reducción a la mitad del número de cromosomas de las células ocurre antes de formarse las zoosporas.

Al estudiar las algas con criterio citológico y bioquímico, se ha encontrado tal diversidad entre los vegetales que llevaban este nombre, que se hacía imposible mantenerlos reunidos en un solo grupo.

Las algas pueden afectar las características del agua de dos maneras: En primer lugar, como ocurre con los actinomicetos, las algas pueden alterar las características organolépticas [29], [30]. En segundo lugar, algunas cianobacterias producen toxinas con efectos en la salud [31], [32]. Las cianobacterias y sus toxinas pueden causar: diarrea y como un efecto agudo cáncer [33].

Ciertas cianobacterias, y otras algas de agua dulce, así como sus toxinas aparecen en la lista de contaminantes del agua potable (CCL) en los Estados Unidos de América.

Además su reconocimiento en la lista de los contaminantes del agua potable por la Agencia de Protección al Ambiente (EPA) en 1998, ilustra el creciente interés en estos microorganismos y su posible impacto en la salud pública [34].

Las floraciones algales, también conocidas como “blooms”, son eventos de

multiplicación y acumulación de las microalgas que viven libres en los sistemas acuáticos como fitoplancton, y que presentan un incremento significativo de la biomasa de una o pocas especies, en períodos de horas a días. Estos eventos ocurren naturalmente en los sistemas acuáticos. Sin embargo, se ha registrado un incremento mundial en su frecuencia y duración, asociado con las condiciones de eutroficación de los cuerpos de agua [35].

Las floraciones pueden ser desarrolladas por diversas especies de fitoplancton pertenecientes a los Phyla: Chlorophyta (algas verdes), Dinophyta o Pyrrophyta (dinoflagelados), Rhodophyta (algas rojas), Cryptophyta y Ochrophyta (diatomeas) dentro de las algas eucariotas, y Cyanophyta (cianobacterias o algas verdeazules) de procariotas [68].

Son muchas las especies de cianobacterias que desarrollan floraciones en ambientes de agua dulce, salobre o marina. Entre los géneros de cianobacterias de aguas continentales (dulce y salobre), que han registrado floraciones tóxicas con mayor frecuencia, en el nivel mundial, se destacan: *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktothrix*, *Cylindrospermopsis* y *Nodularia*, por su amplia distribución y por los efectos sobre otros organismos, debido a la presencia de las toxinas, denominadas genéricamente cianotoxinas.

Las floraciones de algas nocivas (FAN) en agua dulce están compuestas por algas que crean riesgos para la salud de los seres humanos o los animales, a través de la producción de toxinas o de compuestos bioactivos que deterioran la calidad del agua. La mayoría de los problemas del agua dulce reportados en los Estados Unidos de América y en el mundo, se deben a las cianobacterias nocivas, pero otros grupos de algas también pueden ser perjudiciales.

Las FAN ocurren en agua dulce, en lagos y embalses de todo el mundo [35]. Representan una amenaza directa para la salud humana y animal [36- 43], y de los mismos ecosistemas acuáticos, ya que las toxinas que producen pueden

degradar la calidad del agua causando la mortalidad de peces en la vida silvestre [44-47]. Las FAN también afectan negativamente a especies amenazadas y en peligro de extinción [47], e impiden el crecimiento de la flora y la fauna acuática [48], [49].

Además de los problemas ocasionados en las Plantas Potabilizadoras, los crecimientos de algas pueden interferir con las operaciones de las plantas generadoras de energía hidroeléctrica y en los sistemas de enfriamiento fabriles [39].

1.3.1 Los factores que favorecen el desarrollo de las FAN pueden resumirse principalmente en:

1.3.1.1 La eutroficación de los sistemas acuáticos es debida al incremento de los niveles de nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P) por:

a) Los aportes puntuales de aguas residuales domésticas o industriales no tratadas, con alto contenido de N y P, vertidas directa o indirectamente a los sistemas acuáticos.

b) Los aportes difusos de aguas provenientes del lavado de suelos de áreas cultivadas y fertilizadas con N y P, de suelos deforestados o campos agropecuarios.

1.3.1.2 El alto tiempo de permanencia en el sistema acuático, que favorece el crecimiento y la dominancia de las especies causantes de las FAN. El manejo del tiempo de residencia, mediante la regulación de flujos de salida o de entrada, constituye una forma de control o prevención de estos eventos.

1.3.1.3 La aridez de regiones próximas o dentro de la cuenca hidrográfica, o los

efectos similares debidos a suelos sin vegetación, que aportan minerales al agua, además de provocar mayor turbidez por la presencia de partículas disueltas. Esto interfiere con la actividad fotosintética de algunas algas que mueren y sedimentan, dejando un nicho que es colonizado por las cianobacterias.

1.3.1.4 Existen otros factores naturales, como el incremento de la temperatura (mayor de 20 °C) y la intensidad luminosa o la baja turbulencia del agua por vientos menores que 3 m s^{-1} , que, junto con la eutroficación, son los factores más importantes que favorecen el desarrollo de las floraciones.

Este no es un fenómeno nuevo, pero está documentado que la frecuencia y distribución geográfica de las cianobacterias, parece haber aumentado dramáticamente en las últimas décadas en los Estados Unidos de América y en el mundo. La cuestión de las FAN de agua dulce ha recibido más atención fuera de los Estados Unidos de América en el pasado, pero como este fenómeno lo han experimentado la mayoría de los estados en los E.E.U.U.

El sistema de abastecimiento de agua potable es muy particular con características especiales, tales como la ausencia de luz, la presencia de desinfectantes y de niveles bajos de nutrientes y que tiene un destino, a través de kilómetros de tuberías de diferentes diámetros y materiales, fluyendo el agua a través de diferentes estaciones de bombeo, depósitos de refuerzo y puntos de cloración, existiendo la posibilidad de que durante su recorrido pudiese alterarse la calidad bacteriológica del agua, haciéndola en algunos casos inaceptable para uso y consumo humano.

Aunque la calidad microbiológica del agua potable es sistemáticamente controlada por los proveedores de agua, con indicadores de niveles microbianos, tales como coliformes totales y fecales o el conteo de placas heterotróficas (HPC), la mayoría de los componentes de las redes de

distribución de agua pueden llegar a ser excelentes entornos microbianos.

La actividad microbiana en el sistema de distribución evoluciona durante su paso por todo el sistema, como consecuencia de ello, las superficies expuestas pueden ser colonizadas por microorganismos, formándose películas de ellos [50]; lo cual puede ocasionar cambios de calidad que a menudo causan mal sabor, olor y color del agua, si la potabilización es deficiente. Como resultado del rebote microbiológico, la calidad del agua disminuye dejando de cumplir la normatividad aplicable.

Los indicadores microbianos que se utilizan habitualmente son buenas herramientas para el control sanitario del agua; el problema es que sólo ofrecen una vista parcial de la dinámica microbiana. Por lo tanto, la visión obtenida con el análisis microbiológico estándar, no es suficiente para comprender toda la complejidad y diversidad de los sistemas de agua potable; ya que en el grifo de agua es posible encontrar varios tipos de bacterias: protozoos, algas y hongos, de los cuales algunos representan problemas durante el tratamiento de potabilización del agua y otros ocasionan problemas de toxicidad por microcistinas (toxinas que desarrollan las algas).

El Laboratorio Nacional de Investigación de la exposición (NERL) de la EPA ha realizado importantes investigaciones sobre la aplicación de tecnología "verde" para el tratamiento de microcistinas en el agua potable. Los estudios piloto han demostrado que el tratamiento convencional por procesos como la coagulación, floculación y sedimentación, tienen como resultado el aumento en los niveles de la toxina soluble.

Una prometedora tecnología de oxidación química para el tratamiento de microcistina-LR es la fotocátalisis con dióxido de titanio. Esta tecnología funciona de manera eficiente para la purificación del agua y la desinfección. Existen investigaciones que han demostrado que la fotocátalisis con dióxido de

titanio efectivamente podría destruir microcistina-LR en el agua, en concentraciones de hasta 5000 mg/L [51].

1.4 Las algas

En las plantas potabilizadoras de agua, las algas causan diversos problemas durante el proceso y en la operación del mismo: como la obstrucción de las tuberías de conducción, de los filtros y la corrosión de los mismos, además de daños en las instalaciones; también producen cambios químicos en el agua, que causan sabores y olores desagradables [9]. También pueden ocasionar problemas de salud, debido a la generación de toxinas.

Es posible encontrar algas en estanques naturales, en las presas, en las albercas, en los pantanos, en las plantas de tratamiento y, en general, en lugares que tengan la humedad necesaria para su desarrollo, además de los nutrientes [10] y las condiciones de temperatura, luz, profundidad y otros factores físicos que les son indispensables [11].

La humanidad se ha preocupado por controlar el crecimiento de estos organismos desde hace muchos años, especialmente cuando causan problemas en el abastecimiento de agua potable.

Las algas son un grupo de organismos de estructura simple, que producen oxígeno al realizar el proceso de la fotosíntesis, proceso en el cual los organismos con clorofila, como las plantas verdes, las algas y algunas bacterias, capturan energía en forma de luz y la transforman en energía química. Aunque la mayoría de las algas son microscópicas, como las diatomeas, también las hay visibles a simple vista, como las algas marinas y las no marinas. Las algas pueden estar tanto en el agua como en la tierra y pueden vivir en simbiosis con hongos creando líquenes; la simbiosis es un proceso en el que dos organismos cooperan para obtener un beneficio mutuo. Ciertas algas han evolucionado

hacia la pérdida de su capacidad fotosintética [12].

1.5 Clasificación de las algas

La tipificación más simple de las algas microscópicas podría ser la que las distingue en formas móviles y formas inmóviles. Los biólogos suelen utilizar un sistema de clasificación que las distribuye en Reinos diferentes como se indica en la Tabla 1. Las investigaciones actuales sugieren que existen, al menos, 16 divisiones o líneas filogenéticas que son grupos de organismos con un antepasado común. Las líneas filogenéticas de las algas se definen según determinadas características [1]:

- La composición de la pared celular.
- Los pigmentos fotosintéticos.
- Los productos de reserva.
- Los flagelos de las células móviles.
- La estructura del núcleo, el cloroplasto, el pirenoide, zona del cloroplasto que participa en la formación de almidón y la mancha ocular, orgánulo constituido por una gran concentración de lípidos.

En la Tabla 1, se mencionan las características de las diferentes clasificaciones de algas comúnmente encontradas en cuerpos de agua dulce:

Tabla 1. Clasificación de los grupos de algas encontradas [68].

ALGAS	REINO	DIVISIÓN O PHYLA	CLASE	CARACTERÍSTICAS	
	PROCARIOTAS				
	MONERA	Cyanophyta	Cyanophyceae	Presentan clorofila a y b; tienen pigmentos accesorios como β -caroteno, ficocianina, ficoeritrina, aloficocianina, zeaxantina, criptoxantina; tienen sustancias de reserva como almidón de cianofíceas, gránulos de cianoficina y su pared celular está constituida por Peptidoglucanos.	
	EUCARIOTAS				
	PLANTAE	Chlorophyta	Clorophyceae	Presentan clorofila a y b; tienen pigmentos accesorios como α y β -caroteno, luteína, neoxantina, sifonoxantina; tienen sustancias de reserva como almidón y su pared celular está constituida por Celulosa orgánica o carecen.	
		Cryptophyta	Cryptophyceae	Presentan clorofila a y c_2 ; tienen pigmentos accesorios como α y β -caroteno, ficocianina, ficoeritrina, aloficocianina, aloxantina; tienen sustancias de reserva como almidón y su pared celular está constituida por Proteína.	
		Rhodophyta	Rhodophyceae	Presentan clorofila a y d; tienen pigmentos accesorios como α y β -caroteno, ficoeritrina, ficocianina, aloficocianina, luteína, zeaxantina; tienen sustancias de reserva como almidón de florídeas y su pared celular está constituida por celulosa y pectina, galactanos.	
	CHROMISTA	Ochrophyta	Chrysophyceae	Presentan clorofila a, c_1 , c_2 y c_3 ; tienen pigmentos accesorios como β -caroteno, diatoxantina, fucoxantina, diadinoxantina, violoxantina; tienen sustancias de reserva como almidón crisolaminarina, lípidos, manitol y su pared celular está constituida por celulosa, sílice, ácido algínico o carecen.	
			Bacillariophyceae		
			Phaeophyceae		
PROTISTA	Dinophyta ó Pyrrophyta	Dinophyceae	Presentan clorofila a, c_1 y c_2 ; tienen pigmentos accesorios como β -caroteno, peridina, diatoxantina, fucoxantina, diadinoxantina; tienen sustancias de reserva como almidón, lípidos, manitol y su pared celular está constituida por celulosa.		
	Euglenophyta	Euglenophyceae	Presentan clorofila a y b; tienen pigmentos accesorios como α y β -caroteno, neoxantina, diadinoxantina; tienen sustancias de reserva como paramilo y su pared celular está constituida por Proteína.		

Las algas procarióticas, que carecen de membrana nuclear, se clasifican en el Reino Monera. Las formas unicelulares de las algas eucarióticas, que tienen su núcleo rodeado por una membrana, se incluyen en el Reino Protista, al igual que las líneas filogenéticas con formas pluricelulares, aunque según ciertas clasificaciones estas últimas se incluyen en el Reino Plantae [1]. Una hipótesis apunta a que los orgánulos de las células de las algas han evolucionado a partir de endosimbiontes [1].

1.6 Las líneas filogenéticas

En la clasificación de las algas se han definido dieciséis líneas filogenéticas:

Algas verde azuladas o azules (Cyanophyta): Las algas verde azuladas también son llamadas bacterias verde azuladas, porque carecen de membrana nuclear, como las bacterias. Sólo existe un equivalente del núcleo, el centroplasma, que está rodeado, sin límite preciso, por el cromatoplasma periférico coloreado. El hecho de que éstas se clasifiquen como algas en vez de bacterias es porque liberan oxígeno realizando una fotosíntesis similar a la de las plantas superiores.

Ciertas formas tienen vida independiente, la mayoría se agrega en colonias o formando filamentos. Su color varía desde verde azulado hasta rojo o púrpura, dependiendo de la proporción de dos pigmentos fotosintéticos especiales: la ficocianina (azul) y la ficoeritrina (rojo), que ocultan el color verde de la clorofila. Mientras que las plantas superiores presentan dos clases de clorofila llamadas a y b, las algas verde azuladas contienen sólo la de tipo a, ésta no se encuentra en los cloroplastos, sino que se distribuye por toda la célula. Se reproducen por esporas o por fragmentación de los filamentos pluricelulares. Las algas verde azuladas se encuentran en hábitats diversos de todo el mundo.

