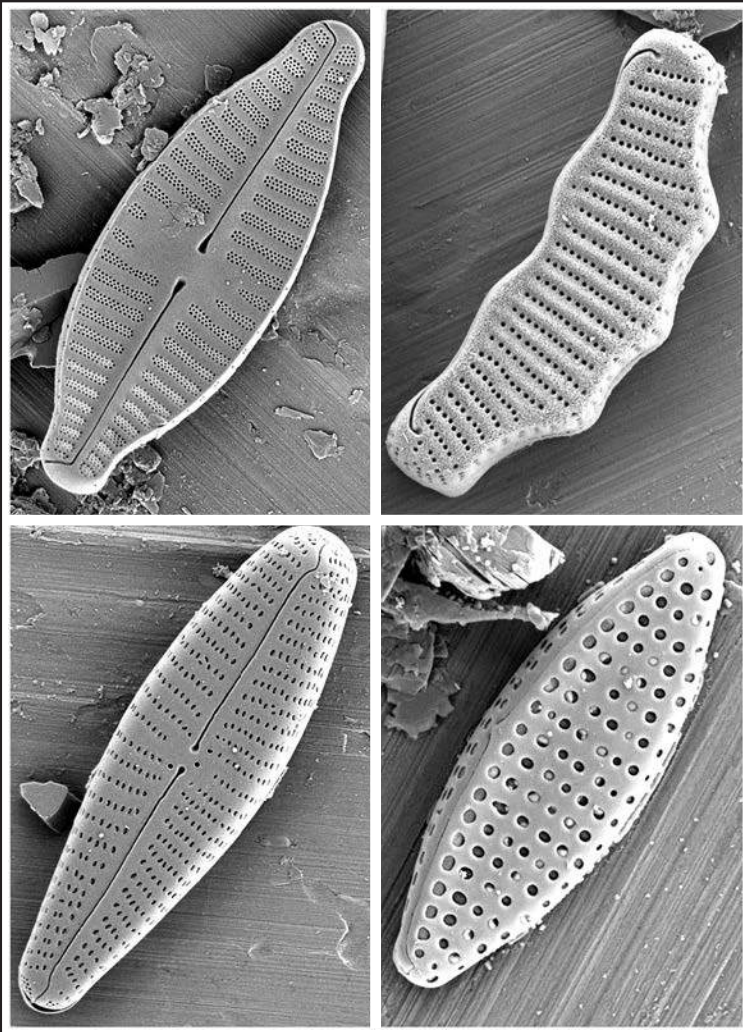


Bolivia Ecológica

EDICIÓN TRIMESTRAL REVISTA Nº 41

AÑO 2006



Algas de Bolivia

- Introducción
- ¿Qué son las algas?
- Clasificación actual de las algas
- Diversidad morfológica dentro de las algas
 - Plasticidad fenotípica y la morfología de las algas
 - Plasticidad fenotípica y la clasificación de las algas
- Perfil biológico de las algas
 - Plastidios, pigmentos y materiales de reserva
 - Nutrición
 - Pared celular
 - Reproducción y ciclos vitales
- Ecología de las algas
 - Plasticidad fenotípica y ecología de las algas
 - Tipos de comunidades algales
 - Asociaciones de las algas con otros organismos
- Usos y beneficios de las algas
 - Ciclos bioquímicos
 - Alimentación
 - Industria
 - Tecnología
 - Estudios ecológicos
- Biodiversidad y conservación de las algas en Bolivia
- Necesidades futuras
- Glosario
- Bibliografía

FUNDACIÓN SIMÓN I. PATIÑO

EDITOR

CENTRO DE ECOLOGÍA DIFUSIÓN
SIMÓN I. PATIÑO

DIRECTORA

Carmiña Montoya Köster

AUTOR

Dr. Eduardo A. Morales

COLABORACIÓN

Cristina Torrico Laserna
María Elva Aguilera

FOTOS PORTADA

Planothidium, *Eunotia*, *Gomphonema* y *Nitzschia*,
diatomeas de ríos de los Yungas de La Paz,
Dr. Eduardo A. Morales

DISEÑO GRÁFICO

Sandra Heredia A.

ÍNDICE

•	Introducción	pág.	1
•	¿Qué son las algas?	pág.	1
•	Clasificación actual de las algas	pág.	2
•	Diversidad morfológica dentro de las algas	pág.	5
	- Plasticidad fenotípica y la morfología de las algas	pág.	6
	- Plasticidad fenotípica y la clasificación de las algas	pág.	10
•	Perfil biológico de las algas	pág.	10
	- Plastidios, pigmentos y materiales de reserva	pág.	12
	- Nutrición	pág.	14
	- Pared celular	pág.	14
	- Reproducción y ciclos vitales	pág.	15
•	Ecología de las algas	pág.	16
	- Plasticidad fenotípica y ecología de las algas	pág.	17
	- Tipos de comunidades algales	pág.	18
	- Asociaciones de las algas con otros organismos	pág.	21
•	Usos y beneficios de las algas	pág.	22
	- Ciclos bioquímicos	pág.	23
	- Alimentación	pág.	24
	- Industria	pág.	26
	- Tecnología	pág.	27
	- Estudios ecológicos	pág.	28
•	Biodiversidad y conservación de las algas en Bolivia	pág.	30
•	Necesidades futuras	pág.	31
•	Glosario	pág.	32
•	Bibliografía	pág.	36



CENTRO DE ECOLOGÍA DIFUSIÓN
SIMÓN I. PATIÑO

Independencia, Esq. Suárez de Figueroa - Tef. / Fax: (+ 591- 3) 3 37 57 26 - Casilla 1674 - Santa Cruz - Bolivia
E-mail: edifusion@fundacionpatino.org - www.cedsip.org

INTRODUCCIÓN

Cualquier ambiente acuático o con la suficiente humedad se convierte en hábitat para las algas, un grupo diverso de organismos fotosintéticos que simplemente necesitan de la luz solar, dióxido de carbono y nutrientes como nitrógeno, fósforo, azufre y algunas vitaminas para su sobrevivencia.

Las algas frecuentemente pasan desapercibidas ya que la gran mayoría son microscópicas; aún así, su importancia no es menor a aquella de otros organismos más notorios como animales y plantas superiores.

Al fotosintetizar, las algas son la base de cadenas alimentarias en medios terrestres y acuáticos constituyéndose en la piedra fundamental sobre la que se edifican las complejas asociaciones biológicas en suelos húmedos, mares, ríos y lagos. A través de su historia, el hombre también ha aprendido a utilizar las algas para su beneficio.

Sus usos varían ampliamente desde complementos alimenticios hasta aplicaciones en nanotecnología y diseño de equipos de reciclaje continuo en la industria aeroespacial. Aún en nuestro medio, el consumo de productos algales es bastante difundido, aunque muy pocas personas se hayan percatado de ello.

¿QUÉ SON LAS ALGAS ?

Resulta difícil dar una definición de alga ya que éste término se aplica a varios grupos de organismos que no están taxonómicamente relacionados entre sí. En realidad sólo hay dos características que todos los grupos algales comparten y que pueden haber sido las determinantes para que los primeros ficólogos (algólogos) las consideraran como un grupo cohesivo y además relacionado con las plantas: su necesidad de vivir en condiciones húmedas y su modo principal de nutrición que es la fotosíntesis.

Estudios recientes en la microscopía óptica y electrónica a la par de los avances en la bioquímica, biología reproductiva y molecular, han revelado que las algas están compuestas por varios grupos de organismos que pertenecen a líneas evolutivas distintas con una gran variedad de estructuras celulares internas, ciclos de vida, requerimientos nutricionales y constitución genética.

Estos estudios no sólo muestran que las algas incluyen a dos tipos de vida distintos, sino también que sólo dos grupos algales son evolutivamente similares a las plantas, mientras que el resto se distribuye en tres reinos distintos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sistema de clasificación

El sistema de los dos dominios y los seis reinos descrito en el cuadro siguiente, es el más aceptado por los científicos. Los grupos algales más representativos se listan dentro de cada reino.



CLASIFICACIÓN ACTUAL DE LAS ALGAS

Existen varios sistemas alternativos que se diferencian primordialmente en la división de los organismos a nivel de rangos taxonómicos superiores: Dominio, Reino y División (ver Cuadros 1, 2), todos ellos concuerdan en que hay dos

tipos de vida en el planeta los organismos procariontes y eucariontes.

Procariontes: carecen de núcleo y organelos celulares. El material genético (ácido desoxirribonucleico: ADN) se halla en el citoplasma y la división celular se realiza por

medio de la fisión binaria, es decir, el ADN se duplica y cada copia recibe una porción del citoplasma con la consecuente producción de dos células idénticas.

Eucariontes: poseen un núcleo organizado y organelos celulares que se aíslan del resto del citoplasma por medio de un sistema de membranas. El ADN reside en el núcleo y la división celular se realiza por dos mecanismos: mitosis y meiosis.

En algunos sistemas de clasificación, Prokaryota y Eukaryota (versiones latinizadas de los términos pro y eucarionte, respectivamente) constituyen los rangos taxonómicos más altos, llamados Dominios y que están seguidos por el rango de Reino. El sistema de clasificación más difundido cuenta con seis Reinos. Los organismos procariontes se incluyen en uno de ellos:

Bacteria: las bacterias agrupan a muchos organismos patógenos que causan enfermedades en humanos y en otros animales, así como también las algas verde azules o aquellas que se incluyen dentro de la División (el siguiente rango taxonómico después de Reino) Cyanophyta y a las proclorófitas (División Prochlorophyta).

El Reino Bacteria, también llamado **Monera**, incluye a las arqueobacterias, organismos que viven en condiciones extremas como en el estómago e intestinos de los mamíferos, aguas termales, medios ultra alcalinos o ácidos, etc., pero ninguno de ellos es un grupo algal.

Los 5 reinos restantes son eucariontes (Protozoa, Chromistas, Plantae, Fungi y Animalia) y sólo tres contienen algas:

Protozoa: agrupan a una gran diversidad de organismos ciliados y flagelados incluyendo a dos grupos algales importantes: los euglenoides (División Euglenophyta) y los dinoflagelados (División Dinophyta). Protozoa también incluye los archaezoos que son organismos con una estructura celular muy peculiar; unos presentan coronas de flagelos, otros dos núcleos y todos tienen ciclos de vida muy complicados con estadíos que pueden ser patógenos para humanos. Ninguno de los archaezoos es un alga.

Chromista: son también un grupo variado e incluyen a algas pardas que son en su mayoría macroscópicas y marinas (División Phaeophyta) y a algas doradas que agrupan a su vez a varias divisiones entre las que destacan las diatomeas (División Bacillariophyta), las algas amarillas (División Xanthophyta), las criptófitas (División Cryptophyta), los crisófitos (División Chrysophyta) y otras divisiones que son principalmente marinas.

Plantae: las plantas incluyen además de las plantas superiores (Angiospermas y Gimnospermas) e inferiores (helechos, musgos, hepáticas y otros), a las algas rojas y verdes (Divisiones Rhodophyta y Chlorophyta, respectivamente). Las algas rojas son en su mayoría macroscópicas y marinas y sólo algunas viven en agua dulce. Las algas verdes son principalmente microscópicas y dulceacuícolas, aunque hay varios subgrupos macroscópicos que desarrollan en ambientes marinos.

Figura 1. Algunos ejemplos de niveles de organización de las algas

Unicelular coccoide:

(H) *Closterium*, Chlorophyta microscópica
 (I) *Chroococcus*, Cyanophyta microscópica, antes de dividirse y formar colonias denotando que un sólo alga puede pasar por varios niveles.

Unicelular móvil:

(A) *Euglena*, Euglenophyta microscópica (B) *Ceratium*, Dinophyta microscópica;
 (G) *Trachelomonas*, Euglenophyta microscópica.

Cenobio:

(J) *Scenedesmus*, Chlorophyta microscópica; (Q) *Eudorina*, Chlorophyta microscópica.

Tetrasporal:

(L) *Gloeothoece*, Cyanophyta microscópica;
 (P) *Aphanothece*, Cyanophyta microscópica.

Filamento no ramificado:

(C) *Spirogyra*, Chlorophyta microscópica;
 (D) *Lyngbya*, Cyanophyta microscópica;
 (K) *Nostoc*, Cyanophyta microscópica que forma colonias macroscópicas con mucilago;
 (M) *Anabaena*, Cyanophyta microscópica. Nótese el heterocisto (especializado en la fijación de nitrógeno) denotado por la flecha.

Filamento con ramificación verdadera:
 (E) *Cladophora*, Chlorophyta microscópica pero formando densas matas macroscópicas;
 (N) *Batrachospermum*, Rhodophyta macroscópica.

Filamento heterotrico:

(O) *Stigeoclonium*, Chlorophyta microscópica.

