

ÍNDICE

1.Introducción

2.Algas verdes: estudio de Chlorella vulgaris

3.Algas pardas: estudio de Padina gymnospora

4.Algas verdeazuladas

- Filtros biológicos
- Bioabsorción
- Factores ambientales que influyen en la toxicidad de los metales
- Mecanismo de tolerancia

5.Procedencia de los metales pesados

6.Mecanismos de bioabsorción de las algas

7.Estructura y composición de algas hiperacumuladoras

8.Elementos traza en algas

- Yodo
- Bromo
- Arsénico
- Uranio

Otros metales

INTRODUCCIÓN

Hoy en día las algas están adquiriendo una gran popularidad por sus numerosos usos, ya sea en la alimentación, los cosméticos, los productos de baño, etc. aunque algunas de ellas se llevan utilizando desde tiempos remotos. También tienen aplicaciones medioambientales y pueden actuar como bioindicadores, de ahí que se realicen estudios acerca de su número de individuos y de la variedad de especies en un determinado medio. No obstante, a lo largo de este trabajo nos centraremos en otra característica que puede ayudarnos a paliar ciertos problemas del medio físico: su capacidad para acumular metales pesados. Se trata de un campo de la botánica que está siendo investigado en la actualidad y por tanto aún no hay estudios concluyentes, muchos experimentos realizados muestran aparentes contradicciones ya que todavía no se conocen todos los factores que intervienen en la mayor o menor acumulación de metales.

Un elemento pesado se caracteriza por ser un elemento metálico con una densidad superior a cinco. Aunque en este grupo se incluyen elementos esenciales para el crecimiento, reproducción y/o supervivencia de los organismos vivos, otros muchos pueden causar graves problemas. La Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos(EPA) considera que el berilio y el mercurio son dos de elementos más peligrosos, lo que quiere decir que son muy perjudiciales a pequeñas cantidades. Otros nueve metales han sido definidos como posibles elementos peligrosos, lo cual significa que su peligrosidad es potencial, son el cadmio, el cobre, el plomo, el manganeso, el níquel, el zinc, el vanadio y el estaño.

Los metales pesados poseen una gran capacidad para unirse con muy diversos tipos de moléculas orgánicas. Los procesos de bioacumulación son debidos, básicamente a la imposibilidad, por parte del organismo afectado, de mantener los niveles necesarios de excreción del contaminante, por lo que sufre una retención en el interior del mismo. El proceso se agrava a lo largo de las cadenas tróficas, debido a que los niveles de incorporación sufren un fuerte incremento a lo largo de sus sucesivos eslabones. Hay numerosos ejemplos de enfermedades, ya que según se ha comprobado, incluso a niveles bajos de metales aparecen efectos muy perjudiciales y crónicos de los que en numerosos casos no se tenía constancia. De hecho pueden citarse casos como el Itai-Itai, asociado a la contaminación minera que libera cromo al medio, o el Mimanta provocado por el mercurio y que acarrea retraso mental en los embriones, deformidad de las extremidades, perturbaciones en el crecimiento... Además otros metales pesados tales como el arsénico ocasionan gastroenteritis, debilidad y una rápida muerte si no se diagnostica a tiempo, el selenio puede originar trastornos en el aparato circulatorio y en los músculos, el plomo puede llevar consigo hipertensión, anemias, depresiones e incluso la muerte. Muchos de los males que ocasionan se debe a su capacidad para reaccionar con infinidad de sustancias entre las que destacan los grupos sulfhidrilos y los radicales amino, fosfato, carboxilo, hidroxilo... También afectan a los ácidos nucleicos dando lugar a mutaciones genéticas, alteraciones en la síntesis y reparación de ácidos nucleicos...

Ahora bien ¿cómo llegan todas estas sustancias al medio?. Éste será uno de los temas que trataremos brevemente a lo largo de nuestro trabajo, aunque en líneas generales puede afirmarse que la mayor fuente de metales es la industria y la minería.