Las algas abundan en la corteza de los árboles, en las rocas y en los suelos húmedos, donde contribuyen a la fijación de nitrógeno. Algunas coexisten en simbiosis con hongos para formar líquenes. Cuando hace calor, algunas especies forman extensas y, a veces, tóxicas floraciones en la superficie de las charcas y en las costas. En playas tropicales poco profundas, las algas llegan a constituir unas formaciones curvadas llamadas estromatolitos, cuyos fósiles se han encontrado en rocas formadas durante el precámbrico, hace más de 3000 millones de años. Esto sugiere el papel tan importante que desempeñaron estos organismos cambiando la atmósfera primitiva, rica en dióxido de carbono, por la

mezcla oxigenada que existe actualmente. Ciertas especies viven en la superficie de los estanques, formando lamas o “flores de agua” [1].

Algas verdes (Chlorophyta): se cuentan entre los organismos más antiguos; la primera alga verde aparece en el registro fósil hace más de 2000 millones de años. Se les considera predecesoras de las plantas verdes terrestres. Las algas verdes se asemejan a las plantas superiores en que tienen clorofila a y b y almidón, como material de reserva. La mayoría son unicelulares, móviles o no, coloniales o pluricelulares. Las especies unicelulares móviles se desplazan en el agua gracias a flagelos. Las especies inmóviles pueden generar células reproductoras móviles, es decir, zoosporas. Tanto las móviles como las inmóviles pueden vivir aisladas o reunirse en colonias; a menudo, éstas tienen forma determinada y un número fijo de células, todas ellas iguales, y constituyen un cenobio o una comunidad celular. La mayoría de estas algas posee paredes celulares con dos capas, una interna de celulosa y otra externa con pectina, sustancia blanca amorfa que producen algunas plantas. Muchas clorofitas unicelulares se agrupan en filamentos y son visibles como lama de río o verdín de charca.

Las algas verdes se reproducen de forma vegetativa (por fragmentación y división celular), asexual (por esporas y zoosporas), y sexual por conjugación y en muchas especies se da la alternancia de generaciones. Las algas verdes tienen una enorme importancia, ya que constituyen una fuente de alimento (plancton) para otros organismos acuáticos y contribuyen al aporte de oxígeno atmosférico. Cuando la población de caráceas (algas de agua dulce) aumenta demasiado, provocan mal olor y en charcas y lagos contaminados por nitratos y fosfatos aparece en el agua una espuma densa y maloliente y se produce un drástico descenso del oxígeno disponible, necesario para otras formas de vida acuática [1].

Diatomeas (Ochrophyta): Las diatomeas son organismos unicelulares, pueden

unirse en colonias con forma de tallo o ramificadas. Las células de las diatomeas son completas. Tienen membrana, núcleo, cromatóforos, dos vacuolas que se reparten el líquido intracelular, entre otros organelos. En tales células no se acumula almidón, sino gotas de aceite. Lo más notable de estos vegetales es la cubierta que las envuelve y las protege, constituida por una modificación de la celulosa, impregnada de una combinación silícica. Esta especie de caparazón, el frústulo, se compone de dos piezas que encajan una en otra por sus bordes, como una caja y su tapadera. En muchas diatomeas existe una línea sinuosa que recorre la valva (rafe) que va de un nódulo extremo a otro, interrumpida por un nódulo central. La sílice les confiere rigidez y origina patrones de estrías, esculpidos de manera complicada, que suelen servir como rasgos para su identificación.

El citoplasma contiene la clorofila verde, que se mezcla con la xantofila (de color amarillento), los carotenos y con el fucoxantina, para conferir a las diatomeas su apariencia castaño dorada, con una pigmentación similar, aunque no idéntica, a la de las algas pardas. Su reproducción generalmente es por división celular. Las cubiertas se separan y cada mitad segrega otra un poco más pequeña que encaja con la anterior. Las divisiones celulares sucesivas van produciendo células de menor tamaño, hasta que se alcanza una talla mínima. Periódicamente se originan células de la talla del organismo original por reproducción sexual [1].

Estas algas se encuentran principalmente en charcas de agua dulce o en las capas superficiales de los océanos, donde constituyen un componente principal del plancton del que depende la vida acuática; y en suelos húmedos. Pueden flotar formando parte del plancton o fijarse a rocas u otras superficies.

Los restos fósiles de las conchas de las diatomeas se llaman tierra de diatomeas, que se usa como abrasivo y filtrante. Existen dos tipos morfológicos de diatomeas [1]:

- **Céntricas:** tienen la valva circular y las grabaduras o estrías van desde el centro hasta los bordes. Carecen de rafe. Junto con los flagelados vegetales, constituyen el principal componente del plancton vegetal.
- **Pennadas:** en general, son alargadas o elípticas, en forma de “S”, tienen rafe y las grabaduras parten a menudo de la grieta longitudinal y se disponen a ambos lados de ella, como en una pluma de ave.

Otras líneas filogenéticas de algas: se han definido, al menos, otras once líneas filogenéticas de algas. La mayoría son organismos flagelados unicelulares o miembros de colonias. Los dinoflagelados (Pyrrophyta) son mayoritariamente marinos. Desempeñan un papel destacado como productores primarios en la red trófica, son más conocidos porque originan la marea roja, crecimiento explosivo de ciertas especies que introducen toxinas en el medio [1].

Otras líneas filogenéticas de algas con miembros fotosintéticos son Chrysophyta, Xanthophyta (Tribophyta), Eustigmatophyta, Raphidophyta, Cryptophyta, Euglenophyta y Prasinophyta [1].

1.7 Concentración de Algas

Las algas pueden llegar a las Plantas Potabilizadoras, procedentes de ríos, lagos y presas que alimentan estos sistemas. Son parte constituyente del “schmutzdecke” y en concentraciones de 2400 organismos por cada gramo de arena [13], su efecto es beneficioso para el funcionamiento del filtro [1]. Las algas mantienen el equilibrio biológico produciendo el oxígeno que requieren los heterótrofos para su desarrollo y consumiendo el anhídrido carbónico que estos exhalan; además de actuar como un prefiltro sobre la superficie de la arena [1].

Sin embargo, bajo ciertas condiciones particularmente relacionadas con la disponibilidad de luz y nutrientes, como presencia de fosfatos y nitratos en el agua, pueden producirse explosiones demográficas de algas.

Estos florecimientos o “blooms” de algas pueden crear serios problemas de operación y calidad al tratar el agua; tales como bloqueo o colmatación prematura del lecho filtrante, producción de olor y sabor, incremento en la concentración de sustancias orgánicas solubles y biodegradables en el agua, incremento de las dificultades asociadas con la precipitación de carbonato de calcio y desarrollo de condiciones anóxicas.

Además, la duración del filtro puede reducirse a un sexto de su período normal, debido a un exagerado crecimiento de algas, aún en climas templados, como el de la Gran Bretaña [1].

Durante su actividad fotosintética, las algas pueden reducir la capacidad “buffer” natural o amortiguadora del agua y el pH puede elevarse considerablemente, aún por encima de 10 u 11 unidades, como consecuencia de esto, el hidróxido de magnesio y el de calcio puede precipitar sobre los granos de arena, afectando la eficiencia del proceso y las condiciones de operación del filtro [1].

El control a las algas es difícil, pero puede solucionarse controlando los nutrientes en la fuente y el efecto de la luz al cubrir los reservorios de agua sin tratar. En Europa este problema se obvia techando los filtros, encontrando que la falta de luz no afecta mayormente el proceso y la reducción de las algas permite operar con tasas de filtración más altas [1].

Algunas algas son productoras de sustancias tóxicas, con frecuencia las Cianofitas causan intoxicaciones en el ganado, llegando a ser letales. En el hombre producen diarrea, con una sintomatología parecida a la del cólera [14].

1.8 Casos atribuidos a cianotoxinas en el agua potable

En 1931, en los Estados Unidos de América, un afloramiento masivo de *Microcystis* en los ríos Ohio y Potomac causó enfermedades a más de 5000 personas que se abastecían de agua potable proveniente de estos ríos. El tratamiento de agua potable por precipitación, filtración y cloración no fue suficiente para eliminar las toxinas [15].

En 1968, en los Estados Unidos de América, fueron compilados numerosos casos de enfermedades del aparato digestivo, después de la exposición a crecimientos de masa de cianobacterias [16].

En 1975, en los Estados Unidos de América, sucedió un choque endotóxico de 23 pacientes de diálisis, en Washington D.C., que se atribuyó a un afloramiento de cianobacterias, en un reservorio de agua potable [17].

En 1979, en Australia, se combatió el afloramiento de *Cylindrospermopsis raciborskii* en un reservorio de agua potable en Palm Island, con sulfato de cobre, lo cual conllevó a la liberación de toxinas de las células en el agua y por lo tanto, causó enfermedades graves (con hospitalización) a 141 personas que se abastecieron de este reservorio [18], [19].

En 1981, en Australia, en la ciudad de Armidale, se elevaron las actividades de enzimas en el hígado y en la sangre de la población abastecida con agua superficial contaminada por *Microcystis* spp. [20].

En 1985, en los Estados Unidos de América, se compilaron estudios de casos sobre náuseas, vómitos, diarrea, fiebre, infecciones de ojos, oídos y garganta, después de la exposición a crecimientos de masa de cianobacterias [21].

En 1993, en China, la incidencia de cáncer hepático se relaciona claramente

con las fuentes de agua y es significativamente mayor para las poblaciones que usaban agua superficial infectada con cianobacterias comparado, con aquellas que bebían agua subterránea [22].

En 1993, en Australia, debido a afloramientos de cianobacterias tóxicas, más de 600000 días hombre se pierden anualmente por la ingestión de agua considerada como potable [18].

En 1994, en Suecia, cerca de Malmo, el uso ilegal de agua de río no tratada en una fábrica de azúcar condujo a una conexión cruzada accidental con el abastecimiento de agua potable en un número incierto de horas. El agua del río estaba densamente poblada con *Planktothrix agardhii*, y las muestras tomadas pocos días antes y pocos días después del incidente mostraron que estas cianobacterias contenían microcistinas. Un total de 121 de 304 habitantes del pueblo (así como algunos perros y gatos) se enfermaron con vómitos, diarrea, retortijones musculares y náuseas [23].

1.9 Métodos para el control de algas

El control de algas en los depósitos de agua se ha abordado de diferentes formas, de acuerdo a las condiciones en que se encuentre la localidad donde se presente el problema; con atención especial, cuando el problema causado por las algas afecta los abastecimientos de agua en las comunidades [24].

Se ha utilizado una variedad de métodos para llevar a cabo el control de estas algas, algunas de estas técnicas están más generalizadas que otras, ya sea por el aspecto económico [25], o bien porque su aplicación sea más práctica. De manera general, se pueden reconocer los siguientes métodos de control: biológico, ecológico, físico y químico [26].

1.9.1 El control biológico

Se basa principalmente en la utilización de un organismo para controlar a otro (utilizándose principalmente gansos, cisnes, patos, peces, caracoles, etc.). Este método ha tomado más importancia en los últimos años debido a que, al contrario de otros métodos, éste es el que produce una menor cantidad de efectos secundarios [24].

1.9.2 El control ecológico

Este método involucra la limitación de uno o más factores necesarios para el crecimiento óptimo de las poblaciones de algas, éstos pueden ser físicos o químicos [27].

Uno de los factores que se consideran dentro de los tipos físicos, es la cantidad de luz, para muchas algas el no contar con luz ambiental les impide su funcionamiento (fotosíntesis), aún cuando hay otras a las que no les afecta en gran medida.

Sin embargo, la práctica de la obstrucción de la luz sobre cuerpos de agua con ese fin, es posible tan sólo en recipientes de menor tamaño, como lo serían los tinacos de uso doméstico; por lo tanto, en reservorios más grandes, lo que se aconseja es la obstaculización de la materia orgánica, es decir, los nutrientes que propiciarían la proliferación de estos organismos [26].

1.9.3 El control físico

También podría llamarse control mecánico. Entre estos métodos se encuentra el podado, arranque y cribado bajo el agua. Se emplea principalmente contra masas flotantes de algas y plantas acuáticas [26], [27].

1.9.4 El control químico

En contraste con otros métodos, éste es el más desarrollado, aun cuando existe cierta cantidad de productos para tal efecto; los más utilizados son el sulfato de cobre (II) y el cloro [26 - 28]. Otras sustancias utilizadas en menor escala son el agua oxigenada y el permanganato de potasio; entre otros. El sulfato de cobre (II) es el preferido para el tratamiento de áreas grandes, por su economía, efectividad y seguridad para el hombre y los peces. Se emplea desde 1890 [26]. El cloro se recomienda para el control de algas en aguas de uso y consumo humano [26].

1.10 Descripción del problema

La Planta Potabilizadora estudiada, ha presentado problemas en su operación; ocasionados por el taponamiento de los filtros por consecuencia de la acumulación de algas, partículas suspendidas y materia orgánica; esto provoca un grave problema, ya que ocasiona una disminución del tiempo entre un lavado y otro de los filtros aumentando el desperdicio del agua en el retrolavado y la disminución en el rendimiento de potabilización.

1.11 Objetivos del trabajo

1.11.1 Objetivo general.

Determinar los grupos taxonómicos principales de algas que integran la comunidad antes del proceso de potabilización; así como identificar y cuantificar las especies de algas de interés sanitario, para determinar si su presencia es un riesgo para la salud y evaluar si alteran la eficiencia del proceso de potabilización y como lo hacen.

1.11.2 Objetivos específicos

- a) Elaborar un catálogo de la diversidad de las algas en los cuerpos de agua, resaltando las especies de interés sanitario.
- b) Determinar la abundancia de los Phyla de algas de interés sanitario contenidos dentro de una Planta Potabilizadora de filtración directa.
- c) Identificar y cuantificar las especies de algas de interés sanitario.
- d) Determinar cuáles son los grupos de algas de interés sanitario que ocasionan problemas dentro de la Planta Potabilizadora de filtración directa.
- e) Describir los problemas que ocasiona cada grupo de algas de interés

sanitario dentro de una Planta Potabilizadora de filtración directa.