Pseudoparénquima:

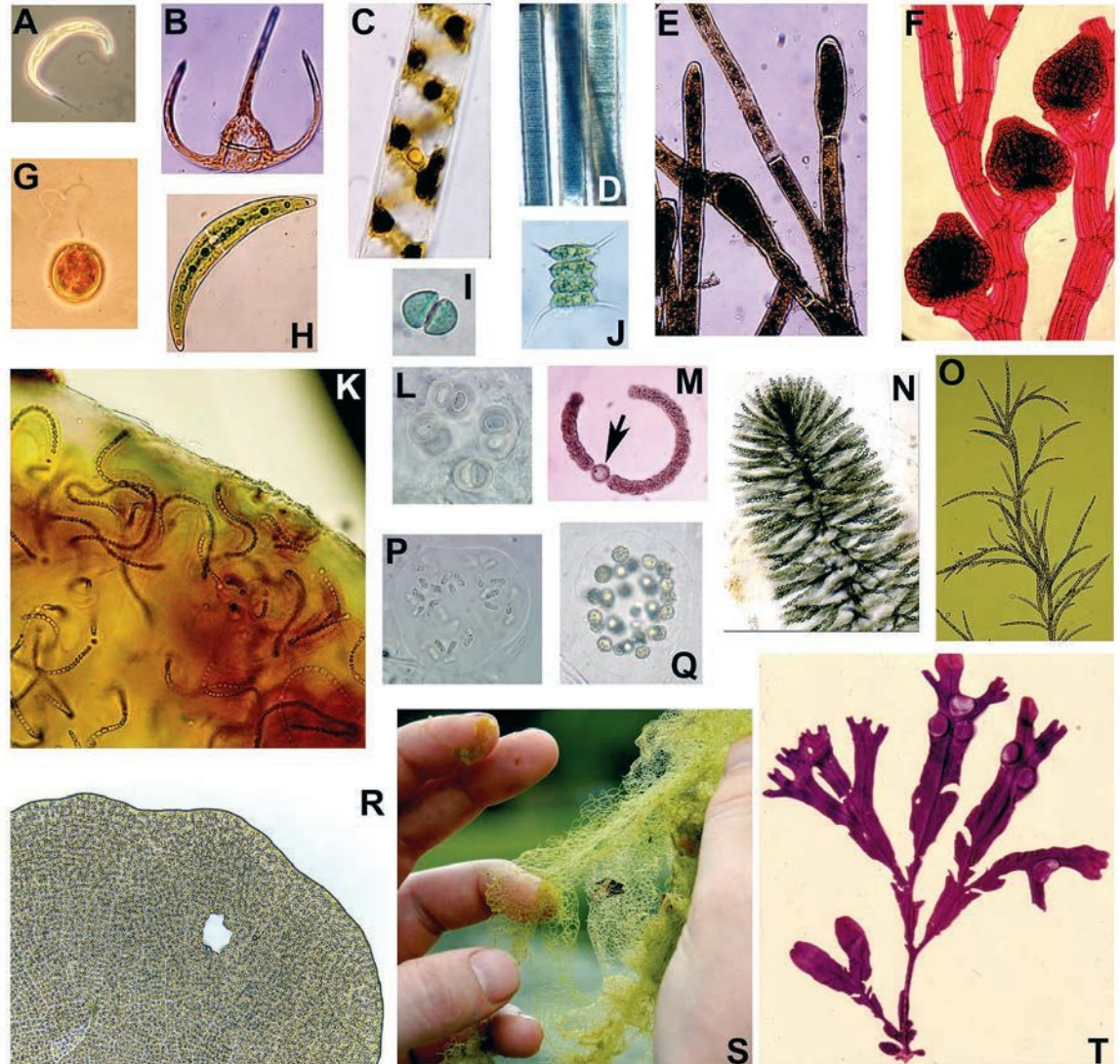
(F) *Polysiphonia*, Rhodophyta microscópica;
 (R) *Prasiola*, Chlorophyta macroscópica.

Cenocítico:

(S) *Hydrodictyon*, Chlorophyta macroscópica.

Parénquima:

(T) *Fucus*, Phaeophyta macroscópica. Las algas fotografiadas en (F) y (T) son marinas, el resto son dulceacuicolas y se hallan en ecosistemas acuáticos bolivianos.



Cuadro 2. Categorías taxonómicas

El sistema de los dos dominios y los seis reinos descrito en el siguiente cuadro es el más difundido y aceptado por los científicos. Los grupos algales más representativos se listan dentro de cada Reino.

Categoría	Ejemplo	Rango taxonómico	
Dominio	Prokaryota	Superior	
Reino	Eubacteria	↑ ↓	
División (=Phylum)	Cyanophyta		
Clase	Cyanophyceae		
Orden	Nostocales		
Familia	Nostocaceae		
Género	Nostoc		
Especie			Inferior
	Nostoc commune		

Por lo expuesto anteriormente se deduce que los organismos que se conocen como algas pertenecen a dos Dominios y a por lo menos cuatro Reinos, lo que implica una gran diversidad morfológica, biológica y ecológica (Cuadro 3).

DIVERSIDAD MORFOLÓGICA DENTRO DE LAS ALGAS

El cuerpo de un alga se conoce como "talo" y éste presenta una gran diversidad morfológica dependiendo del grupo algal e inclusive un sólo grupo puede contener organismos de morfología completamente distinta. Por tanto, la

complejidad morfológica no es necesariamente indicativa del rango taxonómico ni de la afiliación evolutiva de un determinado grupo de algas (Cuadro 4 y Figura 1).

El talo algal varía desde unicelular hasta multicelular y a su vez cada tipo posee una serie de variaciones que resultan de los distintos modos de adaptación de las algas al medio en el que se desenvuelven.

Las **algas unicelulares** por ejemplo, pueden ser inmóviles libres o fijas a un sustrato (los sustratos varían desde plantas y animales sumergidos hasta rocas, arena, etc.). Pero también existe una gran multitud de algas unicelulares que pueden moverse libremente en el medio acuático gracias a que poseen flagelos o movimientos ameboideos (contracciones de la célula). El moverse les permite a las algas buscar mejores condiciones luminosas para la fotosíntesis (fototaxis) o tener mejor acceso a nutrientes en el medio acuático.

Las **algas multicelulares** por su parte contienen agrupaciones de células que pueden o no depender unas de otras para la subsistencia del alga.

Dentro del tipo colonial, por ejemplo, muchas de las subcategorías presentan células que en caso de desprenderse de la colonia pueden subsistir e inclusive reproducir una colonia entera. En la mayoría de las colonias las células están embebidas en una sustancia pegajosa llamada mucílago, un polisacárido cuya consistencia es muy similar a la de la gelatina.

Otro tipo de organización multicelular es el filamento o tricoma, los talos filamentosos también pueden ser de varios

tipos y pueden presentar ramificaciones. Algunos tricomas se hallan rodeados de una vaina de mucílago. En varias especies los filamentos pueden estar dispuestos unos junto a otros, formando lo que se llama un pseudoparénquima en el que cada filamento mantiene su independencia y puede sobrevivir por sí mismo en caso de separarse del resto. Los talos parenquimáticos constituyen otro tipo de organización multicelular en el que el talo del alga se genera por una división celular en varios planos a la vez, resultando en una masa (generalmente aplanada) de células altamente organizadas y comunicadas entre sí. En muchas especies, las células de los talos parenquimáticos están especializadas para realizar distintas funciones y sólo algunas de ellas se encargan de producir más células, formar estructuras especializadas para la reproducción, etc.

Una variación muy peculiar de organización morfológica es la de los talos cenocíticos, los cuales se generan mediante varias divisiones nucleares de manera que una sólo célula, generalmente de forma alargada y parecida a un filamento, contiene varios núcleos. En algunos casos, después de una de las múltiples divisiones nucleares, el citoplasma también se divide formando paredes a lo largo del talo y generando así una variante semicenocítica con varias células multinucleadas.

Plasticidad fenotípica y la morfología de las algas

Las algas son organismos que exhiben una alta plasticidad fenotípica que se expresa a nivel morfológico y fisiológico. La plasticidad fenotípica se define como la capacidad de

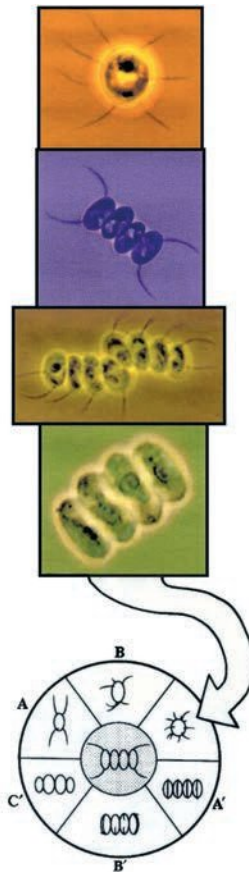
un organismo de producir uno o más fenotipos (formas) dependiendo de variaciones en su medio circundante.

Mediante éste proceso muchas especies de algas pueden pasar de un nivel de organización a otro, lo que les permite adaptarse mejor a su medio, especialmente en hábitats en que las condiciones cambian constantemente. La plasticidad fenotípica puede expresarse en un mismo individuo que cambia de forma y/o fisiología cuando pasa de un ambiente a otro diferente, o de generación a generación, cuando el organismo detecta un cambio en su medio ambiente, se reproduce y la progenie muestra el cambio fenotípico.

Algunos ejemplos de plasticidad fenotípica son impresionantes mostrando cambios morfológicos bastante marcados, por ejemplo algunos dinoflagelados son capaces de cambiar la forma y estructura de su pared celular constituida por placas de celulosa, un polisacárido altamente resistente y que tiene la función de proteger a la célula contra depredadores. Cuando el organismo pasa de un medio de aguas tranquilas a otro donde existe una gran turbulencia, las placas celulósicas cambian de posición y algunas son deshechadas para darle al organismo una forma más acuadínamica. Cuando el organismo retorna a aguas sin turbulencia la forma original se vuelve a producir mediante la regeneración de las placas deshechadas y la redistribución de toda la pared celular.

El alga verde *Scenedesmus* que es típicamente representada en los libros como un cenobio de 4 células, tiene la capacidad de producir más de dos formas, las que se expresan inmediatamente después de la reproducción de cada célula componente del cenobio (Figura 2).

Figura 2. Resumen esquemático de la plasticidad fenotípica en tres clones (*cultivos de laboratorio*) de *Scenedesmus* representado mediante el “reloj taxonómico” (*círculo inferior*)



A-A' *Scenedesmus armatus* (cepa 2193) ; **B-B'** cepa N56 (especie no identificada) y **C-C'** *Scenedesmus kissi* (cepa UTEX 2193).

El círculo central del reloj indica que el cenobio tetracelular de espinas largas no es sino un estadio por el cual pasan las tres especies. Esto quiere decir que si sólo se encontrara el cenobio tetracelular en una muestra, éste no se puede identificar con precisión.

Los cambios de forma se producen de acuerdo a la concentración de nutrientes, variaciones en la temperatura, la disponibilidad de luz y la presencia de depredadores en el medio en el que los cenobios se desarrollan. Hacia el comienzo de la primavera, cuando los nutrientes son abundantes en la columna de agua de ríos y lagos, *Scenedesmus* produce organismos unicelulares dotados de espinas y que flotan y tienen la capacidad de dividirse rápidamente para competir más efectivamente con otras especies por los nutrientes disponibles.

A medida que la comunidad algal (el conjunto de especies presentes en un hábitat) aumenta en número, también lo hacen los depredadores, que están principalmente representados por rotíferos, animales microscópicos. Cuando los rotíferos excretan partículas fecales que contienen restos de los *Scenedesmus* que han ingerido, los *Scenedesmus* sobrevivientes detectan los químicos presentes en las excreciones e inmediatamente producen cenobios de cuatro, ocho o más células (según la especie de *Scenedesmus*). Los cenobios de por sí son mucho más grandes y además poseen espinas, de manera que ya no pueden ser atrapados por los rotíferos.

Por tanto, la plasticidad funciona como un mecanismo de defensa. Hacia el final del verano y cuando los nutrientes son más escasos en el agua, cada célula del cenobio se reproduce una vez más dando origen a otros cenobios, pero ésta vez cada célula está armada de proyecciones, ribetes y espinas más gruesas que hacen que el cenobio sea más pesado y se hunda hacia el fondo del hábitat donde el alga perenna hasta que las condiciones en la primavera siguiente sean favorables. En éste caso la plasticidad

funciona como un mecanismo de dormancia o proceso de hibernación. Cuando las condiciones apropiadas vuelven a

darse, cada célula del cenobio se divide produciendo nuevamente talos unicelulares.

Cuadro 3. Clases algales representativas y sus características relevantes

El nivel taxonómico de Clase es el más difundido entre los ficólogos. Los nombres usados para materiales de reserva y compuestos de la pared celular corresponden a nombres comunes de moléculas orgánicas.

Clase Algal	Hábitat	Clorofila/Material de reserva	Pared celular
Sin plastidios			
Cyanophyceae	Aguas marinas hasta dulces, terrestres Aguas marinas hasta dulces	a/ficocianina, arginina y ácido aspártico	4 capas de proteína y polisacáridos
Prochlorophyceae	Aguas dulces Aguas marinas hasta dulces, suelos	a y b/substancia parecida al almidón	4 capas de peptidoglicano
Plastidios primarios			
Glaucophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a/almidón	1 capa de peptidoglicano
Rhodophyceae	Aguas dulces, terrestres y suelos	a y d/una variación de almidón llamado almidón floridiano	Celulosa, algunas calcificadas
Plastidios secundarios			
Bacillariophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y c/crisolaminarina y lípidos	Dióxido de silice (vidrio)
Chlorophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y b/almidón	Algunas con sólo membrana celular, otras con celulosa, algunas calcificadas
Chrysophyceae	Aguas dulces	a y c/crisolaminarina	Escamas o lóricas (envoltura de una sola pieza) de dióxido de silice (vidrio)
Cryptophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y c/almidón	Sin pared celular sinó con periplasto proteináceo debajo de la membrana celular
Euglenophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y b/paramilo	Sin pared celular, con película proteinácea debajo de la membrana celular. Otras con una lórica (envoltura de una sola pieza proteinácea externa)
Phaeophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y c/laminarina y manitol	2 capas: una de celulosa y la otra de ácido alginico y fucoidina
Xanthophyceae (Tribophyceae)	Aguas marinas hasta dulces	a y c/crisolaminarina	Celulosa impregnada de silice
Plastidios terciarios (algunas especies presentan plastidios secundarios)			
Dinophyceae	Aguas marinas hasta dulces	a y c/almidón	No poseen pared sinó placas de celulosa debajo de la membrana celular

Cuadro 4. Diversidad morfológica de las algas

Cada tipo morfológico se conoce como nivel de organización y cada nivel posee subcategorías.