De todos los trastornos que pueden causar en la flora y fauna se deriva la necesidad de eliminar en la medida de lo posible los metales de las aguas y el suelo. Para ello hay una serie de procedimientos químicos que pueden utilizarse, pero son demasiado lentos y costosos por lo que recientemente comienza a utilizarse una técnica más económica y que no genera residuos peligrosos: la fitorremediación basada en la propiedad de las plantas de ser hiperacumuladores de ciertos metales. El coste medio de este tratamiento, en el caso del cobre a 1000 ppm, oscila entre uno y cinco dólares por cada libra de metal extraído mientras que si se realiza por precipitación el proceso asciende a cuarenta dólares por la misma cantidad de metal. Por tanto se deduce que el uso de plantas puede ser un método barato y eficaz que no genera los lodos ricos en metales pesados muy difíciles de tratar y se espera que este sistema sea una tecnología competitiva en lo que a costes se refiere, para eliminar cantidades bajas pero significativas de metales pesados como el cromo, el zinc o el plomo, teniendo en cuenta además una importante ventaja y es que las células de las algas muertas tienen, la misma eficacia que las algas vivas y están actuando constantemente en la descontaminación. Todo esto no quiere decir que el empleo de algas sea el único método a emplear para eliminar ciertos metales ya que la fitorremediación es compatible con otros métodos, lo cual resulta muy beneficioso para algunas zonas donde una planta hiperacumuladora podría tardar entre trece y dieciséis años en descontaminar una región, y es muy difícil que lograse eliminar el 100% de los residuos ya que la velocidad de reacción decrece al disminuir la concentración de metales.

A pesar de todos los beneficios potenciales de esta tecnología también debe citarse un inconveniente bastante importante, y es que la planta admite una concentración máxima de metales a partir de la cual ya no es capaz de desarrollarse normalmente. Sin embargo se trata de un organismo bastante tolerante como se ve demostrado en los estudios realizados en las costas del norte de Chile tras un vertido de cobre. La contaminación había provocado la desaparición de la mayoría de las especies con excepción de algunas algas entre las que se encontraba, la macroalga verde *Enteromorpha compressa*.

También se están realizando investigaciones para aislar los genes implicados en la acumulación de metales y poder transferir esos genes a otros organismos, es decir que se crearían organismos transgénicos. Sin embargo esta técnica necesita una mayor investigación y de momento no es un método factible aunque podría serlo en el futuro.

En esta exposición acerca de la acumulación de metales en algas abordaremos distintos experimentos

realizados con cianobacterias, algas pardas y algas verdes teniendo en cuenta que los estudios aún son escasos. Además trataremos algunas características de los metales más contaminantes y el uso de la fitorremediación con algas para paliar los efectos.

ALGAS VERDES: estudio de *Chlorella vulgaris*

El género *Chlorella* es un alga verde que, debido a su capacidad de fotosintetizar (le permite carecer de un aporte exógeno de materia orgánica) y a su situación en las cadenas tróficas como productor primario, le convierte en un organismo ideal para experimentar su capacidad de acumular metales. Se trata de un alga esférica, unicelular, eucariota y que presenta clorofila a y b. Vive en medios marinos, en el agua dulce e incluso en suelos encharcados. Además es frecuente que aparezca en simbiosis con esponjas, hidra y paramecio.

Se ha demostrado que es capaz de absorber grandes cantidades de metales, principalmente Cr^{4+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} y Hg^{2+} . El proceso que realiza para incorporar los metales a sus células consiste, a grandes rasgos, en dos etapas. La primera de ellas, denominada biosorción, transcurre en muy poco tiempo y es similar tanto en la pared celular como en toda la célula, es decir que ambas estructuras introducen, en un tiempo similar, cadmio, plomo y cobre, mediante un intercambio de iones en el que el Na, Mg y Ca resultan desplazados a favor de los metales pesados. A continuación el metal puede unirse a distintos grupos funcionales como aminas, alcoholes, fosfatos, hidroxilos... Uno de los factores que contribuyen a la eficacia de este sistema es la composición de la pared celular, que posee una mezcla compleja de azúcares, glucosamina, proteínas y ácido urónico.

La segunda fase, llamada bioacumulación requiere un período de tiempo mayor y a diferencia de la primera etapa, se trata de un proceso activo en el que se piensa que interviene el metabolismo de la célula. Por esta razón, aparecen diferencias significativas entre la cantidad de metales acumulados por las diferentes partes de la célula que puede ser debido a las biomoléculas presentes en la membrana que pueden unirse a los metales.