- f) Describir los métodos más usuales para el control de los grupos de algas problemáticas, observados en una Planta Potabilizadora de filtración directa.
- g) Evaluar la eficiencia de la Planta Potabilizadora con respecto a la remoción de algas al finalizar el proceso de potabilización.

1.12 Definición del Proyecto

Realizar la identificación taxonómica y cuantificación de las algas contenidas en cuerpos de agua superficiales como son la Presas: El Cuchillo, Cerro Prieto y La Boca y en el tanque homogenizador de agua, ubicado al principio de las distintas unidades de tratamiento. Así como la definición de problemas que ocasionan las algas durante el proceso de potabilización y la evaluación de la eficiencia del proceso con respecto a la eliminación de algas.

1.13 Metas

- a) Determinar e identificar la diversidad de grupos de algas contenidas dentro de una Planta Potabilizadora de filtración directa.
- b) La realización de un conteo de algas, para así determinar cuáles son las algas problemáticas durante el tratamiento de potabilización.
- c) La elaboración de un catálogo de algas de interés sanitario encontradas dentro de una Planta Potabilizadora de filtración directa para lograr su fácil identificación.
- d) Identificar riesgos potenciales de salud y operación de la Planta, para plantear tratamientos oportunos y específicos para el control de algas.

1.14 Hipótesis

Es posible incrementar el proceso de filtración en Plantas Potabilizadoras de agua, si se controla el crecimiento y el efecto de los grupos de algas mediante la identificación, cuantificación, evitando el desarrollo de dichos grupos.

1.15 Justificación

Actualmente no existen registros en el Estado de Nuevo León que determinen las cantidades de los microorganismos integrantes de la capa biológica, que participan en el tratamiento del agua para el consumo humano. Tampoco se conoce cuáles son las especies de algas que más obturan los filtros y qué clase de procedimientos se deben aplicar para su remoción.

Por lo anterior, se hace indispensable promover acciones que lleven a la identificación y cuantificación precisa de los microorganismos que participan en el tratamiento biológico del agua en esta zona del País. Con la identificación de las especies algales, se podrá determinar cuáles de ellas son un riesgo potencial para la salud, por las toxinas que producen y cuáles son las que regularmente causan obturación en los filtros, por ser las poblaciones más abundantes. De este modo se podrán proponer alternativas para evitar este problema o medidas de control, si se llegasen a presentar florecimientos nocivos.

La determinación de esta microflora permitirá comparar su composición, en referencia con otros microorganismos que han sido identificados en otros países, como Brasil.

CAPÍTULO 2

MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Toma de muestras

Para el estudio de las algas motivo del presente trabajo, se consideró conveniente planear la toma de muestras en las distintas fuentes de abastecimiento de agua, que mediante líneas de conducción abastecen a la Planta Potabilizadora.

En octubre de 2009 (otoño) se procedió a la toma de muestras a la llegada de las líneas de conducción de agua a la Planta Potabilizadora, y que en este primer muestreo correspondieron al agua de la Presa El Cuchillo y a la Presa Cerro Prieto.

En enero de 2010 (invierno) se tomaron otras dos muestras de agua en los mismos puntos a la llegada del agua a la Planta Potabilizadora, pero que conducían agua de la Presa El Cuchillo y de la Presa La Boca.

Se realizó un tercer muestreo de agua en mayo de 2010 (primavera), este muestreo se realizó muy próximo a las obras de toma de las Presas: El Cuchillo, Cerro Prieto y La Boca.

Se consideró conveniente realizar muestreos en el agua mezclada procedente de las Presas referidas, antes de la aplicación de los reactivos para coagulación-floculación, y tomar otra muestra de agua el mismo día, pero al final del proceso de potabilización.

Los garrafones utilizados para la toma de muestra fueron previamente acondicionados para garantizar su limpieza, utilizándose para tal fin, materiales

de limpieza recomendados.

Unos metros antes de la llegada de las líneas de conducción al tanque de homogenización ubicado en la Planta Potabilizadora en estudio, se localizaron válvulas que permitieron la toma de muestra de agua en cada una de las líneas, procedentes de las diferentes Presas en estudio.

Los muestreos en los vasos de las 3 Presas seleccionadas, se efectuaron lo más cerca posible de las obras de toma, utilizando para tal fin una cubeta de plástico previamente lavada en el laboratorio, para el llenado de los garrafones de 19 litros.

En cada punto de muestreo de todos los muestreos, se tomaron muestras de agua que fueron envasadas en 2 garrafones de 19 litros cada uno, debidamente identificados. A uno de los garrafones en cada sitio de muestreo se les adicionó lugol como fijador para preservar los organismos presentes y al otro garrafón no se le adicionó nada. Todos los garrafones con muestras de agua se colocaron en hieleras con hielo para su transporte al laboratorio.

Las muestras de agua fueron almacenadas en frío, a 4 °C, hasta su análisis correspondiente.

2.2 Análisis de las muestras de agua

2.2.1 Concentración de las muestras de agua

La colecta de las muestras de agua procedentes de cada fuente, fue almacenada en garrafones de 19 litros, uno de los garrafones fue conservado solamente en frío, sin adición de conservadores y al otro se le adicionó lugol. De cada garrafón de 19 L, se tomó una porción de 1 litro que fue utilizada para la concentración de microorganismos.

El procedimiento utilizado para la concentración de muestras de agua (microorganismos), se realizó por medio de un equipo de filtración, en el cual se colocó una membrana de 0.45 μm de diámetro de poro, se aplicó vacío a 18 cm/Hg, procurando que durante la filtración se mantuviera húmedo el filtro, dejando aproximadamente 0.5 cm de agua sobre el filtro.

Con cuidado se retiró la membrana filtrante, depositándola en un tubo de ensaye, adicionando 10 mL de agua filtrada (de la misma muestra), se aplicó ligera presión sobre la membrana para lograr el desprendimiento de los microorganismos, los cuales se dejaron sedimentar por 24 horas, para posteriormente continuar con la determinación.

Después, mediante agitación de la muestra contenida en el tubo de ensaye, se logró el desprendimiento de los microorganismos y del material particulado de la membrana.

Lo indicado en los dos párrafos anteriores se repitió en las muestras con lugol y sin lugol, en cada línea de conducción y en cada Presa, obteniéndose 3 tubos de ensaye con una concentración 1:100 de cada uno.

De cada tubo de ensaye, se tomaron 3 alícuotas para el análisis de los

microorganismos y a cada alícuota se le realizaron 5 observaciones, una vez que se concentraron las muestras y después de su homogenización, se procedió a la observación de las alícuotas para determinar los taxones de algas.

Para lograr lo anterior, se utilizó un microscopio para identificar las algas mediante claves dicotómicas de identificación, y con la descripción de las características de cada taxón, se confirmaron las identificaciones.

2.2.2 Elaboración del catálogo de algas

Con la metodología mencionada en el punto 2.2.1, se procedió a tomar fotografías para disponer de un registro fotográfico de las algas encontradas en las muestras de agua analizadas, con la finalidad de facilitar la identificación de las mismas. El acopio de fotografías sirvió para la elaboración del catálogo de algas con los géneros más representativos y tener evidencias tangibles de las mismas.

2.2.3 Estimación de la abundancia de algas

Una vez establecida la diversidad de microorganismos presente, se procedió a la estimación de la abundancia de las algas, lo cual se realizó utilizando una celda de conteo de Sedgwick-Rafter (S-R).

El procedimiento consistió en homogeneizar el concentrado de las muestras de agua como se mencionó en el punto 2.2.1, posteriormente con ayuda de una pipeta de 1 mL se llenó la celda (S-R) con la muestra de agua, colocando el cubreobjetos en forma diagonal sobre la celda, deslizándolo suavemente sobre los bordes. Lo anterior evitó la formación de burbujas en las esquinas.

Antes del recuento se dejó reposar la celda (S-R) durante 15 minutos, para lograr la sedimentación del material particulado.

El conteo realizado en cada celda se llevó a cabo en 5 campos elegidos al azar, numerando los individuos visibles en una magnificación de 10x y en el centro del campo a 40x.

Las algas se enumeraron separándolas por formas vitales, es decir, individuos o colonias de acuerdo con los grupos taxonómicos. Dependiendo de la densidad del plancton, se procedió a hacer diluciones de la muestra concentrada.

La fórmula utilizada para calcular el número de formas vitales de fitoplancton por Filo, por mililitro, fue la siguiente:

$$\text{Número de formas/mL} = \frac{C \times 1000 \text{ mm}^3}{A \times D \times F}$$

Donde:

C = número de microorganismos contados;

A = Área de un campo en mm³

D = profundidad de un campo; (profundidad de la célula S-R en mm)

F = número de campos contados.

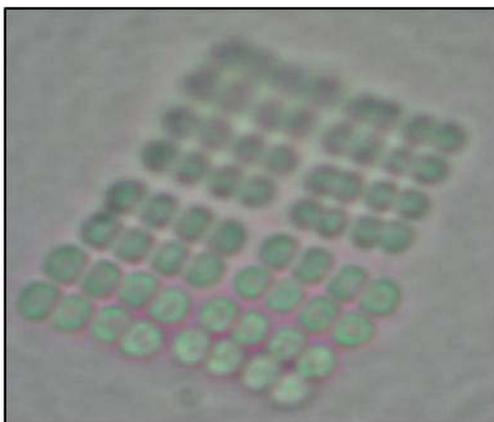
CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Catálogo de algas

El catálogo de algas fue elaborado al mismo tiempo que se realizaba el proceso de identificación de los grupos de algas. Consistió en fotografías que representan los géneros más frecuentemente encontrados en las muestras ordenadas por el grupo taxonómico (Phylum) al que pertenecen. La identificación se realizó con el apoyo de: Manual of Fresh-Water Algae de L.A. Whitford G.J. Shumacher [69]; así como el Catálogo de Algas Continentales Recientes de México de Martha Ortega [70]; entre otros.

Grupo: CYANOPHYTA.



Fotografía 1. *Merismopedia* sp.



Fotografía 2. *Anabaena* sp.

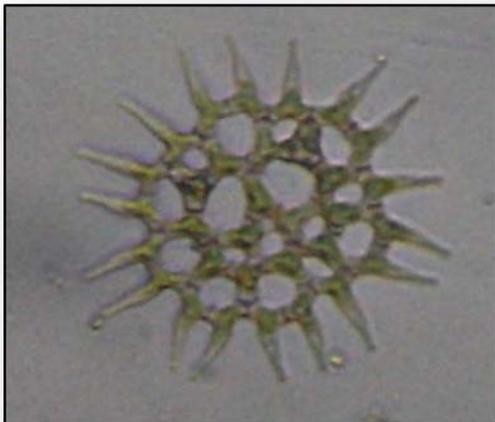


Fotografía 3. *Calothrix* sp.



Fotografía 4. *Spirulina* sp.

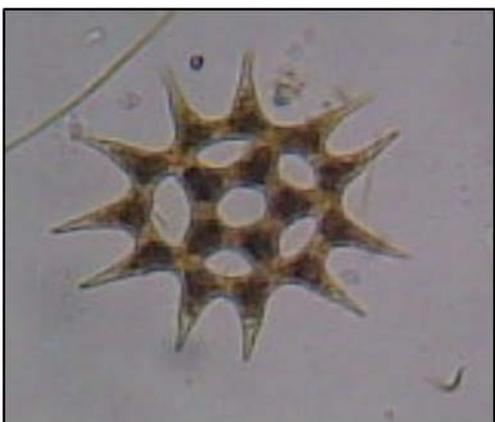
Grupo: CHLOROPHYTA.



Fotografía 5. *Pediastrum duplex*.



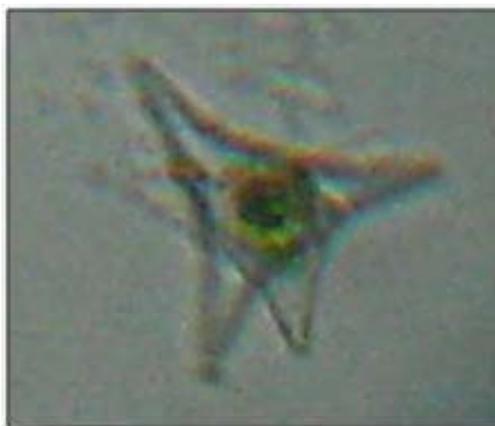
Fotografía 6. *Staurostrum* sp



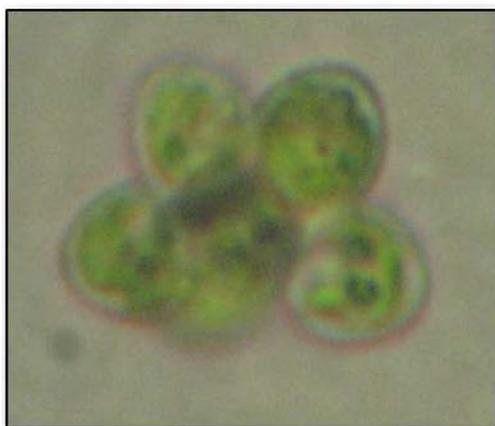
Fotografía 7. *Pediastrum* sp.



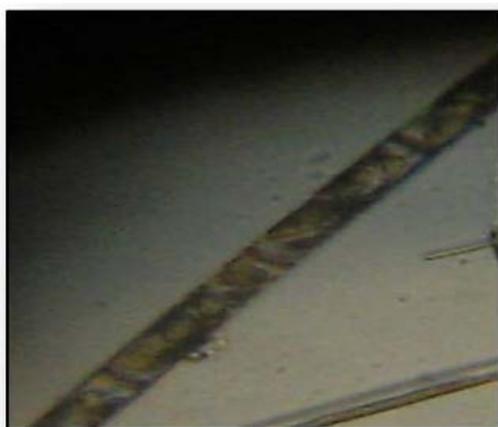
Fotografía 8. *Scenedesmus acuminatus*



Fotografía 9. *Staurostrum* sp.



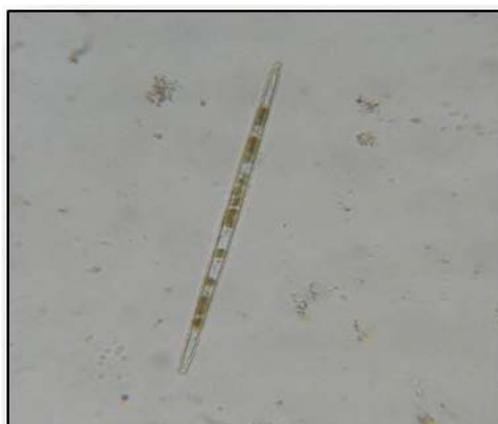
Fotografía 10. Clorofita colonial cocal.