Nivel de Organización	Definición
Unicelular	El talo está conformado por una sola célula
Inmóvil o coccoide	Células solitarias, generalmente esféricas y algunas embebidas en mucílago
Móvil	Células se mueven por flagelos o por movimientos ameboides
Sésil	Las células se hallan sujetas a un sustrato
Colonial	El talo está compuesto por varias células que en algunos casos mantienen su independencia
Agregación	Colonias aplanadas en la que las células se hallan embebidas en una matriz de mucílago y dispuestas en la periferie. Poseen flagelos
Cenobio	Colonias con un número fijo de células durante el ciclo vital del alga. Pueden o no poseer movimiento propio por medio de flagelos
Palmeloide	Células embebidas en mucílago y sin flagelos. Este estado es generalmente un estadio de resistencia a condiciones adversas por parte de células flageladas
Tetrasporal	Similar al anterior pero el organismo permanece en éste estado durante toda su existencia
Filamentoso	El talo está compuesto por varias células que mantienen su independencia. Los filamentos se llaman también tricomas
Simple	Filamentos con una sola fila de células
de ramificación falsa	Las ramas se producen por muerte de una célula a lo largo del filamento y desviación de la división de la célula inmediatamente por debajo de ella
de ramificación verdadera	Las ramas se producen por división en un plano distinto al del eje principal del filamento
Heterotrico	Una porción del talo es prostrado (dispuesto sobre la superficie del sustrato) y la otra es erecta (perpendicular al sustrato) Los talos heterotricos pueden ser ramificados
Pseudoparénquima	El talo del alga se forma mediante la unión de varios filamentos formando una capa continua, pero cada filamento es independiente
Parénquima	El talo del alga se forma por una división celular en varios planos resultando en una masa de células que generalmente están diferenciadas para realizar distintas actividades dentro del talo
Cenocítico	El talo tiene aspecto filamentoso pero no posee tabiques citoplásmicos y una sola célula alargada contiene varios núcleos
Semicenocítico	Una variación del anterior nivel en el que algunos tabiques se forman resultando en unas pocas células y cada una con varios núcleos

Plasticidad fenotípica y la clasificación de las algas

Si no se conoce bien el ciclo vital de un alga que exhibe plasticidad fenotípica, cada forma que éste organismo produce puede erróneamente clasificarse como una especie distinta. De hecho, ésto ha pasado varias veces a lo largo de la historia de la Ficología.

En el caso de *Scenedesmus*, los cenobios han sido clasificados como especies diferentes mientras que la forma unicelular aparece clasificada en la literatura inclusive dentro de géneros distintos. Una de las falencias más notables de la clasificación de la gran mayoría de los grupos algales es que tal clasificación está enteramente basada en la morfología del talo algal. De hecho, consideraciones acerca de la funcionalidad del fenotipo de un organismo aún se hallan ausentes en la clasificación de muchos grupos algales.

Para que un sistema de clasificación refleje las relaciones entre individuos de una manera más natural y más cercana a lo que realmente ocurre en la naturaleza, no sólo se necesita describir la morfología de los organismos colectados directamente de su hábitat, sino también establecer cultivos y hacer otros estudios en el laboratorio que den pautas acerca de cómo los individuos se adaptan a cambios en las condiciones que los rodean.

La incorporación de estudios de plasticidad fenotípica ya ha probado ser muy útil en el esclarecimiento de la identidad de muchas algas y de sus relaciones filogenéticas (relaciones a nivel evolutivo) con otros organismos.

PERFIL BIOLÓGICO DE LAS ALGAS

Como se dijo anteriormente, existen dos tipos de algas de acuerdo a su organización celular: procariontes y eucariontes, y ambos tipos difieren en varios aspectos (Cuadro 5 y Figura 3), especialmente en lo que se refiere en la organización del material genético y la existencia de organelos rodeados por membranas que se hallan dispuestos en el citoplasma de las células eucariontes.

Estas diferencias, no sólo tienen consecuencias biológicas sino también ecológicas en cuanto a los mecanismos de adaptación y estrategias de sobrevivencia.

La organización procarionte de las algas verde azules y proclorófitas les permite ser mucho más resistentes a procesos extremos como cambios bruscos de pH, temperatura, humedad, etc., mientras que la organización eucarionte ha generado tal diversidad de organismos que éstos se han diseminado por todo tipo de hábitats en el planeta.

Un análisis profundo de la estructura celular eucarionte revela que los plastidios (organelos donde se realiza la fotosíntesis) que se hallan en los diversos grupos algales tienen un gran parecido con la estructura procarionte de las algas verde azules (no poseen plastidios, ver Cuadro 5).

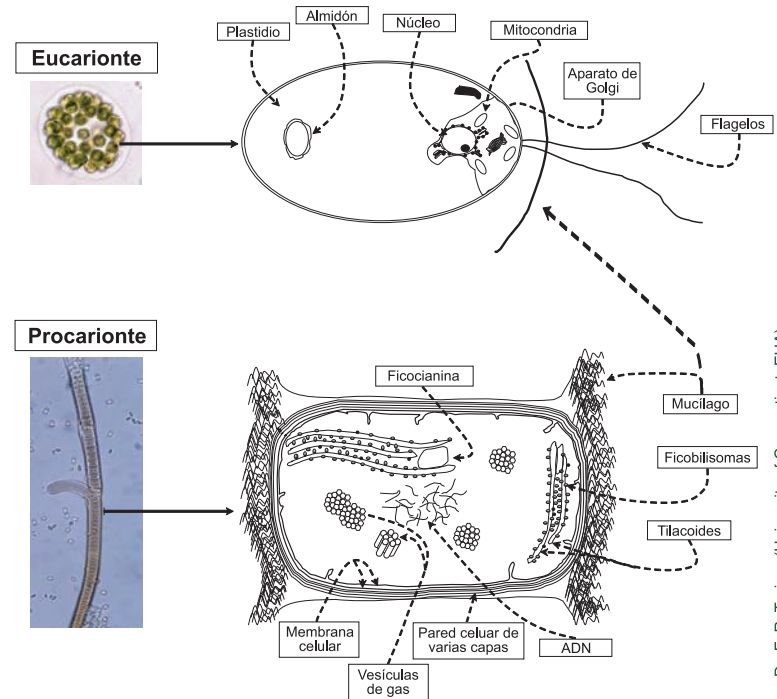
La teoría que explica ésta similitud recibe el nombre de endosimbiosis y postula que los plastidios de las algas y las plantas superiores se originaron a partir de la captura de un alga verde azul (huésped) en el citoplasma de un organismo (hospedero) que se alimentaba de éste tipo de

algas. Muchas de las algas no fueron digeridas por el hospedero y continuaron realizando parte de sus funciones vitales dentro del mismo. Ya que el alga proporcionaba los alimentos por medio de la fotosíntesis y el hospedero proporcionaba un ambiente seguro para el alga, la relación se hizo tan estrecha que ambos organismos coevolucionaron por varios millones de años generando la gran diversidad de organismos eucariontes fotosintéticos que se observa hoy en el planeta (incluyendo a plantas superiores).

Avances en la microscopía electrónica de transmisión así como también el desarrollo de la biología molecular no sólo han demostrado que éste en realidad fue el proceso de origen de los plastidios (llamado proceso de endosimbiosis primaria), sino también que la endosimbiosis ocurrió varias veces más a lo largo de la evolución de la vida sobre la tierra, pero ésta vez un hospedero acogió en su seno a un eucarionte que ya contenía un plastidio (endosimbiosis secundaria) o a un eucarionte que poseía plastidios secundarios (endosimbiosis terciaria).

Pero la teoría de la endosimbiosis no sólo se aplica a los plastidios sino también a las mitocondrias (organelos encargados de producir energía dentro de la célula) y a los flagelos (organelos que sirven para la locomoción celular y localizados en un extremo de la célula) que tuvieron el mismo origen: huéspedes que establecieron una relación beneficiosa con el hospedero formando una asociación permanente.

Figura 3. Representación diagramática de células eucariontes y procariontes



Los eucariontes están representados por el alga verde colonial flagelada (agregación) llamada *Eudorina*, mientras que el procarionte es un alga verde azul filamentosas y con ramificación falsa del género *Scytonema*. Nótese la existencia de diversos organelos en las células eucariontes.

En procariontes, aún los pigmentos fotosintéticos se hallan organizados en corpúsculos llamados ficobilisomas, los cuales están adheridos a los tilacoides.

Cuadro 5. Diferencias entre algas procariontes y eucariontes

Procariontes	Eucariontes
Pared celular	
Mezcla de proteínas y polisacáridos dispuestos en varias capas	Ausente o, cuando presente, de composición diversa, inclusive mineralizada. Usualmente una sola capa
Núcleo	
Ausente, el ADN está en el citoplasma	Presente, y contiene al ADN
Organización del material genético	
Un anillo de ADN. También existen anillos adicionales pero más pequeños de ADN en el citoplasma y que reciben el nombre de plamidios	Disgregado en el núcleo u organizado en cromosomas durante la reproducción sexual o asexual. ADN adicional se halla en las mitocondrias y plastidios (vestigios de los huéspedes endosimbióticos)
Plastidios	
Ausentes, los pigmentos fotosintéticos se hallan asociados a proteínas y se llaman ficobilisomas los que se ubican sobre vesículas citoplásmicas llamadas tilacoides	Primarios, secundarios o terciarios, todos ellos con un número variable de membranas y con tilacoides en su interior
Otros organelos con membranas	
Ausentes, los procesos químicos ocurren directamente en el citoplasma	Presentes y cada organelo tiene una función específica
Reproducción/división celular	
Netamente asexual/simple duplicación y división del ADN	Asexual y sexual/mitosis y meiosis, respectivamente

Plastidios, pigmentos y materiales de reserva

La teoría de la endosimbiosis demuestra la existencia de por lo menos tres tipos de plastidios clasificados de acuerdo al número de membranas externas que poseen (Figura 4 y Cuadro 3).

Los plastidios que son producto de una endosimbiosis primaria poseen un sistema de dos membranas, la más interna procede del alga verde azul que fue inicialmente capturada y la más externa corresponde a la vesícula utilizada por el hospedero para atrapar al alga (la vesícula deriva de la membrana celular del hospedero).

Los plastidios que son producto de una endosimbiosis secundaria poseen tres membranas rodeando a sus plastidios. Las dos más internas provienen del huésped que ya contenía un plastidio primario y la última corresponde a la vesícula que el hospedero utilizó para atrapar a tal huésped.

El tercer tipo de plastidio se originó por endosimbiosis terciaria. Los plastidios terciarios también poseen tres membranas ya que tanto la vesícula del hospedero como la membrana celular del huésped se digieren parcialmente dejando solamente las tres membranas más internas provenientes de los plastidios de origen secundario.

Los plastidios terciarios se hallan en los dinoflagelados, los cuales parecen haber servido de hospederos a por lo menos cinco tipos de huéspedes con plastidios secundarios (algas de las divisiones Chlorophyta, Bacillariophyta, Cryptophyta, Chrysophyta y Haptophyta).

Este origen múltiple de los plastidios en los dinoflagelados se ha puesto en evidencia mediante estudios detallados de la composición bioquímica y de la biología molecular de distintas especies de éste grupo de algas.

El Cuadro 3 muestra que hay cuatro tipos de clorofila (*a*, *b*, *c* y *d*) distribuidas entre los distintos grupos algales. La clorofila es el pigmento principal gracias al cual se hace posible la fotosíntesis, el proceso químico que permite a las algas elaborar su alimento. La finalidad de la fotosíntesis es la producción de glucosa, un carbohidrato que luego es guardado bajo distintas formas químicas como reserva alimenticia para el alga.

La energía requerida para la elaboración de la glucosa proviene del sol y es precisamente la clorofila la que absorbe la energía solar y la transmite a otras moléculas encargadas de la producción misma de la glucosa a partir del dióxido de carbono, que las algas obtienen de su medio ambiente. Tanto la clorofila como el resto del mecanismo fotosintético están localizados dentro de los plastidios y los materiales de reserva que se generan a partir de la fotosíntesis, pueden guardarse allí mismo o en el citoplasma de la célula.

A partir del Cuadro 3 también se puede inferir como se hallan distribuidos los distintos tipos de clorofila entre las clases de algas. Los grupos algales que no poseen plastidios tienen clorofila *a* o clorofila *a* y *b*. Los plastidios de origen primario poseen clorofila *a*, clorofila *a* y *b* o clorofila *a* y *d*. Los plastidios de origen secundario clorofila *a* y *b* o clorofila

a y *c*, mientras que los plastidios de origen terciario contienen clorofila *a* y *c*.