Hay distintos métodos para emplear las algas con el fin de reducir la concentración de metales pesados en el medio, uno de ellos es la utilización de algas fijadas a un sustrato, de esta manera se soluciona un grave inconveniente ya que resultaba extremadamente complicado recuperar las algas microscópicas, menores de $10\mu\text{m}$ del vertido contaminante. Este procedimiento reporta además una serie de ventajas: ya no hay necesidad de destruir las células del alga puesto que se pueden emplear distintos métodos de manipulación (modificación del pH, adición de sustancias especiales que muestren afinidad por los metales...) para que el alga libere los metales que ha acumulado y por tanto disminuye el riesgo de que le resulten tóxicos los metales. Esto es posible porque las algas se disponen agrupadas en columnas por lo que además se consigue una reducción de espacio.

También se encuentran disponibles una serie de procedimientos para incrementar la eficacia de las algas como acumuladores de metales. Entre ellos cabe citar los métodos usados, antes de poner en contacto el alga con el medio contaminado de cobre: autoclave a 121°C durante quince minutos, calentar en agua a 80°C durante hora, calentar en seco 72 horas o congelar la planta en seco. En general los estudios realizados coinciden en la eficacia de la autoclave y del calentamiento en agua a 80°C , de hecho si un alga normal es capaz de absorber el 75% del total de cobre en un determinado medio, un alga pretratada puede llegar a captar el 99%. Sin embargo los resultados no son del todo concluyentes ya que aparecen contradicciones entre la cantidad de metales absorbidos por las algas tratadas con distintos procedimientos, así por ejemplo no hay acuerdo entre la cantidad de cobre recogida por las algas congeladas en seco y las que fueron calentadas. Además aunque la autoclave sea el método más eficiente, se ha comprobado que las algas modificadas con este sistema tienen un menor peso seco debido seguramente a que muchas de las células han podido lisis durante el proceso. También se cree que no es la misma la capacidad de absorción de metales en células lisadas o vivas, de hecho es bastante probable que la pared de la célula muerta haya sufrido modificaciones y actúe mejor como ligando para los cationes, debido a las modificaciones que ha sufrido la permeabilidad de la membrana. Hay que tener

en cuenta un problema potencial añadido cuando lisa una célula, y es la posible contaminación por bacterias del medio donde se encuentran en tratamiento las algas, ya que al morir una célula pueden desprenderse productos celulares que atraigan más a las bacterias.

No solo influyen los pretratamientos en la posibilidad de captar cobre, mercurio y demás metales sino que hay que considerar otros factores como la densidad celular. De hecho a una alta densidad (5×10^8 células mL⁻¹) las algas que se mueven libremente por el medio retienen una mayor cantidad de metales que las algas fijas a un sustrato, seguramente debido a la presencia de más superficie de absorción. No obstante lo inverso ocurre al considerar algas libres con una baja densidad (2×10^7 células mL⁻¹), en este caso sólo es capaz de acumular el 5% del cobre presente en el medio.

Tras hacer este experimento, se midió la cantidad de cobre acumulado en la matriz de la célula y en la biomasa total de la misma obteniéndose como conclusión, que es la matriz de alginatos la estructura que más concentración de metales puede tener en su interior. Además se ha demostrado mediante estudios microscópicos que las células de algas inmovilizadas en un sustrato, tras varias dosis de cobre tienen la misma apariencia externa pero son incapaces de crecer ya que pueden haber sufrido la toxicidad del cobre, este hecho se manifiesta también en que el alga se ve incapacitada para retener la misma cantidad de metales que en etapas anteriores.

Hasta ahora se ha analizado la manera en que las algas absorben los metales y alguna de las maneras utilizadas para aumentar su capacidad de descontaminación de ciertos medios, pero aún no se ha considerado la manera de retirar esos metales pesados de las algas para su posterior tratamiento y reciclaje. En general un alga comienza a expulsar los metales a pH bastante ácido, inferior a 3 y es un hecho probado el que a pH 1,5 ó 2 el alga ha liberado todo el metal que tenía en su estructura. Obviamente para conseguir esos niveles de pH, es necesario añadir una substancia que aporte gran cantidad de protones, lo cual puede llevar consigo efectos irreversibles en la planta aunque en los experimentos realizados con ácido clorhídrico 0,1M no resultaron dañadas las células. La ventaja que reporta esta propiedad se basa fundamentalmente en la posibilidad de utilizar las mismas células de algas en varios tratamientos (hasta diez en el caso de las algas fijas a un sustrato, capaces de absorber cobre y níquel). En principio, aunque es un hecho que se encuentra muy condicionado por la especie de alga que se considere, a partir de pH 3 la planta comenzaría a absorber metales.