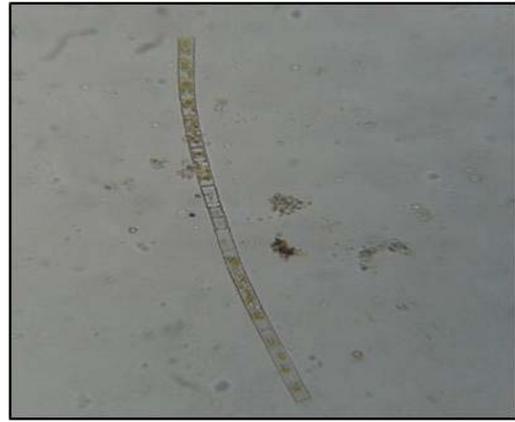
Fotografía 11. Clorofita filamentosa.



Fotografía 12. *Pediastrum simplex*.

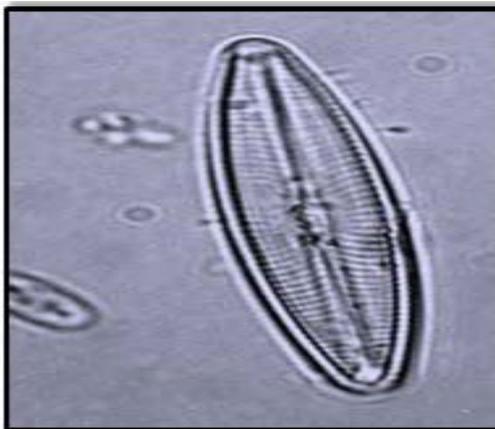


Fotografías 13 y 14. Clorofitas filamentosas.



Fotografías 15 y 16. Clorofitas filamentosas.

GRUPO: OCHROPHYTA.



Fotografía 17. *Navicula* sp.



Fotografía 18. *Diatomea* sp.

GRUPO: EUGLENOPHYTA.



Fotografía 19. *Euglena* sp.



Fotografía 20. *Phacus* sp.

GRUPO: PYRROPHYTA.



Fotografía 21. *Ceratium* sp.

GRUPO: CHRYSOPHYTA.



Fotografía 22. *Pseudostaurastrum* sp.

3.2 Observación de las muestras

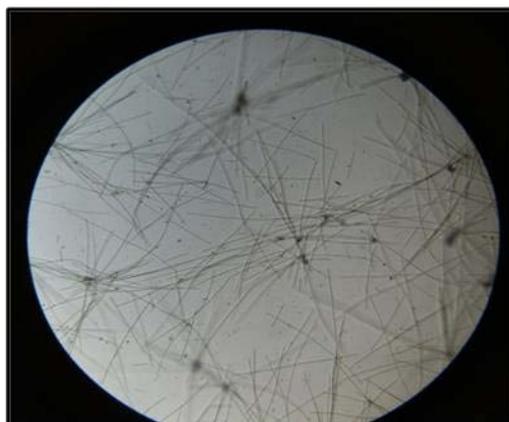
En el agua de las tres Presas se percibieron aspectos diferentes tanto en los vasos de almacenamiento, así como también, en las muestras de agua observadas a través del microscopio, al utilizar un objetivo panorámico de 10x.

En las Fotografías 23, 24 y 25 se aprecian diferencias significativas, como por ejemplo, en la Fotografía 23 que corresponde a la muestra de agua de la Presa La Boca la materia orgánica y los microcrustáceos, son más abundantes que en las otras 2 Presas; y en la Fotografía 24 que corresponde a la muestra de agua de la Presa El Cuchillo, la presencia de algas Cianofitas filamentosas es más evidente que en las otras Presas.

En el agua procedente de la Presa Cerro Prieto, se observó muy escasa materia orgánica y un número menor de algas que en las otras dos fuentes (Fotografía 25).



Fotografía 23. Observaciones al microscopio del agua de la Presa Rodrigo Gómez La Boca.



Fotografía 24. Observaciones al microscopio de agua de la Presa El Cuchillo.



Fotografía 25. Observaciones al microscopio del agua de la Presa Cerro Prieto.

3.3 Conteo de los diferentes grupos de algas por estación

El conteo de los diferentes grupos de algas se realizó después de tener identificados los principales grupos presentes; se cuantificó y se hicieron promedios para el mejor manejo de la información y, a su vez se graficó para realizar comparaciones por estación del año.

Estación del año: otoño

La muestra de agua analizada fue tomada en el mes de octubre de 2009, en las líneas de conducción procedentes de la Presa Cerro Prieto y Presa El Cuchillo, identificándose los grupos de algas presentes en el agua a la llegada de cada una de las líneas de conducción, al tanque de homogenización de la Planta Potabilizadora.

Los resultados obtenidos de algas por grupo en las Presas Cerro Prieto y El Cuchillo, correspondientes a otoño del 2009, las cuales se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados promedio finales, de algas por grupo, en el agua de las Presas Cerro Prieto y El Cuchillo en la estación del año: otoño.

RESULTADOS PROMEDIO FINALES DE ALGAS POR GRUPO DE LAS PRESAS CERRO PRIETO Y EL CUCHILLO ESTACIÓN DEL AÑO: OTOÑO (2009) Org/L					
PRESA	Cyanophyta	Chlorophyta	Ochrophyta	Cryptophyta	Euglenophyta
Cerro Prieto	25	238	282	9	0
El Cuchillo	2540	250	4312	12	4

Los resultados de la Tabla 2 se muestran en la Figura 2. En el inciso a) se graficaron valores promedio de algas de la Presa Cerro Prieto y en el inciso b) se graficaron los valores correspondientes a la Presa El Cuchillo.

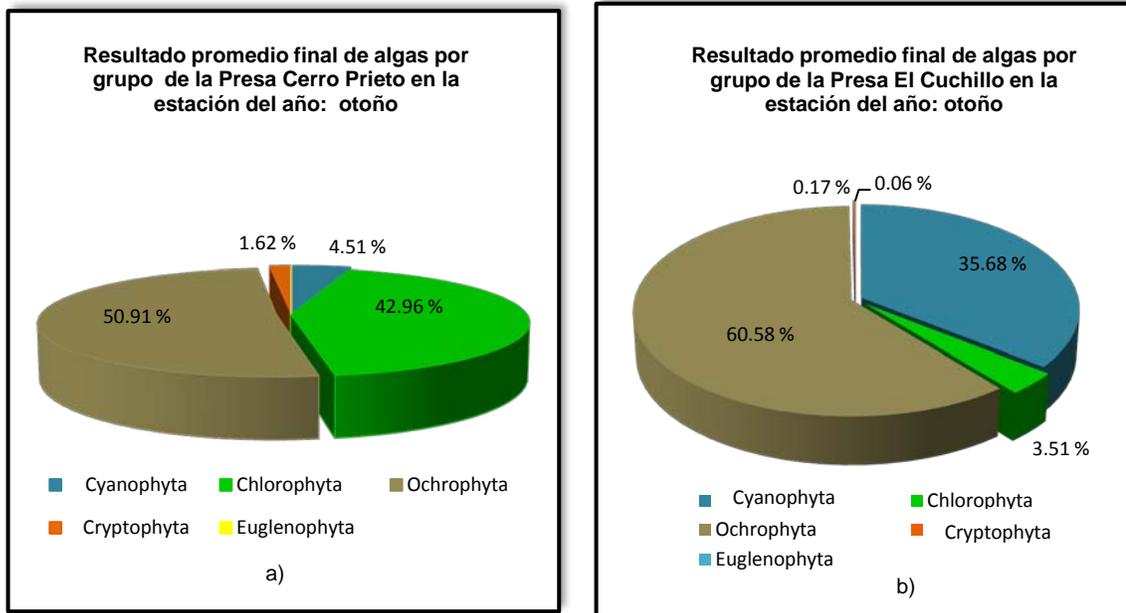


Figura 2. Promedio de los resultados finales de algas de: a) Presa Cerro Prieto y b) El Cuchillo en la estación del año: otoño.

El total de algas encontradas en la Presa Cerro Prieto fue de 554 Org/L, predominando la presencia de Ochrophyta (50.91%), seguida de la Chlorophyta (42.96%), la Cyanophyta (4.51 %) y la Cryptophyta (1.62%). No se detectó la presencia de Euglenophyta.

En el agua de la Presa El Cuchillo el número total de organismos detectados fue de 7118 Org/L, siendo el más abundante la Ochrophyta (60.58%), seguida por la Cyanophyta (35.68 %), la Chlorophyta se detectó en (3.51%), la Cryptophyta (0.17%) y la Euglenophyta (0.06%).

El grupo de algas más abundantes en la Presa Cerro Prieto y El Cuchillo, son la Ochrophyta (diatomeas); sin embargo, en la estación del año: otoño se encontró en mayor abundancia de algas en la Presa El Cuchillo.

La gran diferencia entre el número de organismos entre ambas Presas posiblemente fue debida a la gran extensión del vaso de la Presa El Cuchillo (18000 Ha) en comparación con la extensión del vaso de la Presa Cerro Prieto (3760 Ha) y también posiblemente debido a los aportes de materia orgánica y otros nutrientes más abundantes en la cuenca de la Presa El Cuchillo.

En la Tabla 2, se observa una gran variación entre el número de organismos entre ambas Presas (Cerro Prieto y el Cuchillo), destacándose la Ocrofita (diatomeas) organismos que generalmente ocasionan problemas de obstrucción en los filtros de las Plantas Potabilizadoras, por su caparazón compuesto de sílice.

La Euglenophyta generalmente indica condiciones mesotróficas, ya que es común encontrarla en agua contaminada por compuestos orgánicos y en las lagunas de estabilización; algunas especies producen en el agua olor y sabor a pescado, estos organismos solamente fueron detectados en pequeñas cantidades en la Presa El Cuchillo.

El grupo donde se presentó una variación significativa es en la Clorofita (Algas verdes) y el grupo de las Cianofita (algas verdeazules).

Estación del año: invierno

Durante la estación de invierno se tomaron muestras de agua en las líneas de conducción antes de la llegada a la Planta Potabilizadora, muy próximas al tanque de homogenización. Una de las muestras correspondió al agua de la Presa La Boca, ya que al momento del muestreo, se nos indicó que en ese momento el agua procedía de esta Presa. Otra de las muestras de agua correspondió a la Presa El Cuchillo, y los resultados del conteo de algas se muestra en la Tabla 3. Los resultados indicados en la Tabla 3 son valores promedio, encontrándose que el grupo más abundante fue el de la Cyanophyta

(99.08 %, algas verdeazules) en la Presa El Cuchillo; mientras que en la Presa La Boca la concentración de estos organismos correspondió a 2.99 %.

En la Presa La Boca, la Ochrophyta representó el 59.78% contra el 0.56% de dichos organismos en la Presa El Cuchillo. La Cryptophyta no fue detectada en la Presa La Boca, y en la Presa El Cuchillo solo se detectaron 4 Org/L que representan el 0.02%, la Euglenophyta fue detectada solo en la Presa La Boca (0.32%) y no fue detectada en la Presa El Cuchillo, en el agua procedente de la Presa La Boca, solo se detectaron 2 Org/L de Rhodophyta (0.13%) y ausentes en la Presa El Cuchillo.

Tabla 3. Resultados promedio finales de algas por grupo, del agua de las Presas La Boca y El Cuchillo, en la estación del año: invierno.

RESULTADOS PROMEDIO FINALES DE ALGAS POR GRUPO DE LAS PRESAS LA BOCA Y EL CUCHILLO EN LA ESTACIÓN DEL AÑO: INVIERNO						
Org/L						
PRESA	Cyanophyta	Chlorophyta	Ochrophyta	Cryptophyta	Euglenophyta	Rhodophyta
La Boca	46	566	920	0	5	2
El Cuchillo	21581	75	121	4	0	0

Se graficaron los porcentajes de los organismos encontrados en la Presa La Boca y en la Presa El Cuchillo, los cuales se muestran en la Figura 3.

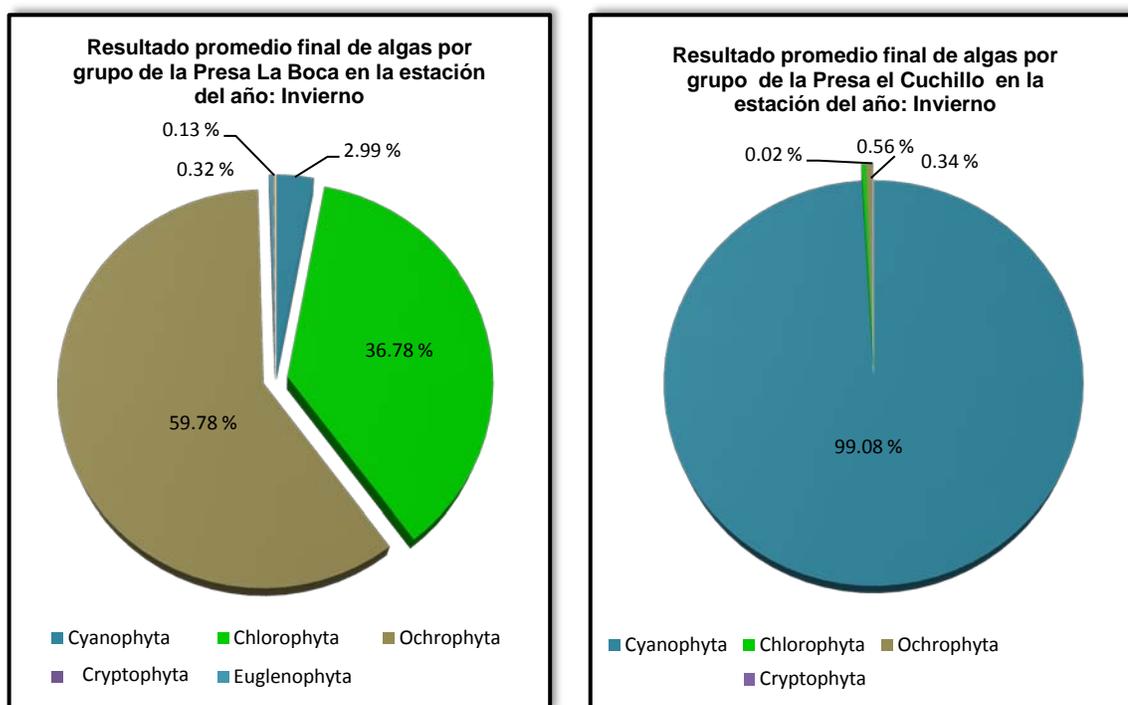


Figura 3. Resultados promedio finales de las Presas La Boca y El Cuchillo en la estación del año: invierno.

