

LOS SISTEMAS ACUÁTICOS CONTINENTALES. SU ONTOGENIA NATURAL ACELERADA POR EFECTO ANTROPICO: LA EUTROFIZACIÓN Y LA SALINIZACIÓN

Irma del Carmen Vila Pinto*. 2003. El agua en Iberoamérica, Tópicos Básicos y Estudios de Caso, 11-21. Editores: Alicia Fernández Cirelli y Miquel Salgot. Publicado por: CYTED-XVII. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. *Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, Ñuñoa, Santiago, Chile. www.produccion-animal.com.ar

[Volver a: Agua en el cono sur de América](#)

RESUMEN

En este trabajo se realiza una caracterización limnológica de los cuerpos de agua superficial, atendiendo a su estructura o morfología característica y a su ubicación geográfica y se describen sus características químicas y biológicas. Se discute el efecto antrópico en los procesos de eutrofización y salinización y la utilidad de los modelos predictivos de eutrofización.

Palabras clave: sistemas acuáticos continentales, ontogenia, efecto antrópico, eutrofización, salinización.

CARACTERIZACIÓN LIMNOLÓGICA

Lagos y ríos deben ser considerados como sistemas funcionales en el marco de una cuenca hidrográfica en la cual intervienen múltiples factores, tanto abióticos como bióticos. En la actualidad, su conocimiento y uso sustentable debe considerar el clima, la geología, la hidrología y los usos del agua y de los suelos circundantes, como variables forzantes en la determinación de las características físicas, químicas y biológicas de los sistemas acuáticos.

Las aguas interiores cubren menos del 2 % de la superficie de la tierra, y lagos y ríos suman 105,2 km²; representando solamente el 0,009 % del agua utilizable directamente en la corteza terrestre y con tiempos de renovación entre 1 y 100 años. El crecimiento demográfico, concepto que relaciona el crecimiento poblacional aunado con el desarrollo tecnológico (Wetzel, 2001), demanda día a día mayor cantidad de agua.

El gran desafío que enfrenta América en la actualidad, es el abastecimiento de agua en cantidad y calidad suficientes para todos sus habitantes.

Es por ello que el uso sustentable del agua requiere de la integración multidisciplinaria, para el conocimiento de gran diversidad de sistemas complejos cuyo funcionamiento muchas veces es considerado sólo parcialmente. La ubicación geográfica y el origen de los sistemas lacustres y fluviales, conjuntamente con la calidad del suelo que drenan y los afluentes que reciben determinan las variables físicas, químicas, la diversidad biológica y por ende la producción de los mismos. Es este conocimiento el que permite su manejo sustentable.

Todos los sistemas acuáticos tanto lénticos (lagos, lagunas, pantanos y aguas someras), como los lóticos (aguas corrientes de ríos y riachuelos) son considerados como humedales de acuerdo con la convención de Ramsar (1971). Estos sistemas tienen una estructura o morfología característica establecida inicialmente por su origen (en el caso de los lagos) y por el origen y la ubicación geográfica, en el caso de los ríos. Las principales agrupaciones lacustres se encuentran asociadas a cordones montañosos. Así, los lagos más profundos tienden a tener un origen glacial, tectónico y volcánico y debido a su ubicación geográfica presentan baja productividad, y son clasificados como oligotróficos. Los lagos y lagunas con origen fluvial, sufren procesos de erosión por mareas y vientos, y especialmente los embalses con origen artificial son menos profundos y generalmente alcanzan productividades altas en tiempos breves y siendo eutróficos. El origen del cuerpo de agua influye directamente en la morfología de la cubeta y en relación con ésta, los parámetros más importantes a controlar son el área del espejo de agua, la profundidad máxima y las profundidades relativas al perímetro de la cubeta (batimetría). La relación entre el perímetro y el área permite calcular el volumen aproximado del lago. Otra variable de importancia es la extensión de la ribera o desarrollo de ribera por el aporte de material desde la cuenca de drenaje. Entre las variables físicas cabe destacar el clima óptico y térmico en los lagos y la hidrología en los fluviales. Las variables químicas más importantes que influyen en la calidad del agua son principalmente los gases disueltos (oxígeno y anhídrido carbónico) y sales minerales conocidas como nutrientes (nitratos y fosfatos, principalmente). De acuerdo con la calidad química del agua se desarrollan diversas comunidades biológicas.