Por tanto se puede concluir que la especie *Chlorella vulgaris* cuenta con una gran capacidad para acumular metales pesados aunque esta característica puede estar condicionada por factores como la densidad de las células, el tratamiento previo de las mismas o el pH del medio. Sin embargo no son las algas los únicos organismos capaces de incorporar distintos metales a su estructura, así por ejemplo especies de hongos como *Rhizopus* o *Absidia* son consideradas como excelentes bioabsorbentes de plomo, cobre, cadmio, zinc y uranio.

ALGAS PARDAS: estudio de *Padina gymnospora*

Se han realizado estudios acerca de la acumulación de elementos traza en la bahía de Sepetiba en Brasil donde en los últimos treinta años se han incrementado las actividades industriales con la consiguiente contaminación de las aguas próximas. Es un área situada a 60 Km de Río de Janeiro gravemente dañada por el turismo, la pesca... además es muy probable que se instale un complejo petroquímico en las cercanías. Por esta razón era muy conveniente realizar un estudio acerca de las especies de flora y fauna que habitan en ese ecosistema.

Las nueve especies de algas tomadas eran: 2 Chlorophyta: *Codium decorticatum* y *Ulva fasciata*; 3 Phaeophyta: *Padina gymnospora*, *Sargassum stenophyllum* y *Spatoglossum schroederi* y 4 Rhodophyta: *Gracilaria* sp, *Spyridia clavata*, *Acanthophora spicifera* y *Hypnea* sp. Además se emplearon otras dos especies de algas (*Fucus vesiculosus* y *Ascophyllum nodosum*) como indicadores de la contaminación en el mar.

El alga parda, *Padina gymnospora*, que da título a este apartado del tema fue la especie que más cantidad de

zinc y cadmio presentaba en su estructura, de hecho aparecían valores en torno a $307,0 \pm 63,5 \mu\text{g g}^{-1}$ peso seco para el zinc y $1,32 \pm 0,46 \mu\text{g g}^{-1}$ peso seco para el cobre. No obstante la especie *Sptaglossum schroederi* presentaba la mayor concentración de cobre ($6,5 \pm 2,0 \mu\text{g g}^{-1}$ peso seco).

En los experimentos de laboratorio acerca de la velocidad de incorporación del zinc a la estructura del alga *Padina gymnospora*, se descubrieron dos etapas diferentes: la primera de ellas que dura aproximadamente cuatro horas implica una absorción rápida del metal mientras que en la segunda fase el proceso es mucho más lento y consistiría en la distribución y asimilación del zinc por las células del alga. Durante todo el tiempo que duró el estudio (nueve días) no se alcanzó un valor fijo de zinc en las células, y tampoco se observó que el alga liberase una cantidad apreciable del zinc que previamente había absorbido, lo cual demuestra que este metal presenta una gran afinidad por los ligandos orgánicos.

De estos resultados se deriva que cuanto mayor cantidad de zinc haya en el medio más cantidad de este metal absorberán las algas, se ha visto confirmado que la incorporación de zinc a las algas aumenta linealmente con el logaritmo de la concentración de zinc en el agua. Seguramente el cadmio sigue los mismos mecanismos de propagación por el medio que el zinc, ya que presentan una correlación relativamente alta ($r = 0,87$) que indica un grado de asociación entre las dos variables bastante elevado, es probable que ambos metales procedan de la misma fuente contaminante. La facilidad con que el alga puede absorber determinados metales depende de muchos factores entre los que se encuentra el pH, la salinidad, la luz y la presencia de materia orgánica. En esta zona, donde las precipitaciones son muy abundantes, el condicionante más importante es la materia orgánica porque metales como el zinc y el cadmio se unen débilmente a estas partículas en suspensión, sin embargo el plomo y el cromo se adhieren fuertemente a ellas por lo que resultan más difíciles de capturar por las algas, debido a esta circunstancia se ha observado que la concentración de zinc y cadmio, en la bahía de Sepetiba, es mayor. Aún no se tienen conocimientos precisos acerca de cómo influye la presencia de varios metales contaminantes en un mismo medio para la bioacumulación por parte de las algas.

ACUMULACIÓN DE METALES EN ALGAS VERDE AZULADAS

Las algas verde azuladas, también llamadas Cianobacterias son capaces de acumular metales pesados en sus células.