Estación del año: primavera

Con la finalidad de contar con mayor información sobre los grupos de algas predominantes, se consideró conveniente tomar muestras de agua directamente en cada una de las Presas (El Cuchillo, Cerro Prieto y La Boca), procurando que cada muestreo se realizara lo más cerca posible a la obra de toma en cada una de las fuentes.

En la Tabla 4, se presentan los promedios finales de algas por grupo, en cada una de las fuentes y en la estación del año de primavera.

Tabla 4. Resultados promedio finales de algas por grupo en el agua de las Presas: La Boca, Cerro Prieto y El Cuchillo, en la estación del año: primavera.

RESULTADOS PROMEDIO FINALES DE ALGAS POR GRUPO DE LAS PRESAS LA BOCA, CERRO PRIETO Y EL CUCHILLO EN LA ESTACIÓN DEL AÑO: PRIMAVERA							
Org/L							
PRESA	Cyanophyta	Chlorophyta	Phyrrhophyta	Ochrophyta	Cryptophyta	Euglenophyta	Rhodphyta
La Boca	300	10274	0	77	0	4	0
Cerro Prieto	2	657	0	54	0	0	0
El Cuchillo	2	37804	2	57	18	7	11

El grupo de la Chlorophyta fue uno de los más abundantes, correspondiendo al 99.74% en la Presa El Cuchillo, el 96.42% en la Presa La Boca y el 92.15% en la Presa Cerro Prieto.

El grupo de la Ochrophyta presentó en la Presa Cerro Prieto un 7.57%, valor superior al 0.15% presentado en la Presa El Cuchillo y del 0.72% del agua de la Presa La Boca.

El grupo Cyanophyta representa un 2.82% del total en la Presa La Boca, contra 0.28% del agua de la Presa Cerro Prieto y del 0.01% encontrados en el agua analizada de la Presa El Cuchillo.

Uno de los grupos más abundantes encontrados durante el muestreo correspondiente a la estación del año: primavera, en las tres Presas correspondió a la Chlorophyta (algas verdes), con variaciones significativas, siendo la de mayor abundancia en la Presa El Cuchillo con un valor de 37804 Org/L y en el agua de la Presa Cerro Prieto, presentó el valor menor que fue de 657 Org/L.

La abundancia de la Chlorophyta seguramente su incremento se debió al aumento de la temperatura, de la intensidad luminosa y de los nutrientes.

Durante la estación del año primavera, no se observó abundancia significativa de Ochrophyta en ninguna de las muestras de agua analizada. El grupo Euglenofita (Euglena), es prácticamente nulo o escaso, ya que el promedio de la abundancia registrada es de 7 Org/L y se encuentra presente en dos de las tres Presas.

En la Figura 4, en los incisos a), b) y c) se muestran los porcentajes de cada uno de los grupos encontrados en los análisis realizados al agua de las tres Presas.

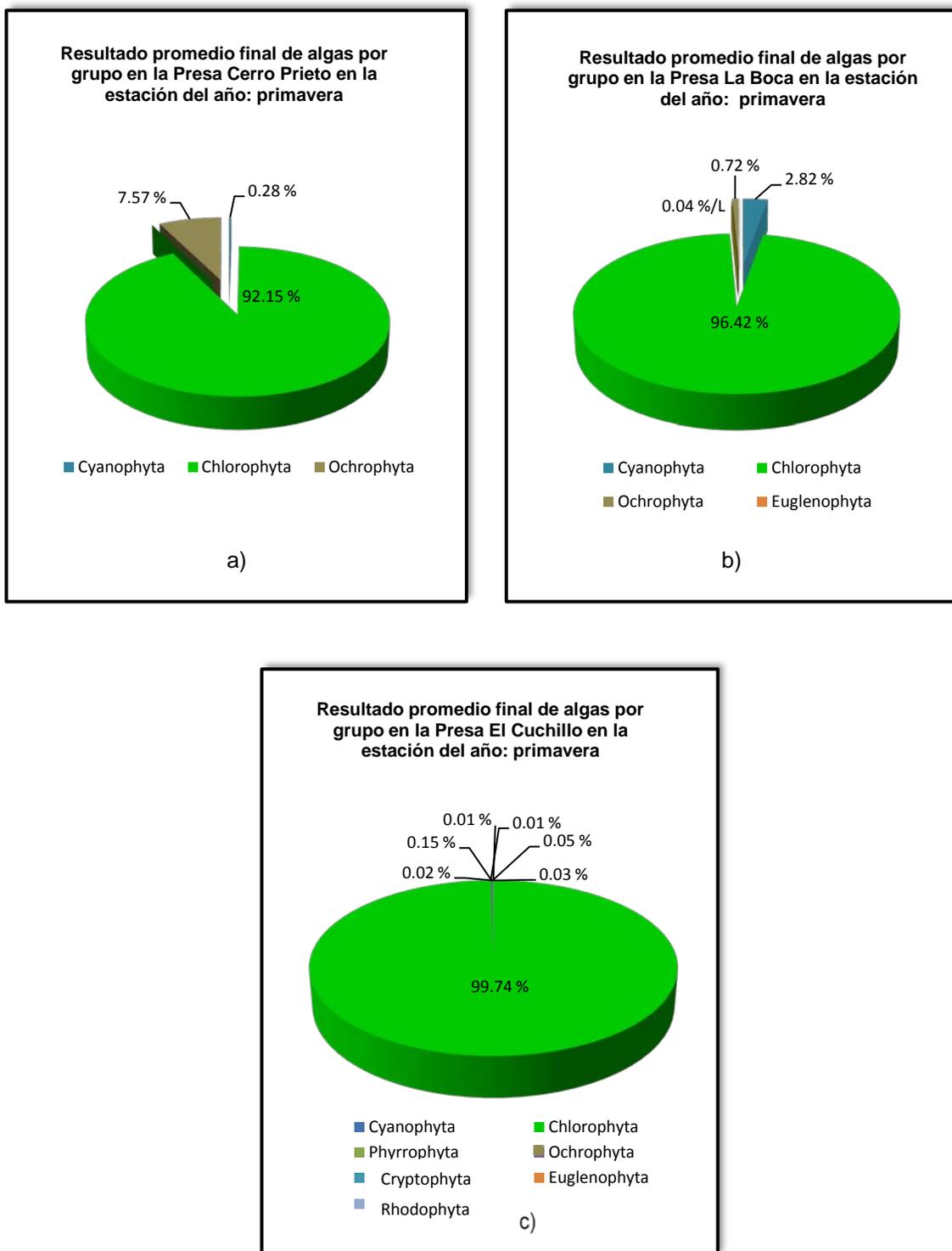


Figura 4. Resultados promedio finales de las Presas Cerro Prieto, La Boca y El Cuchillo en la estación primavera.

3.4 Comparación de resultados de los análisis del agua de las tres Presas por cada estación del año

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos por Presa, en cada una de las estaciones del año analizadas y los resultados son los siguientes:

PRESA CERRO PRIETO

En la Figura 5 se presentan los resultados promedio de la determinación de grupos de algas en el agua de la Presa Cerro Prieto, correspondiente a los muestreos realizados en las estaciones del año de otoño y de primavera. Destacan por su abundancia la presencia de Chlorophyta con un 92.5% en primavera contra un 42.98% en otoño.

Llama la atención que la Ochrophyta no fue detectada en la muestra de agua analizada correspondiente a la estación del año de primavera, sin embargo en otoño, este grupo presentó el 50.9% con la presencia de 282 Org/L, el 4.51% con 25 Org/L correspondió a la Cyanophyta en otoño, contra el 0.28% y 2 Org/L en primavera. La Cryptophyta en primavera presentó un 7.57% con 54 Org/L y en otoño el 1.62% con 9 Org/L.

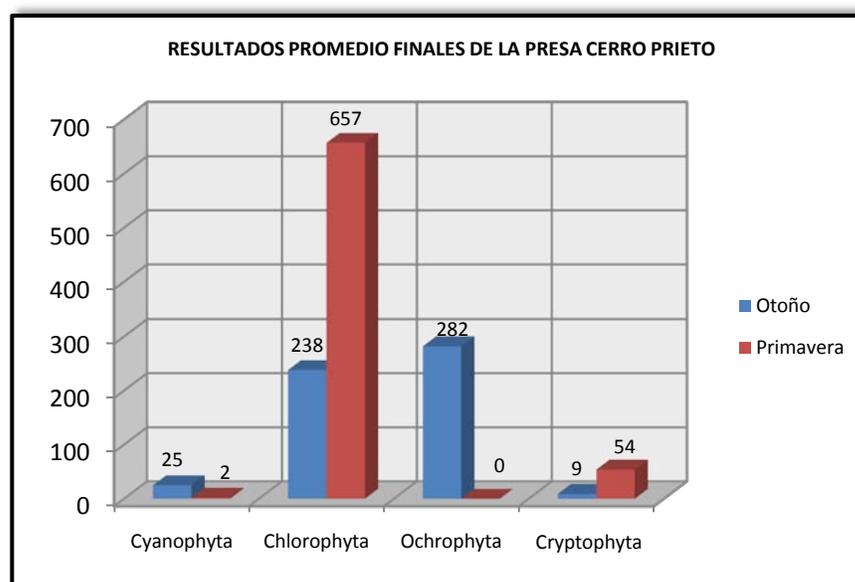


Figura 5. Resultados promedio finales del agua de la Presa Cerro Prieto.

PRESA LA BOCA

En invierno y en primavera se tomaron muestras de agua en la Presa La Boca, para determinar el número de Org/L que se observan en la Figura 6. En cada una de estas estaciones del año, destacándose que la Chlorophyta representa un 96.42% con 10274 Org/L en primavera, contra el 36.78% y 566 Org/L en invierno. Diferencia significativa debido a las condiciones ambientales prevalecientes entre una estación y otra.

El 2.88% con 300 Org/L del grupo de Cyanophyta correspondió a la muestra de agua tomada en primavera y el 2.99% con 46 Org/L se presentó en la muestra de agua tomada en invierno.

La Ochrophyta con 920 Org/L representó el 59.78% en invierno, contra 0 Org/L en primavera, fenómeno inverso con relación con la Cryptophyta ya que en primavera con 77 Org/L representó el 0.72% y en invierno no se detectaron ejemplares. En primavera no se detectaron organismos de Euglenophyta y en invierno se encontró en 0.32% con 5 Org/L. La Rhodophyta representó el 0.04% con 4 Org/L en primavera y en invierno con 2 Org/L que correspondió al 0.13%.



Figura 6. Resultados promedio finales del agua de la Presa La Boca.

PRESA EL CUCHILLO

El agua de la Presa El Cuchillo fue muestreada en otoño, invierno y primavera y los resultados se presentan en la Figura 7, destacándose que la Chlorophyta representa un 99.74% con 37804 Org/L en primavera, contra el 3.51% en otoño con 250 Org/L y en invierno solo se detectaron 75 Org/L correspondiendo a 0.34%. La Cyanophyta en invierno mostró el 99.08% con 21581 Org/L contra el 35.68% y 2540 Org/L en otoño. Este último grupo presentó solo 2 Org/L en primavera, representando tan solo 0.01%.

El grupo de Ochrophyta en otoño con 4312 Org/L y un 60.58% valor superior al presentado en invierno con 121 Org/L (0.56%) y en primavera con 57 Org/L (0.15%).

La Cryptophyta, la Euglenophyta, la Rhodophyta (algas rojas) y la Phyrrophita (algas pardas) no presentaron valores significativos en las tres estaciones del año muestreado.

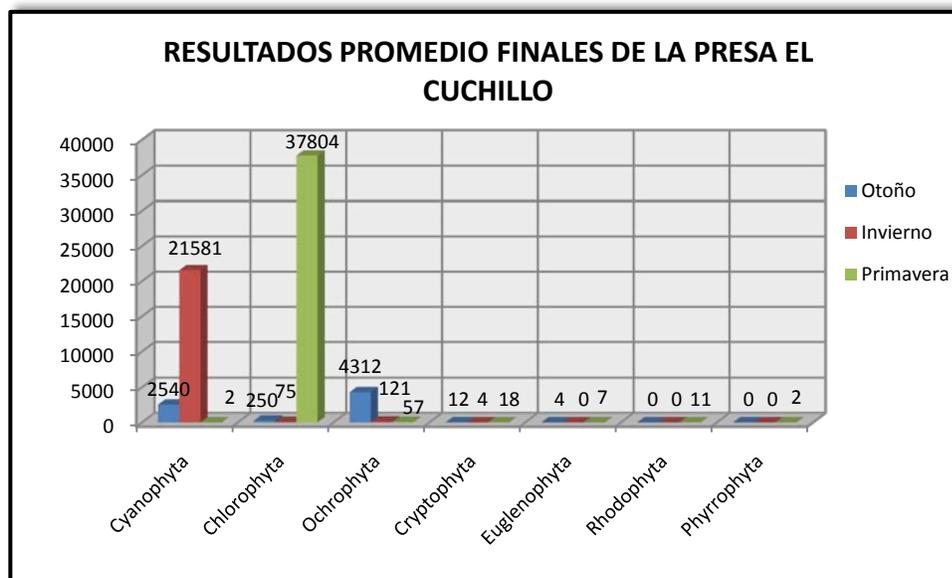


Figura 7. Resultados promedio finales del agua de la Presa El Cuchillo.

La determinación de los distintos grupos de algas nos demostró que existen variaciones muy significativas de acuerdo a la estación del año y de las condiciones ambientales prevaletientes del día del muestreo y días previos al mismo. En los cuerpos de agua superficial muestreados (Presas), fue notorio el fenómeno “auge o pulso” que los limnólogos designan como floración primaveral; sin embargo, en el caso de las algas verdeazules (Cyanophyta) se notó mayor abundancia en otoño, y en invierno se observó una floración del orden de 21581 Org/L con un decaimiento en primavera hasta 2 Org/L.