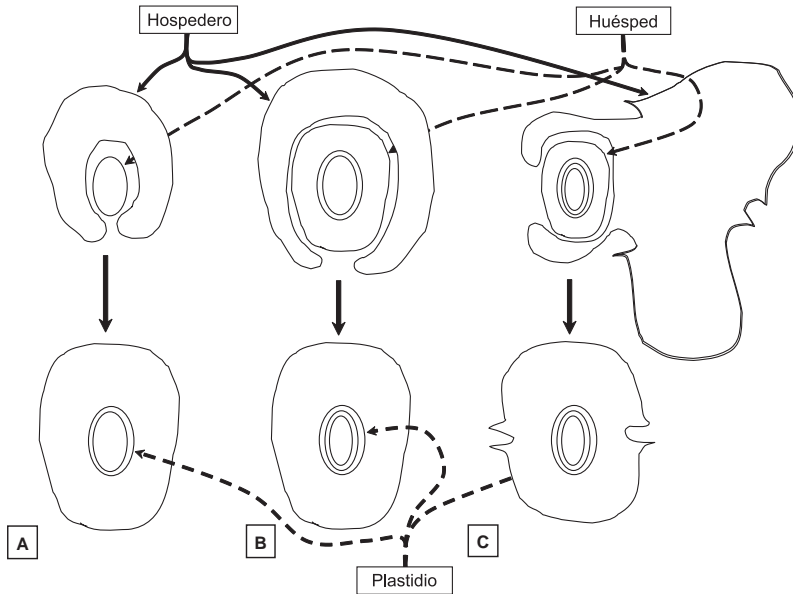
Los distintos tipos de clorofila absorben sólo parte de la luz solar por lo cual las algas han desarrollado una serie de pigmentos complementarios que absorben una porción adicional de la luz, pasan la energía a la clorofila y ésta al mecanismo que produce la glucosa. Estos pigmentos complementarios son muy variados y cada grupo algal posee sus propios pigmentos característicos.

En casos particulares, como en las algas rojas, los pigmentos complementarios que poseen (llamados ficobiliproteínas) les permiten aprovechar la luz a profundidades de hasta 200 m. donde otras algas no pueden desarrollar.

Los materiales de reserva varían de grupo a grupo algal, y en su gran mayoría corresponden a carbohidratos complejos llamados polisacáridos que surgen por agregación de monosacáridos (glucosa y otros carbohidratos simples).

En algunos casos el material de reserva está constituido por aceites (lípidos) que se almacenan en el citoplasma. Estudios comparativos de la composición química del petróleo, aceites naturales que se hallan en depósitos subterráneos (y constituyen la base económica de muchos países del mundo) y los aceites de reserva producidos por algunas algas, demuestran claramente que tales depósitos se originaron a partir de aceites de reserva algales que se acumularon paulatinamente al término del ciclo vital de las algas y a través de millones de años.

Figura 4. Origen de los plastidios algales



La figura muestra el origen de tres tipos de plastidios primario (A), secundario (B) y terciario (C). Nótese que en el caso de los plastidios terciarios el hospedero (dinoflagelado) disloca las placas celulósicas que posee justo por debajo de la membrana celular. Una vez que el huésped se halla dentro del citoplasma las placas se reacomodan. A través de millones de años de evolución la relación huésped-hospedero se hizo más estrecha generando así los plastidios.

Nutrición

Como se indicó líneas arriba, el modo principal de elaboración del alimento de las algas es la fotosíntesis. Sin embargo, dentro de las materias primas que el alga necesita para su subsistencia no sólo está el dióxido de carbono (que es convertido en glucosa) sino también una serie de elementos químicos que cumplen diversos roles en el metabolismo algal.

Entre éstos elementos resaltan el fósforo, el nitrógeno y el azufre, que son utilizados por las algas como fuente de energía y como constituyente de las proteínas necesarias para matener la maquinaria celular o para producir más células algales. Otros elementos que también son importantes son el calcio y el hierro que son elementos constituyentes de la pared celular y de la molécula de clorofila, respectivamente. Muchas algas también requieren elementos traza (químicos requeridos en mínimas cantidades) y vitaminas.

No todas las algas son fotosintéticas, existen algunas que pierden ésta capacidad y adquieren sus alimentos mediante fagocitosis o ingestión directa. Para éste efecto, el alga rodea a su alimento con la membrana celular la cual forma una bolsa que luego se desprende hacia el interior de la célula dejando al alimento ingerido en una vesícula interna que luego digiere sus contenidos y son aprovechados por las células. Cabe hacer notar que la fagocitosis es el mecanismo por el cual la endosimbiosis se hizo posible, sólo que en el caso de los plastidios y otros organelos el proceso de digestión del alga ingerida quedó truncado (Figura 4).

Pared celular

En la mayor parte de los casos la composición de la pared celular es orgánica y las moléculas que la componen pueden ser polisacáridos o proteínas. En algunas instancias la pared celular está mineralizada. La pared celular puede estar ausente como sucede en aquellas algas cuyas células están rodeadas solamente por la membrana celular. Cuando está presente, la pared celular se halla compuesta por una sólo

pieza que rodea a la célula en su integridad o puede estar conformada por una o más partes que se empalman perfectamente a manera de azulejos y confiriendo rigidez y protección a las células que las poseen. En la mayoría de los casos la pared celular es secretada por el organelo llamado Aparato de Golgi que se halla en el citoplasma celular y desde donde envía los materiales para la construcción de la pared dentro de vesículas a manera de bolsitas. El Cuadro 3 presenta las distintas variaciones en la composición de la pared celular a través de los distintos grupos algales.

Reproducción y ciclos vitales

La modalidad de reproducción algal varía grandemente según el grupo. De manera muy general, existen dos tipos de reproducción: asexual y sexual, en ésta última participan gametos o células especializadas para la reproducción que generalmente contienen la mitad de la información genética de cada progenitor y que luego de unirse (fertilizarse) generan un nuevo organismo con la misma cantidad de ADN típica de la especie. Si bien existen grupos de algas que se reproducen sólo asexualmente (el caso de las algas verde azules), la mayoría de las algas eucariontes alternan métodos de reproducción sexual y asexual a lo largo de su ciclo vital.

Las modalidades de reproducción asexual son variadas y van desde la simple división mitótica de una célula en otras dos células, las que luego regeneran el tamaño original de la célula progenitora, hasta procesos de fragmentación del talo (en el caso de algas coloniales y filamentosas) con la consiguiente regeneración de un nuevo talo parecido al

original y además con la misma información genética (clones del organismo inicial). En algunos casos la reproducción asexual se efectúa por varias divisiones mitóticas que generan numerosas células más pequeñas que la original y que pueden o no poseer flagelos. Las células que se producen de ésta manera se llaman esporas y en caso de tener flagelos se llaman zoosporas por su gran parecido morfológico con animales microscópicos.

Las modalidades de reproducción sexual son mucho más complejas. La generación de gametos se realiza mediante meiosis, proceso que conduce a la reducción por la mitad del material genético de la célula.

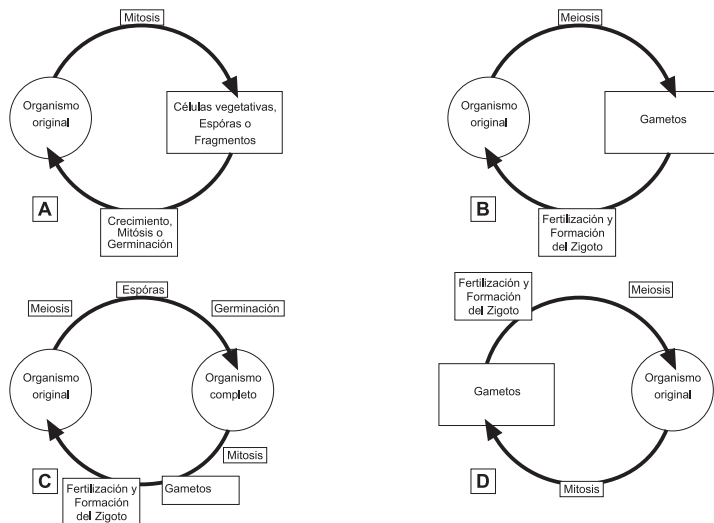
De acuerdo a la morfología de los gametos y dependiendo de si estos poseen flagelos se reconocen cuatro tipos de sexualidad en las algas. La **isogamia**, cuando los dos gametos producidos por los progenitores son iguales y ambos poseen flagelos. La **heterogamia**, cuando ambos gametos son flagelados pero uno es más grande que el otro. La **oogamia**, cuando uno de los gametos (generalmente el femenino) es más grande y no posee flagelos. El cuarto tipo, que es una **variación de la oogamia** en la que el gameto masculino también ha perdido la motilidad y es además mucho más pequeño que el gameto femenino.

Los ciclos vitales de las algas también varían grandemente desde ciclos simples, en los que la modalidad única de reproducción es la asexual, hasta ciclos donde existen alternaciones de generaciones sexuales y asexuales (Figura 5). Estos últimos se dividen en varias categorías de acuerdo a la fase en la que se produce la meiosis.

La Figura 5 muestra tres variaciones de ciclos vitales en los que existen alternaciones entre fases asexuales y sexuales y donde la meiosis sucede durante la formación de gametos (meiosis gamética), durante la formación de esporas (meiosis espórica) que generan organismos completos los que a su vez producen gametos, y durante la producción del cigoto (meiosis cigótica). Cada una de éstas variaciones tienen subcategorías según el grupo algal.

En muchos casos existen alternaciones de varias generaciones dentro del mismo ciclo donde cada generación tiene una morfología propia y distinta a la de las otras generaciones.

Figura 5. Tipos de ciclos vitales presentes en algas



A. Ciclo vital típico de organismos asexuados. **B.** Ciclo vital con meiosis gamética. **C.** Ciclo vital con meiosis espórica. **D.** Ciclo vital con meiosis cigótica. En éste último caso el organismo original ya posee la mitad de la información genética y durante la fusión de gametos se produce un cigoto con el doble de la información, por tanto éste cigoto debe pasar por la meiosis para restablecer la cantidad normal de material genético en la especie.

ECOLOGÍA DE LAS ALGAS

Las algas en su conjunto son un grupo evolutivo y ecológicamente muy exitoso que han logrado colonizar la gran mayoría de ecosistemas del planeta. Existen algas en condiciones de extrema contaminación así como en aguas cuyo contenido de nutrientes es mínimo. Muchas algas están adaptadas a temperaturas extremas desarrollándose en la nieve y el hielo en regiones del planeta como la Antártida o en aguas termales donde el medio líquido está muy cercano al punto de ebullición.

A través de su historia evolutiva, las algas han desarrollado una serie de mecanismos que las adaptan a los medios en los que viven. Vivir en un medio salino como en el mar, por ejemplo, implica el poseer mecanismos osmoreguladores (reguladores de la presión intracelular) que impidan que las células se plasmolícen (pierdan su contenido líquido) debido a las concentraciones extremas de sales en el medio externo. Existen así algas que incluso se hallan adaptadas a condiciones hipersalinas, como sucede, por ejemplo, con las algas verdes y diatomeas que se desarrollan en Laguna Colorada y otros ecosistemas de condiciones extremas propios de la Cordillera Andina.

Un análisis de los requerimientos nutricionales de las algas muestra que existen muy pocos nutrientes que actúan como limitantes para su crecimiento. Es decir, los diversos ecosistemas acuáticos o terrestres siempre presentan condiciones que pueden ser favorables para un grupo u otro. Cuando se trata de grupos específicos, el caso es diferente. Para algunas diatomeas, por ejemplo, el factor limitante pueden ser la carencia de suficiente nitrógeno y

fósforo que les impidan obtener energía y materia prima para la elaboración de proteínas, éstas últimas muy importantes para la producción de nuevas células. Aunque muy raramente, la carencia de sílice en el medio acuático puede ser un factor limitante para las diatomeas ya que éstas lo requieren para la elaboración de su pared celular.

Otro elemento que puede ser limitante es el hierro que forma parte importante de la estructura química del alga, especialmente enzimas (moléculas que facilitan las reacciones químicas dentro de las células). Este elemento es limitante en cuanto y tan pronto como ingresa al medio acuático proveniente de la atmósfera u otra fuente, se combina rápidamente con otros elementos escapando así a la absorción por parte de las algas.

Se han realizado experimentos cerca de las islas Galápagos en los que se han añadido grandes cantidades de hierro soluble directamente al mar para facilitar el crecimiento de diatomeas y así paliar el incremento de dióxido de carbono en la atmósfera a raíz de la acción del hombre (combustión de carbón fósil, automóviles, industria, etc.).

Los experimentos han sido favorables aunque todavía existen varios factores que se deben manipular de manera más efectiva. En resumen, el dióxido de carbono atmosférico en la zona circundante al campo experimental se redujo gracias al incremento de la actividad fotosintética de las diatomeas favorecidas por la adición de hierro.

Plasticidad fenotípica y ecología de las algas

Aún cuando las algas se hallen en condiciones desfavorables, la plasticidad fenotípica les permite producir un estado morfológico o fisiológico que las adapta mejor a las condiciones prevalentes. Cuando existen fluctuaciones marcadas en las concentraciones de nutrientes, por ejemplo, las algas han desarrollado mecanismos de absorción de cantidades excedentes de nutrientes que son acumulados para cuando sean escasos en el medio ambiente. De la misma forma, si el alga vive normalmente en el agua y ésta se seca por alguna razón, el alga tiende a producir estadíos de resistencia que generalmente hallan su refugio en los sedimentos de mares, lagos y ríos aguardando a que las condiciones propicias de humedad sean restablecidas.

Quando se trata de cambios lumisosos extremos, que afectan la fotosíntesis, también existen cambios marcados en el fenotipo de los individuos para poder mantener la producción normal de glucosa en la célula. Este proceso se llama adaptación cromática y es posible gracias a que moléculas especializadas en el alga sensan cambios de luz en el medio, y la maquinaria genética al recibir ésta información estimula la producción de aquellos pigmentos complementarios que le permiten al alga aprovechar mejor las nuevas condiciones luminosas.