Este tipo de algas son el grupo más diverso de organismos fotosintéticos, están en casi todas partes, en hábitats terrestres y acuáticos, en lugares tan extremos como las fuentes termales (a temperaturas superiores a los 70 grados centígrados), o en las grietas de rocas situadas en el desierto. Además, son muy antiguas, se han encontrado fósiles de estas algas en rocas que tienen una edad entre 2500 y 2800 millones de años.

No sólo soportan estoicamente la presencia de metales como el cadmio, plomo y cobre, sino que también los acumulan en su biomasa. Los investigadores piensan que la retención se produce principalmente en la pared o en la vaina mucilaginosa que recubre la célula. Por ello, no es necesario que las algas estén vivas.

Las propiedades de las algas verde azuladas no se limitan a acumular metales, tienen otras muchas aplicaciones, entre ellas reducen la erosión del suelo, porque favorecen la infiltración del agua, mejorándose su fertilidad. También pueden degradar ciertas sustancias tóxicas como el lindano, un componente muy persistente que se emplea como pesticida. Además pueden resultar útiles en los denominados filtros biológicos.

Filtros biológicos

Hoy en día, el uso de biomasa (material orgánico) para la descontaminación de aguas residuales es una alternativa interesante por su bajo coste. Es lo que se denomina biosorción o filtros biológicos, los cuales pueden prepararse a partir de algas, hongos o bacterias. Esta biomasa no necesariamente tiene que estar viva. En algunos casos, el material puede inmovilizarse en una matriz de polímero (un plástico). Los filtros se

colocan conformando columnas por donde pasa el agua contaminada. Los metales se adhieren al filtro, y cuando se agota la capacidad de retención, el filtro se reemplaza, se incinera y se reciclan los metales. Las cianobacterias, que al igual que las plantas, producen su propio alimento a partir de la fotosíntesis, son candidatas ideales para la retención de metales.. En el caso del plomo, acumulan una cantidad similar a la que retiene una planta hiperacumuladora de plomo.

Producir estas algas es barato porque su cultivo sólo requiere unas pocas sales minerales, agua y luz.

Como hemos dicho, las Cianobacterias se encuentran frecuentemente creciendo en aguas contaminadas debido a su habilidad para acumular metales. Algunos de los llamados metales tóxicos participan en rutas metabólicas, por ejemplo el Zn, Ni y Cu son micronutrientes esenciales para algunas Cianobacterias y sólo grandes cantidades hacen que estos metales lleguen a ser tóxicos.

Bioabsorción

Normalmente, la integración de metales por parte de estas algas comprende dos fases distintas: introducción de grupos cargados negativamente en la superficie de la célula (pasivo), y la posterior internalización dependiendo del metabolismo (activo).

El proceso pasivo es rápido, ocurriendo en la exposición de la cianobacteria al metal, y en cambio, el proceso dependiente del metabolismo es mucho más lento.

Los mecanismos asociados a la bioabsorción de metales son complejos, dependen del metal y de los sistemas biológicos.

Las ventajas de este proceso son:

- Capacidad de tratar grandes volúmenes de agua contaminada debido a la rapidez del proceso.
- Uso de materiales renovables que pueden ser producidos con escaso coste.
- Alta selectividad.
- Capacidad de manipular muchos metales pesados y residuos mezclados.
- Gran reducción en el volumen de los residuos peligrosos producidos.
- Bajo capital invertido, bajos costes.
- Actúa bajo un amplio rango de condiciones fisicoquímicas incluyendo temperatura, PH y presencia de otros iones.

Factores ambientales que influyen en la toxicidad de los metales

La acumulación de metales depende del estado fisicoquímico de las células, y de variables ambientales como el PH, el potencial redox, la salinidad, la temperatura, la cantidad de nutrientes, la concentración del metal, la iluminación, etc.

- El PH

Uno de los factores más importantes que modifica el estado fisicoquímico del metal es el PH. En medio ácido, los metales se encuentran en forma iónica, por lo que puede haber una competencia entre estos iones y los protones, lo que puede reducir la toxicidad del metal.

Cuando el PH disminuye, el Cd, Cu y Zn empiezan a ser menos tóxicos, y el Pb lo es aún más. El Aluminio alcanza su mayor toxicidad cerca del rango de PH 5.8–6.2.