Las características morfológicas de los lagos, así como su ubicación (latitud y longitud) permiten pronosticar a su vez el comportamiento lumínico y térmico de estos sistemas debido a la cantidad de energía que reciben y acumulan, lo cual influye directamente en su productividad. Los lagos profundos (>100 m) generalmente son oligotróficos. Las lagunas y los lagos someros tienden a ser eutróficos. Los ríos, en las zonas rítrónicas (zonas altas o naciente) son generalmente oligotróficos y en las zonas medias y en la desembocadura (o potámica), la corriente del agua es más lenta y permite el mayor crecimiento de las distintas comunidades (plancton, necton, bentos, macrofitas), tornándose más productivos. La cantidad de luz que es absorbida por un cuerpo de agua aumenta exponencialmente con la distancia del paso de la luz por la solución. El 90% de la longitud de onda de 750 nm es absorbida en un metro de profundidad (dependiendo del estado trófico del lago). El alto calor específico del agua permite la acumulación de esta longitud de onda como energía calórica. La distribución de calor en los sistemas depende de la morfometría, especialmente de la profundidad máxima y relativa, y del viento y las corrientes.

Los sistemas acuáticos subpolares y templados, no disponen de energía solar suficiente para calentar la masa de agua completa y sólo los primeros metros (10 a 50) incrementan sus temperaturas durante la primavera. La diferencia térmica genera masas de agua de diferente densidad, estratificando los sistemas en tres estratos:

Epilimnion, aguas superficiales, de menor densidad, con circulación permanente y turbulenta.

Metalimnion, zona de cambio rápido de temperatura que tiene diferencias de más de un grado térmico en un metro de profundidad y donde se presentan las termoclinas.

Hipolimnion, zona de aguas profundas y con temperaturas frías y densas. Durante el otoño, las aguas superficiales se enfrían hasta homogenizar la temperatura y densidad de toda la columna de agua. Durante el período invernal las aguas superficiales se enfrían en algunos casos puede desarrollarse una capa de hielo (0°C). Esta agua son menos densas que las que están a una mayor profundidad (4°C). Al inicio de la primavera, comienza el calentamiento térmico y las aguas se homogenizan en toda la columna de agua, recirculando el agua del sistema.

En las regiones subecuatoriales, los lagos sólo se estratifican durante la primavera o el verano. Acorde con su ubicación geográfica, el número de mezclas y periodos de estratificación, los lagos se clasifican térmicamente en las categorías siguientes:

Lagos dimícticos: Poseen dos períodos de estratificación (verano e invierno) y dos períodos de mezcla (otoño y primavera). Se ubican a latitudes entre 60 y 40° y a altitudes de hasta los 2500 m de altura.

Lagos monomícticos: a) templados. En estos lagos la temperatura no baja de 4°C y las aguas circulan libremente durante el invierno y el periodo de estratificación es el verano. b) fríos, son lagos con temperaturas inferiores a 4°C y con un solo período de circulación en el verano. Son sistemas subsolares.

Lagos polimícticos: Se estratifican y mezclan diariamente, son sistemas tropicales, sobre los 2000 m de altura y cercanos al Ecuador.

Lagos oligomícticos: Son sistemas ecuatoriales, los cuales permanecen con temperaturas aproximadamente constantes en toda la columna de agua (>4°C).

Lagos amícticos: Permanecen siempre congelados y estratificados. Se ubican a altas latitudes o polares, en Alaska y la Antártida.

CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

La calidad química del agua de ríos y lagos depende de la cantidad y calidad de las precipitaciones, de la calidad de los suelos del área de drenaje; de la erosión; de los procesos de solubilización y meteorización de la roca madre y los suelos; de la evaporación y la sedimentación. Por efecto de la estacionalidad climática, las comunidades biológicas, especialmente el plancton, presentan ciclos diarios, y estacionales. Este cambio influye directamente en la composición química de las aguas, especialmente en los nutrientes (nitratos y fosfatos) que son requeridos para la fotosíntesis. La actividad de las bacterias, cuya participación en los ciclos biogeoquímicos es crucial en el reciclado de nutrientes, es también un factor que modifica la calidad química del agua. La interfase atmósfera-agua representa un equilibrio de la incorporación de gases al agua, especialmente O₂, CO₂ y N₂ a los cuales se agrega el SO₂ que ha acidificado el agua de lluvia, debido a su incremento por efecto de la industrialización.

De los gases disueltos en el agua, el oxígeno (O₂) es el más importante y crucial para la vida vegetal y animal interactuando en muchas reacciones químicas y biológicas. De acuerdo con la altitud a la que están emplazados los sistemas, la presión atmosférica ejerce su efecto. Los lagos contienen naturalmente entre 8 y 12 mg/L de O₂ y los ríos hasta 15 mg/L. La dinámica de los sistemas se refleja en variaciones diurnas y estacionales de O₂ las cuales reflejan el estado trófico del sistema. En los sistemas oligotróficos la demanda y la producción de oxígeno es baja, y por lo tanto los valores de O₂ son constantes en profundidad y en tiempo.