3.5 Descripción de los grupos más abundantes y/o frecuentes encontrados en este estudio:

De acuerdo a los resultados obtenidos ya comentados en las páginas anteriores, destacan por su abundancia y frecuencia:

- La Chlorophyta (Algas verdes);
- La Cyanophyta (Algas verdeazules);
- La Ochrophyta (Diatomeas) y
- La Phyrrophyta

3.5.1 Chlorophyta

El grupo de las algas verdes, que representan la mayoría de las algas encontradas formando parte del influente que recibe la Planta Potabilizadora para realizar el proceso de potabilización; presentó una diversidad muy grande en sus estructuras, ya que se encontraron solitarias o en colonias, de formas esféricas, ovaladas, alargadas o fusiformes, de vida libre o fijas, ramificadas y arborescentes. De acuerdo a la información obtenida durante el desarrollo de este trabajo se les clasificó como: esféricas, filamentosas, coloniales y otras; identificando algunos géneros de algas de interés sanitario presentes en las muestras, entre las que se encontraron:

Chlorella: este género de algas se encontró en el agua analizada de las tres Presas; con mayor abundancia en la Presa Cerro Prieto. Este género de algas forma asociaciones con otros organismos vegetales, ya sea como simples simbioses, o como parásitos verdaderos, ya que se ha observado su presencia en lesiones micóticas internas, en el hombre. Estas viven bien en el agua contaminada con materia orgánica o muy ricas en sales minerales.

Las algas de este género son muy importantes en lagunas de estabilización, cuando se presentan en gran número producen olor a moho en el agua. En algunos casos se ha encontrado que algunas especies causan obstrucción en los filtros de arena.

Cosmarium: género encontrado únicamente en la Presa El Cuchillo, en la estación del año primavera. Son algas que viven en la superficie. Algunas especies provocan olor a grama y turbidez (falsa coloración verde) al agua. Pueden persistir en los sistemas de distribución.

Dictyosphaerium: producen sabor y olor de grama o también de pescado cuando están en grandes concentraciones. Algunas especies entorpecen el proceso de filtración en arena.

Oocystis: son algas que viven en la superficie del agua y pueden existir en grandes cantidades en pequeñas lagunas y otros embalses de agua superficial.

Pediastrum: este género de algas es uno de los más abundantes encontrados en las tres Presas y en las estaciones del año analizadas. Son algas que viven en la superficie del agua, pueden llegar a producir sabor y olor de pescado; viven bien en agua contaminada por drenajes industriales provenientes de la fabricación del papel, descargas que pueden ser tóxicas para otras especies de algas.

Peridinium: género encontrado únicamente en el agua de la Presa La Boca, en primavera; este género provoca olor semejante al de los pepinillos, aún en pequeñas concentraciones. En gran número producen olor a pescado y pueden provocar obstrucción en los filtros.

Scenedesmus: este género es uno de los que presentó una mayor abundancia en las tres Presas y en las estaciones del año analizadas. Viven en la superficie del agua, pueden provocar olor y sabor de grama. Pueden vivir en agua contaminada y en lagunas de estabilización; en general, pueden mantenerse en los sistemas de distribución.

Staurastrum: género abundante en el agua de las tres Presas analizadas, así como en las tres estaciones del año. Es un alga muy común y vive en la superficie de los lagos y embalses. Varias especies provocan sabor y olor a grama o de medicinas, cuando se clora el agua.

Tetraedron: género encontrado únicamente en el agua de la Presa El Cuchillo y en la estación de primavera. Son algas que viven en la superficie de las aguas y pueden ser muy numerosas, sobre todo en agua con abundancia de sustancias nutritivas minerales, resultantes de la estabilización de desagües orgánicos y algunos géneros son frecuentes en el agua contaminada.

Ulothrix: pueden vivir en agua corriente o estancada; algunas especies viven en la superficie. Pueden provocar obstrucción de los filtros y producir olor a grama en el agua.

3.5.2 Cyanophytas:

Este grupo es uno de los más importantes, ya que de su conocimiento dependen algunas acciones para evitar problemas potenciales a la salud, estudios realizados han comprobado que la abundancia del género *Anabaena* provoca toxicidad en el agua que la contiene.

Su morfología es muy variable, ya que presenta diversidad de formas y se puede encontrar solitaria o en colonias. Debido a esto, es de gran importancia la determinación de las especies presentes en el agua de consumo humano. En este estudio se encontraron los siguientes géneros:

Merismopedia: este género se encontró en las estaciones del año de otoño e invierno únicamente y en el agua de las Presas El Cuchillo y La Boca. Es frecuente en agua contaminada o en lagunas de estabilización.

Gloeotrichia: son algas fijas o flotantes. Cuando están en grandes concentraciones producen olor de grama en el agua. Obstruyen los filtros y la especie *G. echinulata* es tóxica.

Oscillatoria: este género de algas es el que se encontró en mayor número, principalmente en el agua de la Presa El Cuchillo, en la estación del año de invierno. Cuando las muestras de agua fueron observadas en el microscopio se encontraron que la mayoría de los organismos pertenecían a este género. Varias especies producen obstrucción en los filtros y pueden llegar a producir floración en el agua, a veces con coloración roja.

Las algas de este género también producen olor a grama o bien olor a especias en el agua. Algunos géneros son indicadores de contaminación; resisten temperaturas hasta de 85°C. Algunas especies viven fijas en las paredes de reservorios; pueden provocar corrosión del hierro y producir limo. También pueden ser indicadores de desagües industriales de la fabricación del papel y contaminación por sales.

Spirulina: este género de algas viven en la superficie del agua. Pueden ser indicadoras de contaminación.

3.5.3 Ochrophyta:

El grupo Ocrofita (diatomeas) son organismos unicelulares, pueden unirse en colonias con forma de tallo o ramificadas. Lo más notable de estas plantas es la membrana que las envuelve y las protege, la cual está formada por una modificación de celulosa impregnada de una combinación silícica; en esta especie de caparazón, el frústulo, se compone de dos piezas que encajan una en la otra por sus bordes, como una caja y su tapadera.

La sílice les confiere rigidez y origina patrones de estrías, esculpidos de manera complicada, que suelen servir como rasgos para su identificación. Los restos fósiles de las conchas de las diatomeas se llaman tierra de diatomeas, que se usa como abrasivo y filtrante [38].

Navicula: dentro de este género existen muchas especies indicadoras de una variedad de condiciones; por ejemplo, algunas especies son indicadoras de agua limpia; así como otras especies son indicadoras de agua contaminada con fenol o con agua de drenajes de industrias de papel y aceite. Muchas pueden producir obstrucción en los filtros.

Fragilaria: producen olor de geranio cuando están en pequeña concentración, y de moho o tierra cuando están en mayor número.

Dinobryon: este género es uno de los más nocivos para la buena calidad del agua potable. Produce un fuerte olor y sabor a pescado o de grama, aún cuando se encuentren en pequeño número en el agua. Por la acción del cloro, produce un fuerte sabor medicinal (Clorofenoles). Algunas especies obstruyen filtros; este género se encontró únicamente en el agua de la Presa El Cuchillo, en la estación el año primavera y lo más importante es que se registró un alto nivel de abundancia.

3.5.4 Phyrrrophyta:

En esta clasificación solamente se encontró presente al género *Ceratium*.

Ceratium: género encontrado mayormente en el agua de la Presa El Cuchillo, principalmente en la estación del año de invierno; aunque se encontró presente en menor abundancia en el agua de las tres diferentes Presas analizadas. Algunas especies producen coloración marrón en el agua, gusto amargo y olor a pescado. A veces, cuando están en grandes cantidades producen olor séptico.

3.6 Algas de importancia en los procesos de Potabilización de agua superficial con filtración directa

En los procesos de potabilización de agua superficial con filtración directa en filtros rápidos a gravedad, de flujo descendente es muy común que las partículas en suspensión obturen los espacios vacíos entre los granos de los diversos lechos filtrantes.

Las aguas superficiales sometidas a un tratamiento de potabilización y que proceden de embalses generalmente contienen materiales en suspensión en cantidades muy variables durante el año, estos materiales se encuentran formados por distintos tipos de partículas con características físicas, químicas y biológicas diferentes.

En este trabajo se abordó el estudio de las algas y su importancia y abundancia en relación con el proceso de potabilización, con especial atención en el proceso de filtración rápida, ya que estos organismos son los responsables de varias anomalías en el proceso de purificación del agua en una Planta Potabilizadora, ocasionando taponamiento en los filtros [12], transmitiendo olores y sabores desagradables al agua y en algunos casos cierta coloración dependiendo del grupo o especies de algas presentes.

Las algas y otros microorganismos acuáticos también pueden desempeñar un papel útil en el proceso de purificación del agua, ya que estas forman una capa suelta y limosa en la superficie del material filtrante, que actúa por sí misma como un prefiltro, ya que las algas contenidas en esta capa, liberan oxígeno durante la fotosíntesis y el oxígeno a su vez, es utilizado por las bacterias saprófitas aerobias, hongos y protozoarios que se implantan en el filtro y en la superficie, lo que ayuda en la descomposición o estabilización de la materia orgánica presente en el agua por tratar.

Sin embargo, es importante hacer notar que cuando las diatomeas se encuentran en grandes cantidades suelen ser perjudiciales, más que benéficas ya que debido a sus características y contenido de sílice pueden acelerar el taponamiento del filtro, al adherirse al material filtrante.

Las células de *Palmella* sp se encuentran rodeadas de un material mucilaginoso, y tienden a formar copos, o una red de filamentos y también participan en este proceso *Fragilaria* sp y *Tribonema* sp, en algunos casos aceleran el taponamiento del material de los lechos filtrantes [12].

Entre las especies más importantes dentro del grupo Ochrophyta (diatomeas) se encuentran la *Asterionella*, *Fragilaria*, *Tabellaria* y *Synedra* y otras como *Navicula*, *Cyclotella* y *Cymbella* [12], especies que generalmente mueren rápidamente en la superficie del filtro, su pared de sílice subsiste y ocasiona el taponamiento en el material de los lechos filtrantes.

3.7 Comparación de los grupos y especies de algas entre el influente y efluente del agua en una Planta Potabilizadora

De acuerdo a los resultados obtenidos en los distintos análisis del agua procedente de 3 cuerpos de agua superficiales que abastecen a una Planta Potabilizadora, y de haber determinado que algunos grupos y especies de

algas, representan motivo de preocupación ambiental en el proceso de potabilización, se consideró conveniente realizar una comparación entre la concentración de organismos algales a la entrada y a la salida del agua en la Planta Potabilizadora, tomando en cuenta el tiempo de residencia del agua en la Planta durante el proceso de potabilización, es decir, el tiempo que tarda una partícula de agua en llegar desde la entrada hasta la salida en la Planta Potabilizadora.

Se tomó en cuenta el tiempo de residencia del agua en la Planta Potabilizadora y se procedió a la toma de muestra de agua cruda, o sea antes de que fuera sometida el agua a cualquier unidad de tratamiento y otra muestra a la salida del agua tratada.

La muestra de agua fue tomada en el tanque de homogenización a la entrada de la Planta Potabilizadora, donde se mezcla el agua procedente de las tres Presas. La metodología de análisis fue la misma utilizada en todas las muestras de agua, y los resultados se muestran en la Figura 8, en donde se observa que fueron detectados los grupos de algas: Cyanophyta, Chlorophyta, Phyrrophyta, Ochrophyta, Euglenophyta.

El proceso de potabilización realizado por filtración directa, con pre y post cloración logró la remoción del 100% de los grupos Phyrrophyta y Euglenophyta, la remoción de los demás organismos se encuentra: 93.02% para la Chlorophyta, 90.49% para la Cyanophyta y el 83.97% para la Ochrophyta. Los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 8, no fueron los óptimos, ni lo esperado, ya que se esperaba mayor reducción en el número de organismos presentes en el efluente después del proceso de potabilización.

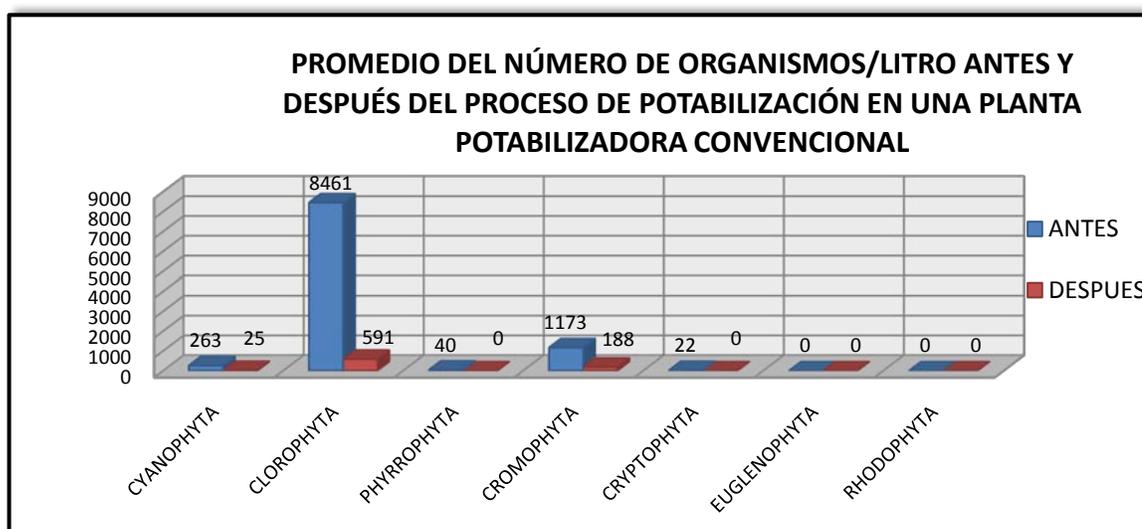


Figura 8. Promedio del número de organismos por litro, en el agua antes y después del proceso de potabilización en una Planta convencional.

Las proliferaciones masivas de algas tienen un gran impacto en las cuestiones sanitarias y económicas, por su potencialidad toxicogénica, la degradación del ambiente y el impacto económico que las mismas producen en el tratamiento de potabilización del agua, debido al deterioro y taponamiento de los filtros y además por el incremento en los costos del proceso de desinfección del agua.

En el trabajo realizado, se determinó que los grupos que se encontraron con mayor abundancia son: Chlorophyta (algas verdes), Cyanophyta (algas verdeazules) y Ochrophyta (diatomeas), las que ocasionan los principales problemas tanto en la salud humana, como en la obstrucción y taponamiento de los filtros [54,55], lo cual provoca una reducción en la eficiencia del proceso de potabilización, así como el deterioro en la calidad del agua.

En la República Mexicana, son escasos los estudios sobre los grupos de algas presentes en el agua, lo cual crea un rezago en la información de las características de estos grupos y el impacto que ocasiona su presencia y/o ausencia en el agua para los diversos usos.