Anteriormente ya se había expuesto el caso de los dinoflagelados que cambian su forma de acuerdo a variaciones en la turbulencia en el medio acuático y el caso de *Scenedesmus* que cambia su nivel de organización celular para paliar la acción de los depredadores. Ambos mecanismos tienen consecuencias ecológicas favorables para las algas.

Tipos de comunidades algales

Dentro de cada ecosistema, las algas ocupan lugares específicos desarrollando comunidades con características diversas y muy propias del lugar habitado (Cuadro 6). Cada una de éstas comunidades funciona de una manera particular y de acuerdo a los componentes de esa comunidad. Por ejemplo, el fitoplancton (comunidad de algas que flota en la columna de agua) está sujeto a los movimientos del agua, a las variaciones en las concentraciones, distribución de los nutrientes en ese medio acuático y a la presencia de depredadores.

Dentro de la comunidad fitoplanctónica misma, cada especie algal está compitiendo con otras por nutrientes, luz y espacio (competencia interespecífica). Los individuos de una misma especie también están compitiendo entre sí por los mismos factores citados con anterioridad (competencia intraespecífica). Es así, que cada especie ha desarrollado una serie de adaptaciones que hacen que esa especie aproveche de mejor manera los recursos que le brinda su medio y esas adaptaciones varían de individuo a individuo.

En el caso específico de algas planctónicas las adaptaciones necesarias para su subsistencia son aquellas que les permitan permanecer por más tiempo suspendidas en la columna de agua (adaptaciones para la flotabilidad), aquellas que les permitan aprovechar de manera más eficiente las cantidades fluctuantes de luz (adaptaciones a nivel de pigmentos fotosintéticos), aquellas destinadas a consumir más rápidamente los nutrientes disponibles (desarrollo de mecanismos más eficientes para la obtención de nutrientes), etc.

Si se trata de aspectos de flotabilidad, las algas han desarrollado varios mecanismos que les permiten mantenerse más tiempo en la zona donde existen cantidades suficientes de luz para la fotosíntesis y nutrientes para la elaboración de sus alimentos. Muchas especies secretan mucílagos que al ser menos densos que el agua tienden a flotar y son utilizados como "salvavidas" por las células que los secretan. Otras especies producen talos filamentosos que ofrecen mayor resistencia a la gravedad, aún otras, como es el caso de muchas algas verde azules, han desarrollado una serie de mecanismos para la producción de burbujas de gas dentro del citoplasma que las mantienen a flote y hasta pueden regular con mucha precisión su posición en la columna de agua.

Respecto a las condiciones de luminosidad, los distintos grupos de algas poseen diversas clorofilas y pigmentos complementarios que las adaptan a distintas profundidades en la columna de agua. Las algas que poseen pigmentos adaptados para captar porciones de la luz solar que tienen mayor energía (y por ende pueden penetrar más adentro en la columna de agua) generalmente desarrollan mejor a mayores profundidades.

El problema se presenta cuando las algas adaptadas a absorber rayos luminosos de menor energía (que penetran sólo hasta cierta profundidad en la columna de agua) se acercan mucho a la superficie del agua debido a movimientos erráticos propios del medio acuoso. A éstas profundidades menores, la clorofila y los pigmentos complementarios pueden ser severamente afectados en su estructura química (un proceso llamado fotooxidación) debido a la gran energía

de los rayos ultravioleta provenientes del sol y el alga puede perder su capacidad fotosintética y finalmente morir. Para paliar éste problema, las algas han desarrollado un mecanismo químico que protege a los pigmentos fotosintéticos de la incidencia directa de la luz solar. Los químicos que cumplen la función de escudos contra la luminosidad excesiva se denominan carotenoides.

El problema de la absorción de nutrientes es un poco más complejo e implica toda una maquinaria celular representada por moléculas que tienen una afinidad química por los nutrientes. Las algas con más éxito en la absorción de nutrientes serán aquellas que presenten una mejor

distribución de las moléculas que captan nutrientes a lo largo de la superficie que el alga expone a su medio circundante.

Por tanto, la forma de las células también tiene mucho que ver con la cantidad y la velocidad con la cual un alga aprovecha los nutrientes de su medio. Células que tienen una mayor superficie expuesta al medio acuático y que a su vez tengan una pared y membranas celulares más fluidas (que faciliten el paso de nutrientes hacia el interior de la célula con mayor eficiencia) y con mayor capacidad de retención de nutrientes, serán las que tengan mayores probabilidades de sobrevivencia.

CUADRO 6. Las distintas comunidades algales que se encuentran en varios ecosistemas

Ecosistema	Comunidad	Definición
Acuático	Fitoplancton	Algas que flotan en la columna de agua donde existe suficiente luz y nutrientes para su subsistencia.
	Perifiton (llamado también Bentos)	Algas que crecen sobre distintas superficies como ser plantas acuáticas sumergidas, animales acuáticos, rocas, lodos, granos de arena, etc.
	Metafiton (ticoplancton)	Algas perifíticas que se desprenden de sus sustratos y se encuentran en la columna de agua, generalmente hacia las costas o entre densas matas de plantas acuáticas.
Terrestre	Algas de suelo	Crece entre las partículas de suelo donde existe humedad suficiente para su subsistencia.

Pero las algas no solamente viven tratando de mantenerse a flote en la columna de agua, existen también muchas especies adaptadas a vivir sobre substratos (superficies sobre las cuales se desarrollan) y que colectivamente se conocen como perifiton. La comunidad perifítica cambia de composición según la superficie donde se desarrolle. Por ejemplo, la comunidad perifítica que crece sobre los tallos y hojas de plantas acuáticas sumergidas no es la misma que aquella que desarrolla sobre rocas o arenas o lodos, etc. Incluso existen algas perifíticas especialmente adaptadas para vivir sobre la superficie de animales acuáticos.

Las adaptaciones a la vida perifítica son también múltiples, muchas algas se adhieren al substrato por medio de la secreción de mucílago que es una sustancia pegajosa. Las secreciones de mucílago varían desde simples almohadillas hasta pedicelos simples o ramificados e inclusive tubos dentro de los cuales viven varios organismos de una misma especie. Las diatomeas por ejemplo, producen éstos tres tipos de adaptaciones, una vez que los organismos que secretan mucílago se han establecido sobre el tallo de una planta o la superficie de una roca, otras algas e inclusive bacterias y hongos se adhieren al mucílago estableciéndose así una comunidad que alcanza un alto grado de complejidad en cuanto a las interrelaciones entre los organismos que la componen.

En general, una comunidad perifítica puede ser visualizada como una capa gelatinosa encima de una superficie sumergida en la cual están embebidos todos los organismos que componen esa comunidad. Inclusive, existe una zonación en la distribución de esos organismos, tal y como sucede con la estratificación de un bosque de plantas superiores

que va desde las copas de los árboles hasta los hongos y bacterias que descomponen la materia orgánica en la superficie del suelo.

Ya que son los productores primarios de los ecosistemas en los que viven (son el primer eslabón que produce alimentos y sostiene al resto de la cadena alimentaria), las algas están constantemente sujetas a la depredación por parte de numerosos organismos.

Entre los depredadores más comunes se hallan protozoos, rotíferos, crustáceos, insectos y moluscos que constantemente se alimentan de las algas tanto flotantes como perifíticas. Las algas han desarrollado también varios mecanismos de defensa contra sus depredadores, las más pequeñas poseen mucílago, espinas, o se organizan en filamentos largos que exceden la capacidad de ingestión de los animales.

Algunos grupos de algas como las criptófitas y los dinoflagelados producen pequeños proyectiles de mucílago o de proteína que son secretados violentamente al medio externo en presencia de depredadores. Las funciones de éstos proyectiles son más bien las de confundir o asustar a los depredadores ya que las velocidades a las que se expelen no son suficientes para producir lesiones. Otras algas poseen mecanismos químicos destinados a confundir o a modificar el comportamiento de los depredadores.

Treinta especies de dinoflagelados marinos, por ejemplo, poseen un mecanismo de bioluminiscencia mediante el cual producen una luz intensa en cuanto las aguas que los rodean son disturbadas por la presencia del depredador.

La bioluminiscencia en dinoflagelados es posible gracias a bolsitas especiales localizadas en toda la periferie de la célula y que contienen una sustancia llamada luciferina (que en latín significa "portadora de fuego") y que despiden luz a raíz de cambios en el medio acuático externo a la célula. Cuando los dinoflagelados producen densas poblaciones, las aguas de bahías enteras pueden "encenderse" por la noche. Estas bahías tienden a ser sitios turísticos, tal como ocurre con la localidad de La Parguera en Puerto Rico, donde se ha determinado que existen concentraciones de hasta 30,000 células de dinoflagelados por litro de agua de mar, las cuales despiden luz a medida que los barcos surcan las aguas.

En muchos casos de macroalgas (las que se pueden ver sin la ayuda de microscópios) marinas, el mecanismo de defensa contra depredadores se manifiesta en la producción de químicos que afectan la palatabilidad (el gusto) de sus talos. Muchas de las sustancias que se producen con éste propósito son muy amargas o muy ácidas para el gusto de los depredadores o en casos extremos la sustancia puede incluso modificar el ciclo vital de depredador. Estudios recientes muestran que algunas diatomeas marinas producen compuestos químicos que modifican el ciclo reproductivo de los copépodos, sus depredadores más comunes. Los copépodos son pequeños crustáceos (generalmente de 1 a 2 mm. de tamaño) que se consideran como los organismos que producen la mayor cantidad de biomasa en el planeta.

Varios experimentos han demostrado que los copépodos tienden a producir menos huevos (resultado de la reproducción sexual) o los huevos son menos viables cuando están sometidos a una alimentación en base a diatomeas.

Los compuestos que tienen éste efecto son aldehídos que actúan sobre las células embrionarias de los copépodos, evitando de que se dividan mitóticamente. Cabe mencionar que éstos mismos aldehídos producidos por las diatomeas y refinados en el laboratorio son utilizados en investigaciones sobre el cáncer. Los experimentos demuestran que los aldehídos evitan la proliferación de células cancerosas.

Muchas diatomeas marinas también producen un químico llamado ácido domoico, una neurotoxina que afecta directamente a los depredadores o indirectamente al hombre cuando consume mariscos (específicamente almejas, ostras y otros que se alimentan mediante filtración) que acumulan el químico en sus tejidos. Han existido casos de muerte en humanos por efecto del ácido domoico y la detección del químico en zonas costeras puede tener serias consecuencias económicas para los centros pesqueros.

Asociaciones de las algas con otros organismos

Además de las comunidades algales mostradas en el Cuadro 6, las algas forman numerosas asociaciones simbióticas con otros organismos. La simbiosis se define como una relación beneficiosa para los organismos que componen la asociación.

En todos los casos, el alga provee alimentación y los animales u otros organismos proveen las materias primas y protección para el alga. Las relaciones simbióticas de mayor importancia a nivel planetario son los corales y los líquenes. Los corales son colonias de animales minúsculos llamados pólipos. Los pólipos contienen en su interior células de algas que se denominan zooxantelas las cuales proveen

alimento para el mantenimiento del pólipo y para la colonia de coral en general. Los corales son muy importantes para la ecología del planeta en ambientes marinos ya que cubren un 1% del planeta pero además sirven de refugio a numerosos animales y otros organismos formando las comunidades conocidas como arrecifes de coral. Los corales son extremadamente sensibles a la contaminación y por tanto están siendo amenazados por el desarrollo descontrolado de la industria y por la sobrepoblación de zonas aledañas a las costas.

Se dice que los líquenes son la forma predominante de vegetación (aunque no son vegetales propiamente dichos) sobre el planeta y cubren un 8% de la superficie de la tierra. Los líquenes son asociaciones entre algas y hongos en las que ambos organismos mantienen su independencia en caso de separarse, pero que cuando crecen en conjunto colaboran, uno (el hongo) proveyendo protección y condiciones propicias de humedad y de luz y el otro (el alga) suministrando los alimentos (principalmente glucosa) a su protector.

Tanto algas verde azules como algunos grupos de algas verdes forman parte de líquenes, los cuales son el sostén de la cadena alimentaria, especialmente en ambientes de temperaturas bajas extremas. En ecosistemas terrestres de la Antártida, por ejemplo, existen sólo dos especies de plantas pero 350 de líquenes. Los líquenes son también extremadamente sensibles a la contaminación, especialmente a altas concentraciones de dióxido de carbono, por lo cual han sido utilizadas como indicadores de contaminación urbana.

USOS Y BENEFICIOS DE LAS ALGAS

¡Si estamos aquí, es gracias a las algas!

Los primeros organismos fotosintéticos que aparecieron en el planeta fueron las algas verde azules, llamadas también cianobacterias, que se desarrollaron en ambientes marinos. Los primeros fósiles de cianobacterias datan de hace más de 4.000 millones de años (Era Arcaica), un tiempo en que la atmósfera era adversa para la vida debido a altas concentraciones de químicos nocivos como el monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno (entre otros) y a las amplias variaciones en la temperatura que oscilaban entre 0 y 100° C.

La acumulación paulatina del oxígeno producido por medio de la fotosíntesis cianobacteriana condujo a la formación de la capa de ozono que aisló a la tierra de la intensa luz solar (rayos ultravioleta) y gradualmente produjo una atmósfera más parecida a la actual.

La evidencia fósil indica que las cianobacterias fueron el tipo de vida dominante sobre la tierra por lo menos por unos 1.000 millones de años. En éste lapso se formaron numerosos nichos terrestres y dulceacuícolas, los cuales fueron rápidamente colonizados después de la aparición de los primeros eucariontes, generándose así una gran diversidad de ecosistemas y asociaciones biológicas. A medida que el tipo de vida eucarionte evolucionaba se fueron generando las primeras plantas y los primeros animales los que en el transcurso de la historia geológica del planeta dieron como resultado a la flora y fauna actuales, incluyendo al hombre.