Altas concentraciones de Ca, Mg y Mn reducen la toxicidad de una variedad de metales pesados por impedir

su paso a través de la membrana. Esto puede ser debido a la competición por el cambio de iones o por la precipitación de compuestos de carbonato, bicarbonato o hidróxidos de calcio y magnesio.

- Salinidad

Algunos metales pueden ser más tóxicos fuera del rango normal de salinidad de las aguas. La concentración de sal puede influir en la absorción del metal. Los iones sodio disminuyen la bioacumulación de cationes metálicos.

- Nutrientes

La concentración de PO₄ influye directamente en la toxicidad de los metales para las algas. Concentraciones de PO₄ disminuyen el efecto de los metales o bien por precipitación con metales como Fe y Al en soluciones externas o bien por asociación con polifosfatos intracelulares.

La presencia de otros cationes solo afecta a la tolerancia de los metales en Cianobacterias. Se ha visto que por ejemplo, el hierro, un ión metálico común, tiene un efecto protector contra la toxicidad del níquel y del cobre.

Mecanismos de tolerancia

Numerosos géneros de Cianobacterias han estado aislando

metales contaminados del medio, en aguas enriquecidas con Zn (22.8 mg/l), cobalto (0.44 mg/l) níquel (0.43 mg/l) y plomo (0.28 mg/l).

Las Cianobacterias que crecen en presencia de metales, han desarrollado varios mecanismos de tolerancia.

Estas algas poseen la habilidad de producir sustancias extracelulares para protegerse de los metales tóxicos. Algunas excretan metabolitos secundarios como respuesta a la limitación de micronutrientes los cuales pueden reducir la toxicidad de ciertos metales.

Las algas pueden tolerar metales pesados manteniendo bajas concentraciones intracelulares. Algunos mecanismos para conseguir esto son: La detoxificación enzimática, la síntesis de polímeros, la precipitación de complejos metálicos insolubles en la superficie celular, adaptaciones genéticas, cambios morfológicos, impermeabilidad, etc.

PROCEDENCIA DE LOS METALES PESADOS

La contaminación ambiental debido al desarrollo tecnológico es uno de los problemas más importantes de este siglo.

Metales pesados como el cobre, níquel, plomo, cromo, cadmio, acumulados en las aguas son perjudiciales para el medio ambiente. Debido a su toxicidad, sus efectos en nuestros ecosistemas presentan posibles riesgos para la salud humana. La existencia de estos iones en el agua puede causar efectos dañinos en los organismos que viven en el agua y también en quienes la consumen.

Muchos de estos metales son bastante utilizados en la vida diaria. Por ejemplo, las plantas industriales utilizan niveles elevados de cobre (II). Las industrias textiles, tintorerías, industrias del vidrio y la cerámica producen plomo (II), y las refinerías de petróleo plomo (III). En la minería y en la metalurgia se consumen cantidades considerables de cromo (VI), conocido por ser cancerígeno.

Además de proceder de fuentes naturales, la presencia de metales pesados puede deberse a las siguientes

causas:

- Procesado industrial de minerales y metales.
- Consumo de metales y de materiales que contienen metales.
- Vertido de materiales de desecho.
- Excreciones animales y humanas.
- Existen determinados sectores industriales que emiten un amplio espectro de metales, mientras que otros emiten un único elemento característico.
- Las sustancias acondicionadoras de suelos, tales como fosfatos, estiércol, rectificadores, aguas residuales, lodos de depuradoras, etc. pueden incluir contenidos apreciables de metales pesados.

La eliminación de la toxicidad de los metales procedentes de las aguas residuales de las industrias es uno de los problemas más importantes del medio ambiente que deben ser resueltos. El tratamiento de las aguas residuales, incluyendo los iones de los metales pesados, generalmente depende de la capacidad del tipo de planta, las características de las aguas residuales, del método de tratamiento y de los metales. La precipitación química, el cambio de iones, el proceso inverso a la ósmosis, la extracción del disolvente son los procedimientos más comunes para eliminar los iones metálicos de un medio acuoso.

Las altas tecnologías tienen desventajas significativas, como una incompleta eliminación de los metales, el caro equipamiento, la necesidad de niveles altos de energía y la generación de sedimentos y otros productos residuales que deben ser eliminados.

Algunos procesos pueden ser inefectivos o extremadamente caros cuando la concentración inicial de metales pesados es de 10–100 mg/l.

ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE ALGAS HIPERACUMULADORAS

Las macroalgas pueden ser clasificadas en tres grupos principales según su hábitat y color: las algas verdes (Clase Chlorophyceae), algas marrones (clase Phaeophyceae), las algas rojas (clase Rhodophyceae) y las algas coralinas (clase Corallinaceae). Son las tres primeras las que acumulan mayor cantidad de metales. La mayor parte de las algas están en las proximidades de la orilla, en las aguas de salinidad normal (con un 3,5% NaCl) aunque algunas son capaces de sobrevivir en rías y fiordos (tal es el caso del género *Fucus*) y otras incluso en agua dulce. La importancia de estos organismos radica en el elevado número de individuos, se estima que el peso seco total de algas en el mundo es de varios millones de toneladas.

Las algas son plantas primitivas no vasculares que no poseen un sistema radicular y las sustancias nutritivas son absorbidas por los rizoides, que además se encargan de fijar el alga al sustrato. Normalmente son estructuras cartilaginosas y aplanadas de crecimiento muy lento (a razón de 5–6 cm/día). Un componente que predomina sobre el sodio es el potasio en las algas marrones (fundamentalmente en *Macrocystis* y *Nereocystis*).

Tabla 1. Composición media (%) de ceniza de algas comunes pardas.

	Macrocystis (alga marina gigantesca)	Nereocystis (Torokslp)	Laminaria (Alga Marina)	Fucus
CaO	6.7	2.8	9.6	15.0
Cl	34.0	39.0	25.0	18.0
Fe ₂ O ₃	0.4	0.2	0.4	0.8
K ₂ O	34.0	37.0	25.0	8.7
MgO	3.6	2.4	5.8	9.7

(Rockweed/Kelp)

Na ₂ O	14.0	14.0	18.0	23.0
P ₂ O ₅	1.7	1.4	2.7	2.8
SiO ₂			0.7	1.0
SO ₃	6.4	3.6	13.0	23.0

Son organismos que poseen una gran cantidad de agua, entre un 55 a 90%, repartido entre el tallo, filoides y rizoides. Las algas pueden ser un medio muy útil para conocer la concentración de metales en el medio ambiente marino. Sería lógico esperar cantidades parecidas en el agua y en las algas ya que se trata de plantas no vasculares por lo que si aparecen corrientes de agua con una cantidad de cobre, cadmio y zinc 43, 35 y 20 veces superior a los valores normales, cabe suponer que las algas tengan estas mismas cantidades.

Un hiperacumulador se define como un organismo capaz de contener una concentración superior a 1000 g/g de níquel cuando está seco. Esta cantidad puede aplicarse también al cobalto y al cobre y se ha demostrado que las plantas no hiperacumuladoras retienen una concentración cien veces menor, por tanto resulta un criterio útil para comprobar cuando una planta es hiperacumuladora.

Aunque hay numerosos libros que describen la morfología, clasificación y otros muchos aspectos de las algas, todavía no hay datos específicos que recojan los niveles de concentración de metales en las distintas especies. Sin embargo se conocen algunos géneros hiperacumuladores:

1- aparecen niveles altos de yodo, sobre todo en algas pardas (por ejemplo *Laminaria*)

2 – niveles moderados de bromo en algas pardas (por ejemplo. *Laminaria* y *Fucus*), y en el alga roja *Prionitis*

3 – hay un enriquecimiento notable de arsénico en algas pardas, especialmente en *Sargassum*

4 – enriquecimiento de uranio en algas pardas, notablemente *Fucus*.

5 –enriquecimiento moderado de estroncio en algunas algas pardas (*Fucus*, *Sargassum*).

6 – enriquecimiento moderado de vanadio en la lechuga verde de mar.

Los estudios realizados muestran que los niveles altos de metales pesados como plomo, zinc, cadmio y cobre, en el mar pueden ser retenidos por las algas sin que ello afecte a su crecimiento. Parece probable que con otra serie de metales ocurra lo mismo, por tanto constituyen una opción para solucionar parte de la contaminación de las aguas.

ELEMENTOS TRAZA EN ALGAS

Para establecer un criterio que nos permita comparar la concentración de determinados metales en una planta concreta es preciso elaborar el concepto de planta tipo a partir de la media de datos reales. De esta manera se puede saber si una planta está enriquecida o no con un elemento concreto.

Tabla 2. El contenido de elementos trazas(g/g de peso seco) en una planta terrestre tomada como referencia, y de algas sobre la costa oeste de la isla Vancouver.