Además, un hecho de gran importancia sanitaria y económica, es la potencialidad toxicogénica de algunas especies de Cyanophytas que pueden presentar proliferaciones masivas [54-61]. Este punto es relevante, ya que en el agua de la Presa El Cuchillo, en invierno, se presentó una proliferación masiva de Cyanophytas (algas verdeazules), mostrando una abundancia de 21581 Org/L y en primavera decayó a 2 Org/L.

En otras investigaciones algunos autores han determinado que las condiciones favorables para que ocurran proliferaciones masivas de Cyanophyta (algas verdeazules), son las altas temperaturas, las aguas con poco movimiento, que presentan elevadas concentraciones de fósforo y disponibilidad suficiente de nitrógeno y que proporcionen una relación N:P baja, también se puede sumar a esto la previa existencia de algas poseedoras de vesículas de gas que permitan regular su flotabilidad, favoreciendo de ese modo el aprovechamiento de las condiciones óptimas dentro de la columna de agua [54, 62, 63 y 64].

Durante el invierno, las bajas temperaturas del agua y la luz reducida, se traducen a intensidad baja de fotosíntesis, los organismos crecen rápidamente debido a que los factores nutritivos no constituyen un factor limitante; sin embargo, estos elementos se agotan y la floración desaparece; cuando los elementos nutritivos vuelven a acumularse de nuevo, las algas verdeazules nitrificantes son las que ocasionan a menudo las floraciones en otoño [65].

El desarrollo masivo de algas es normal en determinadas condiciones ambientales, cuando al mismo tiempo se cubren los requerimientos nutricionales para su crecimiento, algunos investigadores consideran además, que las proliferaciones masivas se manifiestan cuando se conjugan los siguientes factores [66]:

- a) La existencia de una población previa.
- b) La presencia de organismos con flotabilidad y vesículas de gas.
- c) La estabilidad en la columna de agua.

3.8 Control de algas

En todas las Plantas Potabilizadoras, los distintos géneros y especies de algas causan muy diversos y variados problemas en las unidades de tratamiento, dependiendo del origen del agua que se pretenda potabilizar y de las condiciones del clima, y del estado del tiempo, por lo que es necesario establecer programas de control de las algas.

El control de las algas dependerá de su densidad, y cuando la concentración de algas supera las concentraciones de 200 UPA/mL (Unidades Patrón de área/mL) [52], se deberá preparar un programa de control por medio del uso de alguicidas o de otro recurso que las elimine del agua. El número límite de algas/mL varía según la especie en cuestión y con el tamaño celular. Se deberá contar con antecedentes de calidad física y química del agua, para determinar la presencia de nutrientes en cantidades tales, que puedan ser un factor determinante de la presencia de estos organismos en una Planta Potabilizadora [53].

Los géneros encontrados y que fueron identificados en el presente trabajo, requieren métodos de control muy específicos y se deberán llevar a cabo en las temporadas que se registren los afloramientos. Es muy importante que en la aplicación de alguicidas para el control de algas, participe personal especializado, ya que en algunos casos la aplicación de los alguicidas puede alterar la calidad del agua cruda, de tal forma que se dificulte su tratamiento. Algunos alguicidas que se pueden aplicar de acuerdo al género de algas se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Alguicidas recomendados según el género de algas.

ALGUICIDAS RECOMENDADOS SEGÚN EL GÉNERO DE ALGAS		
Género de Algas	Sensibles	Resistentes
<i>Chlorella</i>	Sulfato de cobre, al DAC y a la Rosinamina acetato	Resistentes a los demás alguicidas
<i>Cormarium</i>	-----	Cloro
<i>Oocystis</i>	A casi todos los alguicidas, incluso al sulfato de cobre y al DAC	-----
<i>Pediastrum</i>	-----	Sulfato de cobre
<i>Peridinium</i>	-----	Sulfato de cobre
<i>Scenedesmus</i>	DAC.	En general a todos los alguicidas
<i>Tetraedron</i>	-----	Sulfato de cobre
<i>Ulothrix</i>	Muy sensibles al sulfato de cobre.	-----
<i>Anabaena</i>	Muy sensibles a el sulfato de cobre, al DNQ y al CMU	-----
<i>Gloeotrichia</i>	Muy sensibles al DNQ	CMU
<i>Oscillatoria</i>	Sulfato de cobre	Cloro
<i>Navicula</i>	Muy sensibles al sulfato de cobre	-----
<i>Fragilaria</i>	Muy sensibles al sulfato de cobre	-----
<i>Dinobryon</i>	Cloro y al sulfato de cobre	-----
<i>Ceratium</i>	Sensibles al sulfato de cobre y al cloro	-----

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES

Con referencia a los resultados obtenidos en los análisis efectuados a las muestras de agua, procedentes de las distintas Presas en las diferentes estaciones del año, se encontraron variaciones de acuerdo con las condiciones ambientales; ya que en el otoño la mayor floración fue de Ocrofitas (diatomeas) presentes en la Presa La Boca, presentando 4,312 Org/L; en invierno se registró un pulso de Cianofitas (algas verdeazules) de 21,581 Org/L y en primavera se encontró una notable disminución de los grupos antes analizados, con excepción de las Clorofitas (algas verdes) que son las que predominaron y, en su mayoría, las filamentosas.

Cabe mencionar que en el agua de la Presa La Boca, a diferencia de las otras dos presas analizadas, la cantidad de materia orgánica que se encontró fue debido a las descargas de agua residual doméstica y al arrastre de materia orgánica propia del uso del suelo que tiene la cuenca de la Presa La Boca.

En primavera fue notorio el crecimiento de las poblaciones de algas, principalmente del grupo de la Clorofita.

El estudio del grupo de la Clorofita desde el punto de vista sanitario es importante, ya que la presencia de éstas en determinadas concentraciones, pueden transmitir al agua un olor a pescado y a las Clorofitas se le puede considerar como indicadores de contaminación; en el agua estudiada procedente de la Presa La Boca, fue notoria la presencia de bacterias y protozoarios y micro crustáceos.

Las Cianofitas son también de interés sanitario, ya que debido a sus variaciones morfológicas de enmarañamiento de filamentos [67], puede ocasionar la la

obstrucción de los filtros durante el proceso de potabilización.

La variación en la abundancia de Cianofitas entre el agua de las diferentes Presas fue notoria en invierno. En la Presa El Cuchillo durante la estación de invierno se encontró una gran cantidad de Cianofitas, por lo que desde el punto de vista sanitario, es importante debido a que estas pueden representar un riesgo para la salud, obstrucción en los filtros de la Planta Potabilizadora y en determinadas concentraciones de este grupo en el agua, pueden producir una coloración rojiza en el agua.

Otros de los géneros encontrados causantes de obstrucción de los filtros son *Chlorella*, *Dinobryon*, *Navicula*, *Peridum*, *Ceratium*, *Cosmarium*, *Crucigenia*, *Fragilaria*, *Merismopedia*, *Pediastrum*, *Scenedesmus*, *Staurastrum*, *Tetraedron* son géneros encontrados que regularmente se encuentran en agua contaminada, producen olor y color, característico, de acuerdo con su género. Éstas son importantes en el proceso de potabilización mas no son las causantes principales de los problemas en una Planta Potabilizadora.

El género *Dinobryon*, que se encontró únicamente en la Presa El Cuchillo y en la estación del año de primavera; es uno de los géneros más nocivos para la calidad del agua potable.

Los géneros de *Crucigenia*, *Scenedesmus*, *Spirulina*, *Staurastrum* y *Ulothrix* viven principalmente en agua superficial, por lo que puede suponerse que es más viable su captación por la obra de toma; así podría explicarse la abundancia de estos géneros en la muestra de agua; al mismo tiempo pueden encontrarse presentes por el efecto de la turbulencia o los movimientos del agua hacia arriba de la corriente, ocasionados por diferencias de temperatura para mantenerse sobre la superficie donde la fotosíntesis es más eficaz.

En el agua de la Presa El Cuchillo se encontraron los géneros *Anabaena*,

Oscillatoria y *Dinobryon*, pertenecientes al grupo Cianofitas (algas verdeazules), que presentan una gran importancia para la salud debido a su toxicidad, ya que los dos géneros mencionados son tóxicos y causan problemas en la sinapsis nerviosa y en la piel. Cuando este grupo de algas es detectado en cuerpos de agua usados para el consumo humano, y que las técnicas que son utilizadas normalmente para su eliminación no son suficientes, se deberá completar el tratamiento mediante el uso de carbón activado o por la utilización de ozono, aparejado esto último con velocidades de filtración más lentas.

En lo referente al proceso de potabilización, se encontró que la disminución de los grupos de algas es evidente; aunque, dado el proceso, se esperaban valores aproximados superiores al 90% para todos los grupos. Se encontró que únicamente los grupos de Dinofitas (algas pardas) y Euglenofita (euglena) llegaron al 100% de su eliminación.

El grupo Cianofita (algas verdeazules) presentó un porcentaje del 90% de retención y/o eliminación de algas después del proceso de potabilización; al mismo tiempo el grupo de Clorofita (algas verdes) obtuvo el 93%.

En el caso particular de la Ocrofita (diatomeas) sólo se eliminó el 83%, debido posiblemente a irregularidades en los lechos filtrantes o problemas de operación de la unidad de filtración durante el lavado.

El aporte científico de esta investigación se resume en los siguientes párrafos:

- La caracterización de los diversos grupos de algas detectadas en el presente trabajo, constituye un aporte al conocimiento de estos organismos, ya que en el Estado de Nuevo León, de acuerdo a la información bibliográfica consultada, no existen registros de algas y en la República Mexicana existen registros pero solamente de algas continentales.

- La información obtenida en esta investigación puede ser muy útil para el estudio de las causas de obstrucción de filtros, anomalías en otras unidades de la Planta Potabilizadora y de alteraciones en las características físicas y químicas del agua tratada.

CAPÍTULO 5

5. RECOMENDACIONES

- Es recomendable la continuación de estudios complementarios sobre el tema, que permitan identificar y determinar con más detalle la variación anual de las poblaciones de las algas presentes en las fuentes de agua superficial.
- Se sugiere que en investigaciones futuras se consideren los muestreos en las 4 estaciones del año, con la finalidad de contar con información de un ciclo anual y determinar las variaciones por estación.
- Para un caso particular de estudio de algas, que contemple el estudio de las mismas en la fuente superficial de agua y en la Planta Potabilizadora, es recomendable que se complemente la información de campo relativa a las condiciones del tiempo tales como temperatura ambiente, temperatura del agua, nubosidad, y sobre todo información histórica de la calidad físico química de la fuente en estudio.
- Recopilación de información sobre los usos del suelo de la cuenca correspondiente al cuerpo de agua en estudio, para conocer los posibles aportes de materia orgánica procedente de distintas fuentes, así como de las descargas de aguas residuales de origen doméstico, industrial o de drenajes agrícolas.
- De ser necesario el control de algas en la fuente de suministro de agua o en los diversos pasos en el proceso de potabilización, se deberán utilizar alguicidas autorizados por las Dependencias competentes, y su aplicación deberá ser efectuada por personal especializado.

REFERENCIAS

- [1]. Cosgrove, W.J., y F.R. Rijsberman. (2000). *World Water Vision-Making Water Everybody's Business*, World Water Council, La Haya, Holanda.
- [2]. Organización Mundial de la Salud. (1995). *Guías para la calidad del agua potable*, Ginebra, 1, 195.
- [3]. UNESCO. (2000). http://www.unesco.org/water/water_links/
- [4]. American Water Works Association y American Society of Civil Engineers. (1998). *Water Treatment Plant Design*, McGraw-Hill, Nueva York.
- [5]. Galvis, G. y J. Visscher. (1989). *Proyecto Integrado de Investigación y Demostración en Filtración Lenta en Arena: Informe Final, Versión Resumida*. Colombia. Cali, CINARA. 150.
- [6]. Magara, Y. y S. Kunikane. (1986, 1990). “Cost analysis of the adverse effect of algal growth in waterbodies on drinking water supply.” *Ecol. Mod-ell.*, 31, 303–313.
- [7]. Di Bernado, L. (1991). *Congreso Brasileiro de Engenharia Sanitaria e Ambiental: Estudo qualitativo e quantitativo da comunidade biótica presente em um sistema de prefiltro e filtro lento para tratamento de aguas de abastecimento*. Brasil. Sao Carlos: Escola de Engenharia de Sao Carlos, 150175.
- [8]. Arboleda J. (2000). *Teoría y Práctica de la Purificación del agua*. Tomo 2. Editorial McGraw-Hill Interamericana, S.A. Bogotá Colombia. 734 – 769.
- [9]. Lampet, W. y U. Sommer. (1998). *Limnoecology. The ecology of lakes and streams*. Oxford Univ. Press. 382.
- [10]. Margalef, R. (1983). *Limnología*. Ed. Omega, Barcelona. 1010.
- [11]. Sánchez, L., J. Latorre y G. Galvis. (1999). *Comportamiento de la Población de algas y Protozoos después de la Limpieza de la Biomembrana en un Filtro Lento de Arena: XX Congreso de Brasileiro de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Brasil. Rio de Janeiro.
- [12]. Palmer, M. (1955). *Algas en Abastecimiento de Agua: Manual Ilustrado*. EEUU. Ohio: Cincinnati, Ed. Interamericana, 91.
- [13]. Di Bernado, L. (1993). *Congreso Brasileiro de Métodos y Teorías de tratamiento de agua*. Brasil. Rio de Janeiro: Asociación Brasileira de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 1498.