Las primeras cianobacterias han dejado un registro fósil notable en forma de estromatolitos. En zonas costeras poco profundas, las cianobacterias perifíticas actuales, y muy probablemente también las cianobacterias de la era arcaica, producen densas matas recubiertas de mucílago y a medida que fotosintetizan liberan al medio el ión bicarbonato que se combina con el calcio disuelto en el agua depositando carbonato de calcio sobre la capa verde azul.

Este compuesto junto con otras partículas disueltas en el agua quedan embebidos en el mucílago y poco a poco se compactan dando origen a montículos laminados que crecen con el tiempo convirtiéndose en estromatolitos. Los estromatolitos más antiguos son aquellos hallados en Warrawoona, Australia que datan de hace más de 3.500 millones de años. Actualmente las cianobacterias siguen produciendo estructuras estromatolíticas siendo las más notables los de la Bahía del Tiburón, Australia y las de isla Exuma en las Bahamas.

Ciclos biogeoquímicos

Las algas normalmente producen densas poblaciones que saturan el medio en el que viven. Estos crecimientos masivos se denominan floraciones algales y pueden tener serias consecuencias tanto favorables como adversas para los ecosistemas. Cualquiera sea el caso y a raíz de ésta proliferación tan profusa, las algas participan en el ciclo de numerosos elementos restringiendo o facilitando su disponibilidad para otros organismos que viven en el mismo medio ambiente. Antes ya se habló del rol de las cianobacterias en el ciclo del oxígeno en paleoambientes que modificaron la atmósfera del planeta entero y por ende

el ciclo de muchos otros elementos en los medios aéreo y terrestre.

En la actualidad las algas siguen produciendo un 25% del oxígeno disponible en la atmósfera y al mismo tiempo, también a través del proceso fotosintético, inciden en el ciclo del carbono el cual pasa de dióxido de carbono a carbono orgánico que luego sirve como fuente de alimentación para organismos consumidores (depredadores) y de fuente de energía para organismos descomponedores (recicladores).

Mucho del carbono orgánico contenido en las células algales no llega a ser descompuesto ya que tiene una estructura química que no puede ser alterada por las enzimas de los descomponedores bacterianos. Este tipo de carbono orgánico se precipita quedando enterrado en los sedimentos de ecosistemas acuáticos. Es así que la fotosíntesis algal provee un buen mecanismo de depuración del aire y el agua. Como ya se había dicho anteriormente, el proceso de remoción de dióxido de carbono por parte de las algas está siendo utilizado por el hombre para reducir los altos niveles de éste elemento proveniente de la contaminación industrial y automotriz.

Las algas también cumplen un rol primordial en el ciclo del nitrógeno que se halla tanto en el medio atmosférico como acuático. Las algas absorben productos nitrogenados, especialmente amoníaco y nitratos, para utilizarlos en la elaboración de proteínas. Especialmente las algas verde azules están adaptadas al consumo masivo de nitrógeno atmosférico gracias a que poseen células especializadas llamadas heterocistos, los que convierten nitrógeno gaseoso

(el elemento más abundante en nuestra atmósfera) en amoníaco que luego es utilizado por la maquinaria celular (Figura 1).

Cuando se producen floraciones de algas verdes azules las células excretan hasta un 60% de ese amoníaco, el cual está inmediatamente disponible para su uso por parte de otras algas y plantas acuáticas. En ambientes terrestres, el amoníaco liberado por las cianobacterias es aprovechado por hongos, hepáticas y antocerotes con los cuales las algas forman asociaciones simbióticas. Estudios recientes han demostrado que las algas también tienen una alta incidencia en el control de patrones climáticos locales a través de su participación de el ciclo del azufre. El azufre es utilizado por el alga para la elaboración de proteínas y algunos lípidos que son parte constitutiva de los plastidios.

Muchas algas también producen grandes cantidades de dimetilsulfoniopropionato (DMSP) que es utilizado como un osmoregulador celular y como protector contra el frío (anticongelante) en regiones frías del planeta. Las moléculas de DMSP pueden ser liberadas al medio acuático y de ahí pasan por difusión a la atmósfera donde se convierten en aerosoles sulfatados que tienen un efecto marcado sobre la formación de nubes.

La formación de nubes conduce a un cambio climático regional determinando variaciones drásticas en la cantidad de luz incidente sobre la superficie del agua y la tierra y, por ende, cambios marcados en la temperatura de la región (efecto de enfriamiento). Otras especies de algas producen halocarbonos, compuestos volátiles que contienen bromo y cloro.

Una vez liberados al medio acuático pasan a la atmósfera para formar radicales de cloro, bromo e hidróxilo que son destructivos para la capa de ozono que protege al planeta de la luz ultravioleta proveniente del sol. Mitad de los halocarbonos existentes en la atmósfera se producen a partir de la utilización de productos como pesticidas y anticongelantes, la otra mitad proviene de fuentes naturales; las microalgas marinas (aquellas que se ven sólo con la ayuda del microscopio) producen una cantidad significativa de ésta última mitad.

Alimentación

Existen datos que muestran que las algas han sido utilizadas por el hombre como alimento desde hace más de 4.000 años, especialmente por parte de poblaciones asiáticas que aún hoy cultivan, consumen y exportan grandes cantidades de diversas algas y productos algales relacionados con la alimentación.

La industria alimenticia basada en macroalgas marinas mueve una porción significativa de la economía japonesa, china y coreana. El uso de productos algales marinos provenientes de esos países ha trascendido sus fronteras y tales productos se pueden conseguir prácticamente en cualquier parte del mundo.

Las macroalgas marinas que comúnmente se conocen como "yerbas marinas" pertenecen a tres grupos algales distintos: algas pardas, algas rojas y algas verdes. Estos tres grupos tienen representantes que se consumen como alimento y cada uno de ellos varía en sus propiedades nutritivas. En general, las algas marinas son una fuente importante de

proteínas conteniendo hasta un 30% de éstos nutrientes en peso seco.

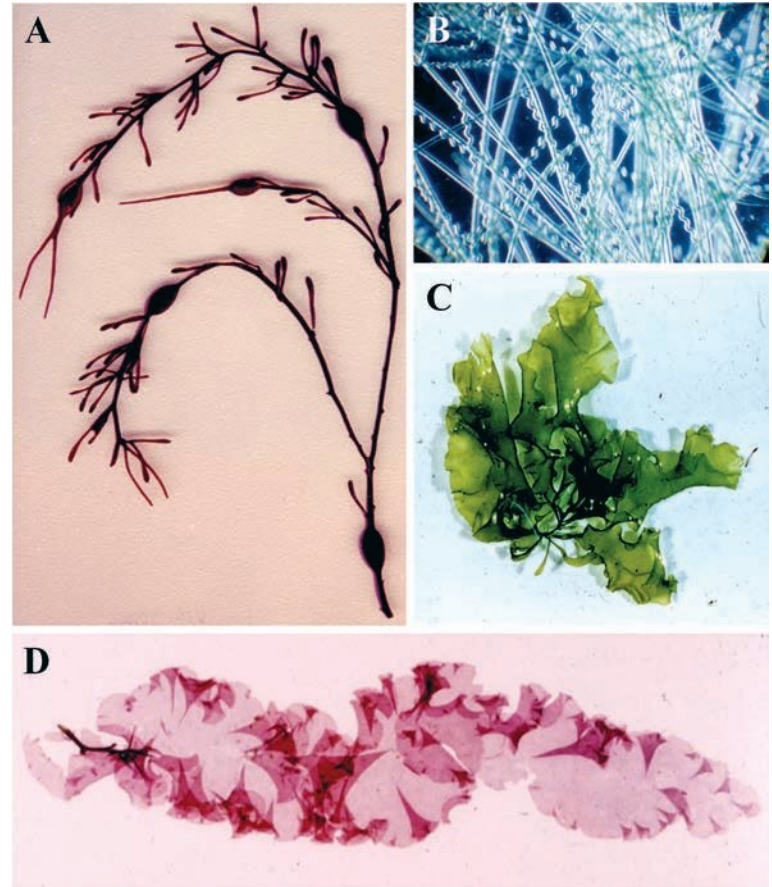
Las macroalgas también contienen numerosas vitaminas como A, B1, B12, C, D, E, riboflavina, niacina y ácidos pantoténico y fólico. Además, las algas comestibles contienen todos los elementos traza requeridos en la alimentación humana.

También las microlagas se usan como fuente alimenticia. Las cianobacterias *Spirulina* y *Nostoc* están dentro de los suplementos alimenticios más importantes en los mercados Europeos y de Estados Unidos. El contenido proteínico de *Spirulina* es de hasta 60%, cantidad que es comparable o más alta que la carne, representando así una buena opción especialmente en países con alta incidencia de pobreza.

Los países de la zona andina, incluyendo Bolivia, tienen una larga tradición en la utilización de varias especies de *Nostoc* (conocidas como llullucha o murmunta) las cuales se cosechan directamente de los ecosistemas acuáticos donde crecen. Las algas también son utilizadas como forraje para animales, especialmente ganado vacuno, bovino y equino.

Los animales se alimentan directamente en zonas costeras o las algas son extraídas para la preparación de mezclas balanceadas. La industria de alimento balanceado utilizando algas, especialmente algas pardas, mueve una economía de más de 10 millones de dólares anuales.

Figura 6. Ejemplos de algas de importancia directa para el hombre



A. Macroalga parda *Ascophyllum* del cual se extraen alginatos. **B.** Microalga verde azul filamentosa *Spirulina*, un complemento alimenticio de alto contenido proteínico. Sólo *Spirulina* es dulceacuícola y se halla en ecosistemas bolivianos, el resto son marinas. **C.** Macroalga verde *Ulva* comestible y de la cual se extrae agar agar. **D.** *Porphyra*, macroalga roja comestible y fuente de carrageninas.

En algunos países los carotenoides (pigmentos complementarios) algales se han utilizado en la alimentación de gallinas, las cuales producen huevos con yemas coloreadas de un amarillo más intenso, un atractivo especialmente para consumidores asiáticos. Actualmente el color amarillo de las yemas se produce con las xantofilas (pigmentos complementarios) de varias plantas superiores (sorgo, alfalfa, etc.) cuyos costos son menores a aquellos de las algas.

Industria

Son muchos los productos algales que se utilizan a nivel industrial con ganancias considerables para las economías locales y nacionales de muchos países, especialmente aquellos con zonas costeras. Un grupo de éstos productos recibe el nombre de ficocoloides que son de tres tipos: alginatos, carrageninas y el agar agar.

Los alginatos son polímeros (cadenas largas de carbono) de dos ácidos derivados de polisacáridos: manurónico y gulurónico. Las propiedades dentro del alga son múltiples y se hallan en cantidades relativamente grandes en los talos parenquimáticos de algas marinas, principalmente a nivel de pared celular en algas pardas. La producción mundial de alginatos se estima entre 15 a 17.000 toneladas anuales con valores mayores a 100 millones de dólares. Sales de alginatos se utilizan para la fabricación de barnices y cubiertas para acabados de papel y tela.

Los alginatos también tienen la propiedad de mantener substancias en suspensión por lo que se adhieren a pinturas, cosméticos, jarabes medicinales, productos

comestibles como helados y otros derivados lácteos. Alginatos de calcio son utilizados para la elaboración de papel celofán, geles de todo tipo, inclusive aquellos utilizados en la medicina como lubricantes no grasosos; los dentistas usan los alginatos para hacer moldes. Algunos alginatos son resistentes a la tensión y se usan en la fabricación de telas también resistentes a descomposición bacteriana y mucho menos inflamables que las fibras vegetales.

Las carrageninas se encuentran en las macroalgas rojas y químicamente corresponden a polímeros de galactosa con distintas funciones en los talos de las algas que los producen. Estos compuestos se usan en la industria como emulsificantes y estabilizantes de productos lácteos y jugos de frutas. También son utilizados como protectores y fortificantes en la industria textil y de cuero. Las carrageninas son también los emulsificantes predilectos en la producción de jarabes medicinales.

El agar agar es una substancia gelatinosa también extraída de varias algas rojas y cuya estructura química corresponde a la del polisacárido agarosa con una porción de sulfatos y piruvatos. El agar agar también cumple múltiples funciones en el alga encontrándose en tanto las partes vegetativas como reproductivas. La producción anual de éste producto asciende a 10.000 toneladas con valores que exceden los 50 millones de dólares.

Una de las principales aplicaciones del agar agar en la elaboración de medios de cultivo utilizados en bacteriología para el cultivo de microorganismos, lo cual tiene una gran incidencia en hospitales, industria farmacéutica (cuando se investiga la efectividad de nuevas drogas sobre los

microorganismos) y en centros de enseñanza e investigación científica.

En los últimos años el agar agar se ha utilizado en electroforésis, un método eléctrico para la separación de sustancias de distintos pesos moleculares con grandes aplicaciones en la biología molecular. En la industria alimenticia el agar agar se usa para evitar la desecación de panes y productos de repostería y en la elaboración de quesos y enlatado de carnes de todo tipo. El agar agar también se usa en la producción de filmes para fotografía, para el acabado de telas de todo tipo, la fabricación de jabones, la industria de cosméticos, etc.

Otro producto algal de múltiples aplicaciones industriales es la diatomita o tierra de diatomeas compuesta por las paredes celulares de diatomeas que cuando los organismos mueren se depositan en el fondo de los océanos o grandes lagos. Ya que el sílice de las valvas de las diatomeas es resistente a la descomposición, tiende a acumularse y a formar con el tiempo extensos depósitos que luego por procesos geológicos se exponen a la atmósfera y pueden ser explotados por el hombre. Algunos depósitos de diatomita son tan vastos que se explotan con tractores y transportan con camiones gigantescos hasta los centros industriales donde el material se refina y se utiliza en la fabricación de una serie de productos.