Elementos	Ref.Planta1	Nivel Hiper.1	Algas pobres3	Algas Hiperacumuladoras
Ag	0.24	20	< 0.8	
As	0.1	10	8.2	Especialmente <i>Sargassum</i> , <i>Macrocystis</i> ,

				<i>Nereocystis,</i> <i>Giganina,</i> <i>Egregia,</i>	<i>Hedophyllum</i>
Au	0.0014	0.1	< 4		
Ba	40	4000	< 40		
Br	4	400	643	Especialmente: <i>Prionitis</i>	
Ce	0.5	50	0.94		
Co	0.2	20	2.5		
Cr	1.5	150	2.2		
Cs	0.2	20	0.11		
Cu	10	1000	12		
Hf	0.05	5	0.2		
I	3	300	238	La mayoría en algas pardas	
<i>Hedophyllum, Macrocystis, Nereocystis</i>					
La	0.2	20	0.57		
Mo	0.54	50	< 0.8		
Ni	1.5	150	< 20		
Pb	1	100			
Rb	50	5000	23		
Sb	0.14	10	0.11		
Sc	0.02	2	0.49	2 g/g en <i>Eclocarpus</i>	
Sr	50	5000	696	Altos niveles moderados en muchas especies(1500 g/g en <i>Sargassum</i>)	
Th	0.005	0.5	0.06		
U	0.01	1	0.44	<i>Fucus,</i> <i>Sargassum,</i> localizadas en algas pardas	
V	0.5	50	5.9	Localmente en <i>Viva</i>	
Zn	50	5000	37		

1 de Markert (1994).

2 nivel de Hiperacumulación – 100 veces la concentración respecto a la planta 'de referencia' {Markert, 1994}.

3 contenido medio de elementos en 101 muestras que representan 21 especie de alga común de nueve sitios cerca de la Estación Bamfield Marítima, oeste de Vancouver

4 Valores para Ag, Au, Mo y Sb (de Markert, 1994) son una orden de magnitud más alto que el comúnmente encontrado en plantas de Norteamérica

Yodo

Quizás es el elemento más estudiado, que acumulan las algas en altas concentraciones aunque es difícil de cuantificar ya que se volatiliza. El contenido en algas suele ser más de cien veces superior al de las plantas terrestres, siendo máximo en las algas marrones y mínimo en las algas verdes pero aún así supera la concentración de las plantas vasculares. De las algas pardas, *Laminaria* tiene hasta un 5.5% de yodo en peso seco aunque lo normal es que la concentración no sobrepase el 1%; esta cantidad varía en función de unos determinados factores: el hábitat(a mayor profundidad mayor contenido de yodo), la estación del año(en verano aumenta la acumulación de este metal), la edad del alga(en individuos jóvenes la concentración de yodo es mayor).

Las algas rojas contienen 400–1200 g/g en la ceniza, pero pueden extenderse de 20 g/g. Normalmente aparece en estos organismos junto con el potasio y el rubidio.

Bromo

Aunque haya mil veces más bromo que yodo en el agua de mar, se conocen muy pocas algas capaces de acumular yodo en grandes cantidades, aunque tienen incluso una mayor concentración de este metal que las plantas vasculares. Al igual que el yodo es un elemento difícil de cuantificar ya que se volatiliza fácilmente al reducir el alga a cenizas, si no se encuentra unido a un compuesto estable. Por tanto los datos recogidos en estudios acerca de la composición de la ceniza de un alga recogen una cantidad de yodo mucho menor de la que debe de haber en una alga viva.

En general las algas rojas y pardas contienen una concentración de bromo del 0.5– 1 % en la ceniza (aproximadamente 2000–4000 g/g en la materia seca), y las algas verdes son los más pobres acumuladores de bromo. No hay verdaderos hiperacumuladores de bromo sin embargo en los análisis de una gama de algas comunes de la costa oeste de Vancouver, ha mostrado que el alga roja *Prionitis lanceolata* posee las mayores concentraciones de bromo (5000–6000 g/g en la ceniza).

Tabla 3. Concentraciones (en % excepto Fe, Br y I que está en g/g) de algunos elementos principales y en la ceniza de algas del oeste Vancouver la Isla (cerca de la Estación Bamfield Marítima).

Especies	N	Ceniza	K	Na	Ca	Fe	Mg	Cl	Br
----------	---	--------	---	----	----	----	----	----	----