- [14]. Ortega, M., J.; Godínez y G. Garduño. (1995). Ficología de México Algas Continentales. AGT Editor, S.A. México.
- [15]. Tisdale, E.S. (1931). Epidemic of intestinal disorders in Charleston, W. Va., occurring simultaneously with unprecedented water supply conditions. Am. J. Public Health 21, 198-200. zitiert nach: Sykora, J.L. & G. Keleti: Cyanobacteria and endotoxins in drinking water supplies, in Carmichael, W. (ed.) 1981: The Water Environment - Algal Toxins and Health. Plenum Press, New York and London. 49.
- [16]. Schwimmer, M. y D. Schwimmer. (1968). Medical aspects of phycology. In: Jackson, D.F. (ed.): Algae, Man and the Environment. Syracuse University Press, Syracuse, New York, 279-358.
- [17]. Hindman, S.H., M.S. Favero. L.A. Carson., N.J. Petersen., L.B. Schonberger, y J.T. Solano. (1975). Pyrogenic reactions during haemodialysis caused by extramural endotoxin. Lancet 2, 732-734.
- [18]. Falconer, I. (1993). Algal Toxins in Seafood and Drinking Water. Academic Press, London, San Diego, New York, Boston, Sydney, Tokyo, Toronto. ISBN 0-12-247990-4. 224.
- [19]. Falconer, I.R. (1994). Health problems from exposure to Cyanobacteria and proposed safety guidelines for drinking and recreational water, 3-10. In: Codd, G.A., Jefferies, T.M., Keevil, C.W. and Potter, E. (eds.): Detection Methods for Cyanobacterial Toxins. The Royal Society of Chemistry. ISBN 0-85186-961-0, 191.
- [20]. Falconer, I.R., A.M. Beresford., M.T.C. Runnegar. (1983). Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa*. Med. J. Aust. 1, 511-514.
- [21]. Carmichael, W., C. Hones., N. Mahmood., W. Theiss. (1985). Algal toxins and water-based disease. Critical Rev. Environm. Contr. 15, 275-313.
- [22]. Yu, S.-Z. (1995). Primary prevention of hepatocellular carcinoma. J. Gastroenterol. Hepatol. 10, 674-682.
- [23]. Cronberg, G., H. Annadotter., L.A. Lawton., H.B. Hansson., U. Göthe., O.M. Skulberg. (1997). A large outbreak of gastroenteritis associated with the toxic cyanobacterium *Planktothrix (Oscillatoria) agardhii*. Proceedings of the 1st international symposium on toxic Cyanobacteria. Phycologia.
- [24]. Martínez, S., J. Verde., L. Villarreal., M. Gózales. (1992). Métodos para el control de algas en abastecimientos de agua. Publicaciones Biológicas F.C.B. UANL. Volumen 6, Número 1. 87.

- [25]. Shireman, J.V. (1982). Cost analysis of aquatic weed control; fish versus chemicals in a Florida Lake. *Progr. Of Fish Culture* 44:199-200.
- [26]. Gratteau, J.C. (1970). Algicidas potenciales para el control de algas. *Scratorn Gillette "Water and Sewage Works"* 1:23.
- [27]. Gupta, O.P. (1979). *Aquatic weeds; Their Menace and control*; Today & Tomorrow's Printers & Publishers 24-B/5, Desh Bandhu Gupta Road, New Delhi-110005.
- [28]. Furuhata. (1991). Algucides for lawns containing copper compounds and other agents In: 5-A Agrochemicals. Vol 115, 1991. 305.
- [29]. Nyström A., A. Grimvall., C. Krantz-Rülcker., R. Sävenhed., K. Akerstrand. (1992). Drinking Water Off-Flavor caused by 2, 4, 6-trichloroanisole. *Water Sci. Technol.* 2 241-249.
- [30]. Jensen S.E., C.L. Anders., L.J. Goatcher., T. Perley., S. Kenefick ., S.E. Hruday. (1994) Actinomycetes as a factor in odor problems affecting drinking water from the North Saskatchewan River. *Water Res.* 6 1393-1401.
- [31]. Codd GA. (1995). Cyanobacterial toxins: Occurrence, properties and biological significance. *Water Sci. Technol.* 32 149-156.
- [32]. Sivonen K. (1996) Cyanobacterial toxins and toxins production. *Phycol.* 35 (6) 12-24.
- [33]. Rose J.B., R. Atlas., C. Gerba., T. M. Gilchris., M. Lechevallier., M. Sobsey., M. Yates.
- [34]. EPA (1998). Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. *Phycol.* 34: 405-415.
- [35]. Hallegraeff, G. M. A. (1993). Review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia* 32: 79-99.
- [36]. Billings, W. H. (1981). Water-associated human illnesses northeast Pennsylvania and its suspected association with bluegreen algal blooms. In *The Water Environment: Algal Toxins and Health*, ed. by W. W. Carmichael, 243-255. New York: Plenum Press.
- [37]. Galey, F. D., V. R., W. Beasley., G. Carmichael., S.B. Kleppe., Hooser, and W. M. Haschek. (1987). (Blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) hepatotoxicosis in dairy cows. *American Journal of Veterinary Research* 44: 1415-1420.

- [38]. Mahmood, N. A., W. W. Carmichael, and D. Pfahler. (1988). Acticholinesterase poisonings in dogs from a cyanobacterial (blue-green algae) bloom dominated by *Anabaena flos-aquae*. *American Journal of Veterinary Research* 49: 500-503.
- [39]. Carmichael, W. W., and I. R. Falconer. (1993). Disease related to freshwater blue-green algal toxins, and control measures. In *Algal toxins in seafood and drinking water*, ed. by I. R. Falconer, 187-209. San Diego, CA: Academic Press,
- [40]. Henriksen, P., W. W. Carmichael, J. An, J., and M. Jvind. (1997). Detection of an anatoxin-a(s)-like anticholinesterase in natural blooms and cultures of cyanobacteria/blue-green algae from Danish lakes and in the stomach contents of poisoned birds. *Toxicon* 35: 901-913.
- [41]. Saker, M. L., A. D. Thomas, and J. H. Norton. (1999). Cattle mortality attributed to the toxic cyanobacterium *Cylindrospermopsis raciborskii* in an outback region of North Queensland. *Environmental Toxicology* 14: 179-182.
- [42]. Carmichael, W. W., S. M. Azevedo, J. S. An, R. J. Molica, W. M. Jochimsen, S. Lau, K. L. Rinehart, G. R. Shaw, and G. K. Eaglesham. (2001). Human fatalities from cyanobacteria: Chemical and biological evidence for cyanotoxins. *Environmental Health Perspectives* 109: 663-668.
- [43]. Annadotter, H., G. Cronberg, R. Nystrand, And R. Rylander. (2005). Endotoxins from cyanobacteria and gram-negative bacteria as the cause of an acute influenza-like reactions after inhalation of aerosols. *EcoHealth* 2: 209-221.
- [44]. Penalzoza, R., M. Rojas, I. Vila, and F. Zambrano. (1990). Toxicity of a soluble peptide from *Microcystis* sp. to zooplankton and fish. *Freshwater Biology* 24: 223-240.
- [45]. Lindholm, T., P. Öhman., K. Kurki-Helasma., B. Kincaid., and J. Meriluoto. (1999). Toxic algae and fish mortality in a brackish-water lake in Åland, SW Finland. *Hydrobiologia* 397: 109-120.
- [46]. Birrenkott, A. H., S. B. Wilde., J. J. Hains., J. R. Fischer., T. M. Murphy., C. P. Hope., P. G. Parnell., and W. W. Bowerman. (2004). Establishing a food-chain link between aquatic plant material and avian vaculoar myelinopathy in mallards. *Journal of Wildlife Diseases* 40: 485-492.
- [47]. Wilde, S. B., T. M. Murphy., C. P. Hope., S. K. Habrun., J. Kempton., A. Birrenkott., F. Wiley., W. W. Bowerman., and A. J. Lewitus. (2005). Avian vacuolar myelinopathy linked to exotic aquatic plants and a novel cyanobacterial species. *Environmental Toxicology* 20: 348-353.

- [48]. Casanova, M. T., M. D. Buruch., M. A. Brock., and P. M. Bond. (1999). Does toxic *Microcystis aeruginosa* affect aquatic plant establishment Environmental Toxicology 14: 97-109.
- [49]. Oberemm, A., J. Becker., G. A. Codd., and C. Steinberg. (1998). Effects of cyanobacterial toxins and aqueous crude extracts of cyanobacteria on the development of fish and amphibians. Environmental Toxicology 14: 77-88.
- [50]. Ridgway H.F., and B.F. Olson. (1981) Scanning electron microscope evidence for bacterial colonization of a drinking-water distribution system. Appl. Environ. Microbiol. 41 274-287.
- [51]. Lopez, C.B., E.B. Jewett., Q. Dortch., B.T. Walton., H.K. Hudnell. (2008). Scientific Assessment of Freshwater Harmful Algal Blooms. Interagency Working Group on Harmful Algal Blooms, Hypoxia, and Human Health of the Joint Subcommittee on Ocean Science and Technology. Washington, DC. 3: 23.
- [52]. Di Bernardo, L.. (1999). Plantas de Potabilización de Filtración directa. III Curso Internacional de Plantas de Potabilización, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Santafé de Bogota, DC. 10.
- [53]. Ramírez, J. (2000). Fitoplancton en Agua Dulce, Primera edición. Colombia. Medellín, Ed. Universidad de Antioquia.
- [54]. Reynolds, C.S. (1971). The ecology of the planktonic blue-green algae in the North Shorpsire meres. Field Studies 3:409-432.
- [55]. Reynolds, C.S. (1987). Cyanobacterial. water-blooms. Adv. Bot. Res. 13:67-143.
- [56]. Gorham, P.R. y W.W. Carmichael. (1988). Hazards of freshwater blue-green algae (Cyanobacteria). En: Lembe, C, A, y J. R. Waaland (eds.). Algae and Human Affairs. Cambridge Univ. Press. :403-431
- [57]. Carmichael, W.W. (1994). The toxins of cyanobacteria. Sci. Am. Jan. 64-72.
- [58]. Codd, G. A. (1994). Blue-green algal toxins: water-borne hazards to health. En: Golding A.M.B., Noah N. y Stanwell-Smith R. (eds.) Water and Health. Inglaterra: 271-278.
- [59]. Christoffersen, K. (1996). Ecological implications of cyanobacterial toxins in aquatic food webs. Phycologia 35 (6) Suppl. 42-50.
- [60]. Falconer, I.R. (1996). Potencial impact on human health of toxic cyanobacteria. Phycologia 35 (6) Suppl. :74-79. y A.R. Humpage. 1996. Tumor

promotion by cyanobacterial toxins. *Phycologia* 35 (6) Suppl. 5.

[61]. Moestrup, O. (1996). Toxic blue-green algae (Cyanobacteria). *Phycologia* 35 (6) Suppl. 189-197.

[62]. Walsby A. E., C.S. Reynolds., R.L. Oliver. and J. Kromkamp. (1989). The role of gas vacuoles and carbohydrate content in the buoyancy and vertical distribution of *Anabaena minutissima* in Lake Rotongaio, New Zealand. *Ergeb. Limnol.* 32 :1-25.

[63]. Steinberg, C.E.W., y H.M. Hartman. (1988). Planktonic bloom forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers. *Freshwater Biol.* 20 :279 –287.

[64]. Steinberg, C.E.W. y E. Gruhl. (1992). Physical measures to inhibit planktonic cyanobacteria. En: *Eutrophication: Research and applications to water supply*. Sutcliffe, D.W. y J. Lones (Eds.) 163-184.

[65]. Odum, P. (1972). *Ecología*. Tercera Edición. Nueva Editorial Interamericana, S.A. de C.V. México D.F. 339, 340.

[66]. Reynolds, C.S., y A.E. Walsby. (1975). Water-blooms. *Biological Reviews* 50:437-481.

[67]. Oliver, R.L., y G.G. Ganf. (2000). Freshwater blooms. En: Whitton, B. A y M. Potts (eds). *The Ecology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers:149-194.

[68]. Izco, J., Barreño, E., Burgués, M., Costa, M., Devesa, J., Fernández, F., Gallardo, T., Limona X., Salvo, E., Talavera S., Valdés, B. (2004). *Botánica* 2da. Edición. Editorial McGraw-Hill Interamericana. Aravaca. Madrid.

[69]. Witford, L.A., Shumacher, G.J. (1973). *A Manual of Fresh-Water Algae*. Published by Sparks Press, Raleigh, N.C.

[70]. Ortheaga, M. M. (1984). *Catálogo de Algas Continentales Recientes de México*. Primera Edición. Universidad Autónoma de México. Ciudad Universitaria. México, D.F.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotografía 26. Toma de muestras de agua en una de las líneas de conducción.



Fotografía 27. Toma de muestras de agua de la presa El Cuchillo.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotografía 28. Toma de muestras de agua de la presa Cerro Prieto.

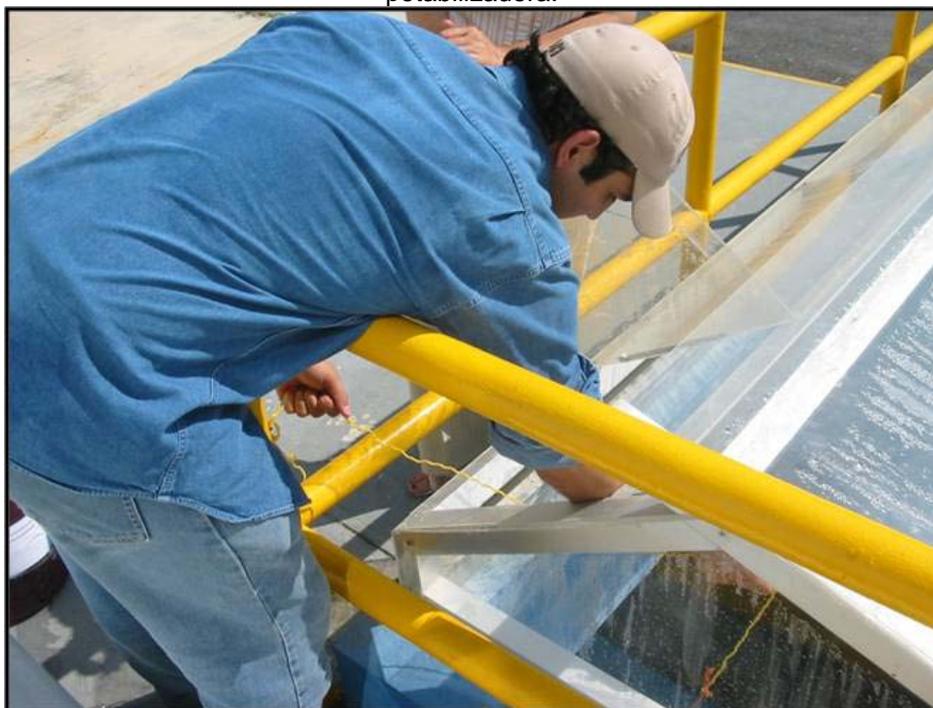


Fotografía 29. Toma de muestras de agua de la presa de la Boca.

ANEXO FOTOGRÁFICO



Fotografía 30. Toma de muestras de agua en el tanque de recepción de la planta potabilizadora.



Fotografía 31. Toma de muestras de agua al finalizar el proceso de potabilización.