Una de las principales aplicaciones de la diatomita es la fabricación de filtros de agua (especialmente aquellos que se utilizan en las piscinas), debido a que las valvas de las diatomeas poseen finos poros que separan con gran eficiencia las bacterias, hongos y otros del líquido que filtran.

La diatomita también se usa como abrasivo en dentífricos, para dar consistencia y dar brillo a pinturas y esmaltes y hasta en la fabricación de explosivos (para dar cuerpo a la pólvora). Una de las aplicaciones que está encontrando bastante cabida en el mercado es el uso de la diatomita para la elaboración de insecticidas que son inocuos para otros organismos. Las partículas de la diatomita son tan diminutas que penetran y tapan los poros de los insectos los cuales mueren por asfixia.

Tecnología

Una de las tendencias tecnológicas más actualizadas es la destinada a desarrollar micromáquinas, microutensilios y otra serie de artefactos minúsculos con una gama increíble de aplicaciones en el macro-mundo. La ciencia que se encarga del desarrollo de éstos objetos recibe el nombre de nanotecnología.

Muchas algas han servido y aún están bajo estudio como modelos para la fabricación de los diminutos componentes de éstos objetos. Sin duda alguna, una de las implicaciones más inmediatas de la nanotecnología es la biomedicina.

Las diatomeas, por ejemplo, se utilizan como modelos para el desarrollo de microcápsulas que liberan dosis controladas de drogas de una manera más efectiva y exactamente en el órgano del paciente donde se halla el problema. Ya que los poros de las diatomeas son de distintos tamaños, las cápsulas que se derivan de ellos pueden ser instrumentos muy precisos en la liberación de las cantidades correctas (inclusive del número correcto de moléculas) del medicamento para su utilización en las partes afectadas de cuerpo.

Las algas también han sido usadas como organismos de prueba en el desarrollo de sistemas de reciclaje en ambientes que permanecen aislados del medio externo por tiempos considerables. Tal es el caso de submarinos y naves espaciales en las que los materiales de deshecho y dióxido de carbono producidos por los tripulantes deben ser reutilizados para que al almacenarse no se conviertan en un riesgo para la salud. Los materiales de deshecho son fuentes ricas en compuestos fosfatados, nitrogenados y carbonados que son favorables para el crecimiento algal. Por otra parte, el oxígeno producido en los reactores que contienen a las algas puede ser extraído y circulado por el interior de las naves para su respiración por parte de los tripulantes, convirtiéndose así en ambientes de uso continuo.

Como se dijo con anterioridad muchos son los grupos algales que producen paredes silíceas (vidrio) y el proceso se realiza a temperaturas ambientales, contrario a lo que sucede en la industria de vidrio y cerámicas. Es así que los mecanismos algales de producción de vidrio están bajo estudio para determinar su aplicabilidad en la industria principalmente en la fabricación de cerámicas de alta resistencia, como aquellas que se usan en aviones y naves espaciales expuestas a condiciones extremas de presión y temperatura.

Una de las preocupaciones de los países altamente industrializados es la carencia y los altos costos de los hidrocarburos. Dentro de las alternativas más plausibles resalta la utilización del biodiesel derivado de algas. La combustión del biodiesel produce una cantidad mucho menor de contaminantes y es más seguro que los hidrocarburos por ser menos inflamable.

El biodiesel es además biodegradable. Se ha demostrado de que se puede extraer biodiesel de plantas como el maíz, pero los costos de producción a gran escala serían demasiado altos y los campos de cultivo tendrían que ser demasiado extensos con serias repercusiones para la ecología de regiones enteras.

Es así que las algas representan una mejor alternativa ya que producen una mayor cantidad de aceites por célula que luego pueden ser transformados en biodiesel de alta pureza y calidad.

Estudios ecológicos

Las algas cumplen varios requisitos que las convierten en una herramienta predilecta para estudios de bioindicación, la rama de la ecología que utiliza a los organismos como indicadores del impacto de las actividades del hombre en los ecosistemas.

Las algas se hallan estrechamente ligadas con su medio ambiente y responden con bastante rapidéz a cualquier cambio en las condiciones físicas y químicas que en él suceden. Una de las razones principales para ésta respuesta casi inmediata es que la gran mayoría de las algas tienen ciclos vitales cortos (reproduciéndose asexualmente en el espacio de pocas horas) y al tener sus talos estructuras relativamente sencillas, las células pueden detectar y generar reacciones en un tiempo de horas o días.

Ya que cada población posee crecimiento profuso y además un sólo ecosistema alberga varias especies a la vez, la repercusión de cualquier cambio ambiental se amplifica

varias veces y puede ser fácilmente detectado durante el análisis de muestras colectadas directamente en el campo.

Las algas habitan todos los ecosistemas alrededor de los cuales el hombre realiza sus actividades. Por tanto, estudios realizados en algún punto del planeta pueden ser comparados con estudios de otras regiones estableciendo así parámetros de comparación; en muchos casos inclusive se pueden anticipar los efectos de una actividad humana en particular en base a la experiencia previa que se tiene con ecosistemas similares en otra región del mundo.

Esta capacidad de predicción en base a datos algales es importantísima en cuanto se trata de paliar el efecto del desarrollo agrícola, industrial y poblacional de determinadas regiones, lo que además permite un planeamiento y control más efectivo de tal desarrollo. Pero las algas también crecen en zonas que no han sido afectadas por el hombre, en condiciones que se conocen como prístinas (no afectadas).

El estudio de las algas de zonas prístinas permite la visualización de las condiciones ideales de un ecosistema, aquellas requeridas para un funcionamiento normal del ecosistema como un todo biótico (con seres vivos) y abiótico (con un espacio geográfico). El conocimiento de situaciones prístinas también permite el planeamiento de un desarrollo más ordenado en lo que respecta a las actividades del hombre en su medio. Bolivia, a pesar de sus altas tasas de crecimiento poblacional aún cuenta con muchos ecosistemas de condiciones prístinas y de ahí la importancia de preservar y estudiar a fondo tales hábitats.

Otra característica de las algas que las convierte en bioindicadoras por excelencia es que su taxonomía (identificación) es relativamente fácil y existen ya tratados acerca de su clasificación, claves de identificación y publicaciones ilustradas que hacen que su identificación a partir de muestras directamente colectadas del campo sea un proceso poco complicado. El establecimiento correcto de la identidad de una especie es un paso primordial para su posterior asociación con las condiciones físicas y químicas que determinan su crecimiento.

Una vez que la identidad de una especie y los parámetros ambientales que le favorecen se han determinado de manera contundente, el mismo organismo puede ser identificado como bioindicador de las mismas condiciones en cualquier parte del planeta. La determinación de las condiciones que le favorecen a una especie dada conlleva el cálculo de las condiciones óptimas para el crecimiento del alga y los rangos de tolerancia que éste tiene a las variaciones de tales condiciones. Dichos cálculos se hacen en base a métodos estadísticos multivariados que hoy en día se realizan con la ayuda de paquetes computarizados que producen resultados en escasos minutos.

Muchos grupos algales permiten averiguar las condiciones pasadas de un ecosistema a través de la identificación de partes inorgánicas que son resistentes a la descomposición. Esta rama de la ecología que se encarga de estudiar la historia de un ecosistema se denomina paleoecología. Cuando las diatomeas y crisófitos, por ejemplo, cumplen sus ciclos vitales, sus paredes celulares se depositan en el fondo de lagos o zonas costeras marinas produciendo con el tiempo una estratificación sedimentaria que representa a la historia biológica de esos ecosistemas.

La toma de muestras mediante la extracción de columnas de sedimentos facilita grandemente el estudio de tal historia. Si se conocen los óptimos y rangos de tolerancia de los organismos que se hallan a lo largo de esa columna, entonces se puede inferir también la historia física y química del ecosistema. La determinación de la edad de cada porción de la columna de sedimento se realiza mediante el uso de isótopos radioactivos en laboratorios especializados que generan resultados en lapsos relativamente cortos.

De ésta manera y teniendo los datos de la edad de los sedimentos y los datos de los cambios en la composición de la comunidad de algas (enumeración de cuantas especies y cuantos individuos dentro de cada especie existen en la columna de sedimento), se ha podido reconstruir la historia de muchos ecosistemas acuáticos, historia que también es un reflejo de los cambios en toda la cuenca donde ese ecosistema se encuentra. Debido a que las condiciones climáticas también están ligadas con el funcionamiento de un ecosistema, los estudios paleoecológicos se han extrapolado también a la determinación de los cambios climáticos regionales. Muchos estudios de los cambios de temperaturas y variaciones de las concentraciones de dióxido de carbono, etc. a través del períodos de miles de años, se han realizado a partir del estudio de algas presentes en los sedimentos de mares y lagos.

BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN DE LAS ALGAS EN BOLIVIA

A pesar de la gran variabilidad de los ecosistemas acuáticos en Bolivia y de su gran importancia económica, los estudios acuáticos en general están aún en su infancia. Esto sorprende

ya que cada una de las 9 capitales de departamento está asociada con ecosistemas lacustres o ríos que sufren los impactos del crecimiento poblacional mal planificado o de una actividad agrícola y minera descontroladas. Tampoco se conoce mucho acerca de las algas y estudios que las utilicen en el monitoreo biológico y control de la calidad del agua son escasos y no llegan a abastecer la necesidad de establecer programas bien fundamentados de recuperación, manejo de cuencas y conservación de la integridad de los recursos acuáticos del país.

Un gran porcentaje de lo que se conoce acerca de las algas bolivianas ha sido producido por científicos extranjeros que han publicado sus estudios en revistas internacionales de circulación restringida o nula en Latinoamérica. Esta pérdida de conocimiento, común a la mayoría de las áreas científicas actualmente activas en el país, causa un retraso que actúa en detrimento de los mismos bolivianos.

Al carecer de un conocimiento de lo que tenemos como riqueza natural, el país no aprovecha su potencial económico total y su dependencia científica y económica continua.

Lo que es más, la falta de planificación de la urbanización, industrialización y actividad agrícola conduce a la pérdida irreversible e irrecuperable de especies, suelos y recursos hídricos. Las zonas del país que han sido más estudiadas desde el punto de vista de la ficología son el altiplano y la zona de los valles con muy pocos estudios de algas tropicales, subtropicales y de la región de El Chaco. Como es de esperarse y por ser una zona de gran atractivo turístico, la región del lago Titicaca es la que más atención ha recibido por parte de los ficólogos.

También las zonas de los salares y paleolagos (lagos muy antiguos pero ya desaparecidos) como el lago Ballivián se han estudiado como peculiaridades debido a sus características extremas. En la zona de los valles, el Departamento de Cochabamba, específicamente la laguna Alalay y algunos ríos y lagunas del Chapare han recibido bastante atención con la consiguiente generación de los estudios más detallados a nivel de diversidad y ecología de algas (y otros organismos) en todo el país.

El grupo algal más estudiado es el de las diatomeas con numerosos artículos publicados, especialmente en Francia, en los que se hacen análisis detallados de la composición a nivel de especies, pero se presenta poco acerca de su ecología.

Sin duda, dentro de los escasos estudios ecológicos, el que más resalta es la utilización de diatomeas para la investigación de cambios climáticos en la zona altiplánica mediante colecta de columnas de sedimento del lago Titicaca y del Salar de Uyuni que dieron como resultado datos de organismos depositados desde hace 25.000 años atrás.

Estos estudios concluyeron que la zona altiplánica fue una zona con bastante humedad durante la última glaciación (que duró desde unos 25.000 hasta 15.000 años atrás), contrario a lo que la mayoría de los investigadores sostenía; que la zona altiplánica había sido siempre árida.

NECESIDADES FUTURAS

Previo a la utilización de las algas como bioindicadores y como organismos de monitoreo biológico de ecosistemas de importancia para los bolivianos, se necesita conocer cuál es la diversidad algal. Esta diversidad debe ser catalogada y la taxonomía de las especies resuelta con un nivel de precisión satisfactorio. La elaboración de listas de especies y de catálogos ilustrados es primordial para facilitar el uso de las algas en estudios ecológicos rutinarios.

La concatenación de estudios a nivel de microscopía óptica, electrónica y cultivos de laboratorio, además de la colaboración con entidades y científicos externos, que coadyuven con la colecta de otros datos útiles (biología molecular, estudios detallados de ciclos vitales, etc.) es también recomendada.

Todos éstos datos de diversidad y taxonomía deben hacerse disponibles a través de páginas electrónicas de fácil acceso para técnicos y profesionales del ramo en todo el país, quienes además deben contar con el apoyo profesional de grupos que se hallen en centros especializados para tales estudios (universidades, institutos, algunas ONGs, etc).

Al mismo tiempo, estudios de bioindicación y el establecimiento de programas de biomonitoreo deben también organizarse de tal manera que científicos y personal capacitado en todo el país tenga fácil acceso a la información producida. La colaboración entre todos los recursos humanos es esencial para un progreso rápido y franco en la conservación de los sistemas acuáticos.

La educación de la población en general es también importante y ésto se hace a través de la publicación de resultados en artículos y libros que hayan pasado por un debido proceso de revisión por colegas tanto nacionales como internacionales. La educación del público también mediante los medios de comunicación, escuelas e universidades es de suma importancia para un desarrollo sostenible y el bienestar de la sociedad boliviana.

Por último, los estudios de la biodiversidad algal también tendrán su incidencia en la determinación de las posibilidades que existen para el aprovechamiento de éstos organismos para el consumo y la industria. Esto puede resultar en el desarrollo de economías locales activas que generen trabajo y sostén económico para varios sectores de la población.

GLOSARIO

Adaptación: Característica de un organismo que mejor lo acomoda a las condiciones de su medio circundante.

Adaptación cromática: Cambios a nivel molecular en organismos expuestos a variaciones drásticas en la luminosidad de su medio ambiente. Tales cambios tienden a mantener la producción normal de glucosa mediante la fotosíntesis.

ADN: Acido Desoxirribonucleico, molécula que contiene la información genética para la elaboración de proteínas en la célula.

Afilación evolutiva: Relación entre organismos que provienen de un mismo ancestro.

Agar agar: Sustancia gelatinosa extraída de las algas y de múltiples usos.

Alginato: Compuesto orgánico que forma parte de la pared celular de algunas algas y se extrae con fines industriales diversos.

Aparato de Golgi: Organelo celular que funciona a manera de una planta de embalaje. Se encarga de empaquetar y distribuir proteínas y otros productos dentro y fuera de las células.

Biodiesel: Derivado de grasas y aceites animales y vegetales que representa una alternativa al uso de los derivados del petróleo.

Bioindicador: Organismo que se usa como indicador de las condiciones de un ecosistema.

Bioluminiscencia: Propiedad de algunos organismos de emitir luz.

Carotenoide: Pigmento complementario que colecta luz solar y la transmite a la clorofila. Actúa también como protector solar para evitar la inactivación de la clorofila.

Carragenina: Compuesto orgánico que se extrae de las algas y con diversas aplicaciones domésticas e industriales.

Ciclo vital: Fases por las que pasa una especie durante el desarrollo de sus actividades vitales. Algunos ciclos vitales consisten en la alternación de dos o más generaciones.

Competencia: Relación entre dos o más organismos que necesitan el mismo recurso. La competencia es intraespecífica cuando sucede entre dos individuos de la misma especie o interespecífica cuando los individuos pertenecen a especies distintas.

Cromosoma: Condensación de ADN que aparece durante la división celular de organismos eucariontes. Cada especie posee un número variable de cromosomas.

Diatomita: Roca suave que se deshace al contacto y que está compuesta por millones de paredes celulares silíceas de diatomeas.

Dormancia: Estado en la que el metabolismo de un organismo se reduce al mínimo para el ahorro de energía en períodos de carencia. La hibernación en osos y ardillas es un proceso de dormancia. Muchas algas producen células especializadas para la dormancia.

Elemento traza: Químico inorgánico requerido para la nutrición de un organismo pero en cantidades mínimas, generalmente en el orden de microgramos (milésimos de gramo).

Endosimbiosis: Proceso por el cual dos organismos forman una asociación favorable para ambos de manera que a través del tiempo se establece una relación permanente en la que ninguno puede subsistir por separado.

Enzima: Tipo de proteína cuya función principal es la de catalizar (acelerar) las reacciones químicas en las células.

Estromatolitos: Acumulaciones de carbonato de calcio producido por cianobacterias. Muchos crecen asemejando columnas.

Fagocitosis: Proceso por el cual un organismo atrapa a su alimento utilizando su membrana celular y lo incorpora dentro de su célula.

Fenotipo: Las características visibles y funcionales de un organismo. El color de pelo o el modo de procesar un determinado tipo de alimento constituyen características fenotípicas. Se conoce como **genotipo** a la información genética que produce el fenotipo.

Ficobilisomas: Asociaciones de proteínas y pigmentos fotosintéticos que se hallan sobre los tilacoides.

Ficocoloides: Sustancias orgánicas producidas por las algas, son de tres tipos: alginatos, agar agar y carrageninas.

Ficocología: (Algología), Rama de la Biología que estudia las algas.

Fisión binaria: Modalidad de reproducción de organismos procariontes en la que el material genético se duplica y se reparte entre las dos células resultantes.

Flagelos: Organelos encargados de la locomoción de la célula. Pueden estar localizados en la parte anterior o posterior de la misma, estirando o empujando a la célula, respectivamente.

Floración algal: Proliferación masiva de algas que algunas veces puede ser dañina para el ecosistema cuando las algas mueren y empiezan a descomponerse produciendo una carencia de oxígeno en el agua y malos olores.

Fotooxidación: Alteración de la estructura química de la clorofila debido a la incidencia directa de los rayos solares.

Fototáxis: Movimiento causado por una atracción hacia la luz.

Gametos: Células especializadas para la reproducción sexual y que se producen por medio de la meiosis.

Heterocistos: Células especializadas para fijación de nitrógeno en algas verde azules.

Línea evolutiva: Proceso evolutivo que da origen a un grupo de organismos relacionados entre sí y que comparten un ancestro común.

Meiosis: División celular en la que existe una reducción en la cantidad de material genético. Las células que se producen por meiosis se denominan gametos.

Microscopía electrónica: Tipo de microscopía que utiliza un haz de electrones para producir imágenes de alta resolución de la superficie de organismos.

Microscopía óptica: Tipo de microscopía que utiliza la luz para la observación de las características de las células y tejidos de los organismos.

Mitocondria: Organelo encargado de la respiración celular, proceso mediante el cual se genera energía a partir de nutrientes como los carbohidratos, proteínas y lípidos.

Mitosis: División en la que una célula produce dos idénticas y con la misma cantidad de material genético.

Monosacáridos: Carbohidratos simples que poseen las cadenas más cortas de carbono dentro de todo el grupo de carbohidratos.

Mucílago: Sustancia orgánica gelatinosa que le sirve a las algas para pegarse a un sustrato o para recubrirse protegiéndose de condiciones adversas en su medio.

Nivel de organización: Tipo de morfología producida por un organismo.

Organelo: Estructura rodeada de una membrana y que se halla en el citoplasma de la célula. Cada organelo tiene estructura y función determinadas.

Osmoregulador: Sustancia que mantiene la presión interna de la célula para resistir los cambios de presión de su medio.

Pigmentos complementarios: Pigmentos asociados a la clorofila que colectan la energía solar y la transmiten a ésta.

Plasmidio: Anillo de ADN adicional que se halla en el citoplasma de procariontes.

Plasmólisis: Pérdida del contenido de agua de una célula debido a cambios de concentraciones de sustancias en el medio externo.

Plasticidad fenotípica: Capacidad de un organismo de producir varios fenotipos de acuerdo con cambios en su medio ambiente.

Plastidio: Organelo encargado de la fotosíntesis debido a que posee la clorofila, pigmentos complementarios y todo el mecanismo químico para la producción de glucosa. Algunos plastidios también almacenan sustancias de reserva.

Polímero: Sustancia orgánica que se genera por agregación de unidades básicas repetitivas.

Polisacárido: Carbohidrato que es un polímero de otros carbohidratos más simples.

Prístino(a): Vírgen, silvestre, que no ha sido alterado o afectado por la actividad del hombre.

Procarionte: Tipo de vida que produce células que no contienen organelos en su interior y en la que el ADN flota en el citoplasma.

Reproducción asexual: Reproducción que no requiere de la formación de gametos. Las modalidades más frecuentes son la fisión binaria, producción de esporas y fragmentación.

Reproducción sexual: Reproducción mediante la generación de gametos.

Talo: El cuerpo de un alga, sea éste unicelular o multicelular.

Tilacoides: Sacos que se hallan en el citoplasma de procariontes o en el interior de los plastidios en eucariontes y que son los sitios donde se adhieren los pigmentos fotosintéticos.

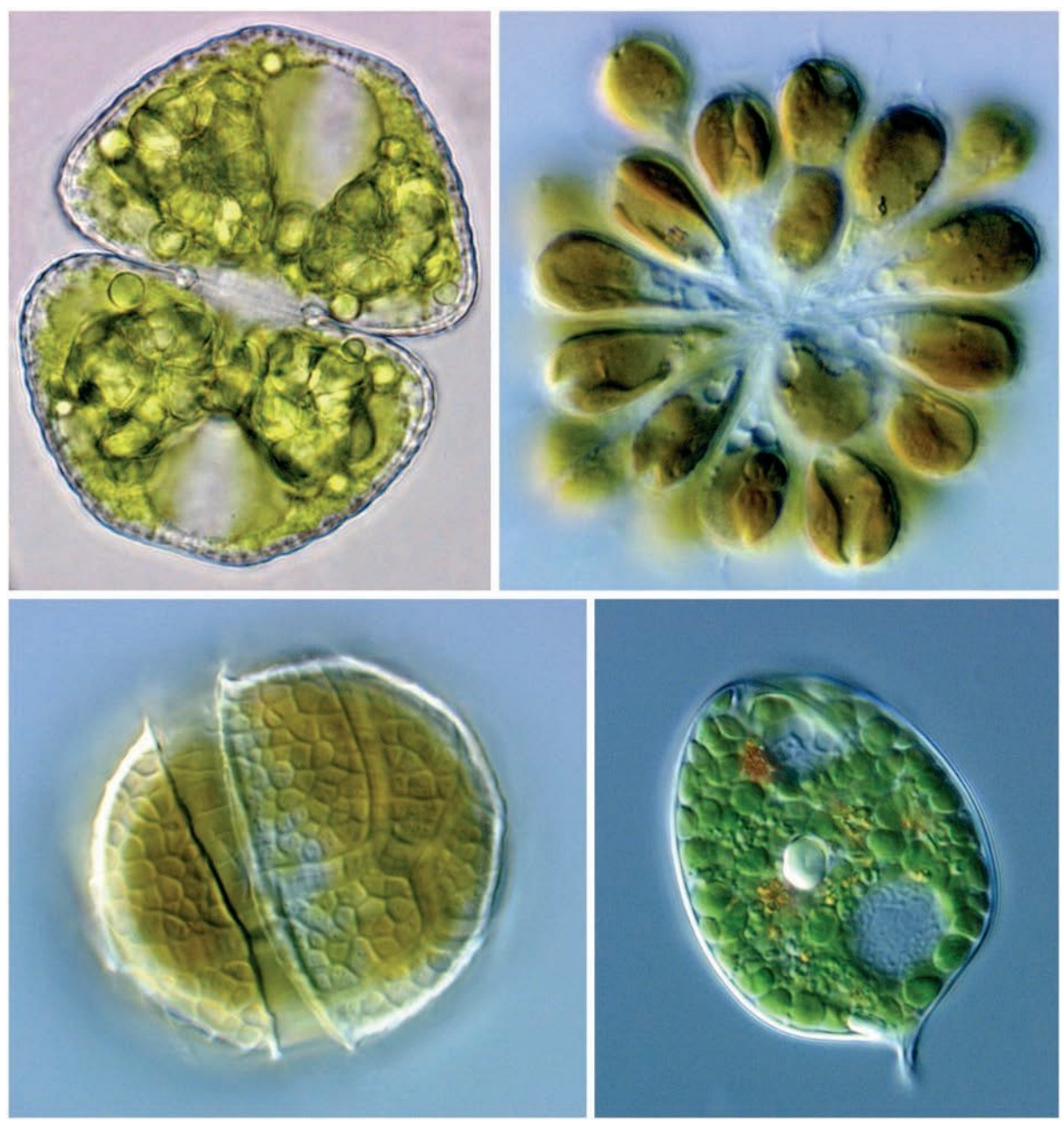
Vitamina: Proteína que es un nutriente que generalmente se utiliza como componente de enzimas en la actividad celular.

Xantofila: Tipo de pigmento complementario que transmite la energía de la luz solar a la clorofila.

Zoosporas: Células de reproducción asexual que poseen flagelos y se parecen a animales microscópicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Acleto, C. & Zuñiga, R. 1998. Introducción a las Algas. Editorial Escuela Nueva S. A. Lima, Perú. 383 pp.
- Cadima, M. & Morales, E. A. (1989-1992). Estudio Cualitativo de las Macrófitas y Micrófitas para Determinar el Grado Trófico de la Laguna Alalay. Informes Técnicos 1-12. Programa de Aguas Programa de Hidronomía, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia.
- Graham, L. E. & Wilcox, L. W. 2000. Algae. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA. 640 pp.
- Morales, E. A. & Trainor, F. R. 1999. Phenotypic plasticity in *Scenedesmus*: Implications for algal taxonomy and ecology. *Gayana Botánica* 56: 11-20.
- Morales, E. A. & Trainor, F. R. 2001. Las algas: conceptos críticos en la evaluación de su diversidad. En: Primack, R. Rozzi, R. Feisinger, P. Dirzo, R. & Massardo, F. (Eds.). *Fundamentos de Conservación Biológica. Perspectivas Latinoamericanas*. p. 77-80. Fondo de Cultura Económica. México D. F., México.
- Morales, E. A., Trainor, F. R. & Schlichting, C. 2002. Phenotypic plasticity in the algae: ecological and evolutionary implications. *Constancea* 83.
- Seltzer, G. O., Rodbell, D. T., Baker, P. A., Fritz, S. C., Tapia, P. M., Rowe, H. D., Dunbar, R. B. 2002. Early Warming of Tropical South America at the Last Glacial-Interglacial Transition. *Science* 296 (5573): 1685-1686.
- South, R. G. & Whittick, A. 1987. *Introduction to Phycology*. Blackwell Scientific Publications. Boston, USA. 341 pp.
- Trainor, F. R. 1978. *Introductory Phycology*. John Wiley & Sons. New York, USA. 525 pp.
- Van den Hoek, C., Mann, D. G. & Jahns, H. M. 1995. *Algae. An Introduction to Phycology*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 623 pp.



Algas *Cosmarium*, *Synura*, *Phacus* y *Peridinium*.