En los lagos eutróficos, la alta demanda por O₂ durante la noche, por respiración de las comunidades biológicas y la descomposición de la materia orgánica, hace que este gas disminuya progresivamente su concentración en profundidad, llegando en algunos casos hasta la anoxia. El estado de anoxia produce un cambio en la óxido reducción de los sedimentos o en el potencial de óxido reducción. El factor ambiental más importante en la regulación

de la cantidad de O en el agua es la temperatura. La concentración de O disuelto es inversamente proporcional a la temperatura. El incremento de la temperatura durante primavera y verano de los sistemas templados disminuye la cantidad de O hasta en un 50%. Esta cantidad es modificada por las relaciones de respiración y fotosíntesis durante la noche. Los cálculos del porcentaje de saturación del O disuelto se deben efectuar considerando la presión atmosférica o la altitud a la que se encuentra ubicado el sistema y la temperatura mediante el nomograma de Mortimer (Wetzel, 2001). Mientras más eutrófico es el sistema, mayor es la disminución de O hacia el fondo. Los lagos tropicales de cierta profundidad pueden presentar anoxia casi permanente en el hipolimnion. La concentración de O en los sistemas acuáticos es una función de los procesos biológicos como la fotosíntesis y la respiración, lo cual determina cambios en cortos períodos de tiempo. La concentración de anhídrido carbónico (CO₂) en el agua muestra una relación inversa al O₂. Además del intercambio atmosférico, el CO₂ es producto de la respiración de plantas y animales siendo la fuente principal para la fotosíntesis. El CO₂ es muy abundante puesto que su solubilidad es 30 veces mayor que el O₂. El CO₂ se disuelve en el agua para producir ácido carbónico, el cual se disocia en las fracciones que se detallan a continuación dependiendo de la concentración de hidrogeniones y conformando de esta manera un sistema buffer de resistencia a los cambios bruscos del pH del agua.



El factor ambiental más importante en controlar la presencia de estos gases disueltos en el agua es la temperatura, pero sus niveles son dependientes de la fotosíntesis, la respiración, la presencia de otros gases y las oxidaciones químicas.

La mayor parte del nitrógeno (N₂) en el agua está presente como gas. En esta forma sólo puede ser utilizado por las cianobacterias y bacterias fijadoras de N₂. Nitratos (NO₃⁻), amonio (NH₄⁺), nitrito (NO₂⁻), urea y compuestos orgánicos disueltos son los compuestos menos abundantes en estos sistemas, pero de importancia biológica. En el ciclo biogeoquímico del N₂, los compuestos nitrogenados pueden estar forma gaseosa, soluble y particulada, y están presentes en condiciones óxicas y anóxicas. El ciclo biogeoquímico del nitrógeno, es mediado por bacterias, las cuales nitrifican en presencia de oxígeno y desnitrifican en condiciones de anoxia. La concentración de la mayoría de los compuestos del nitrógeno tiende a seguir patrones estacionales. En la primavera y el verano disminuyen las concentraciones de estos compuestos en la zona fótica debido al incremento de la actividad biológica.

El fósforo es el nutriente que generalmente limita el crecimiento del fitoplancton en los lagos, porque en condiciones naturales esta presente en concentraciones muy bajas. El fósforo se origina de los procesos de intemperización de rocas y sólo el 5 al 10% es soluble y utilizable. El ingreso de aguas servidas y abonos agrícolas desequilibran este balance incrementando la presencia del fósforo en el agua. Los sistemas templados tienden a estar limitados por fósforo y los sistemas tropicales por nitrógeno.

El nivel de trofia de los sistemas acuáticos está determinado por los gases como O₂, CO₂ y N₂, las cantidades de fosfatos y nitratos que ingresan a los mismos. El fósforo y el nitrógeno son nutrientes que estimulan el crecimiento del fitoplancton y las macrófitas acuáticas, las cuales son el eslabón principal de la vida en el agua y de la cadena trófica.

Las variables correspondientes a los diferentes niveles tróficos de los sistemas acuáticos se resumen en la Tabla I según Ryding y Rast (1992).

Tabla 1. Valores límites de la OCDE para un sistema abierto de clasificación trófica (valores medios anuales)*. Ryding y Rast (Modificado de OCDE, 1992).

Parámetro		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipertrófico
Fósforo Total ($\mu\text{g P/L}$)	x	8,0	26,7	84,4	
	X \pm 1 SD	4,85-13,3	14,5-49	48-189	
	X \pm 2 SD	2,9-22,1	7,9-90,8	16,8-424	750-1.200
	Rango	3,0-17,7	10,9-95,6	16,2-386	2
	N	21	12(21)	71(72)	
Nitrógeno Total ($\mu\text{g N/L}$)	X	661	753	1.875	
	X \pm 1 SD	371-1.180	485-1.170	861- 4.081	
	X \pm 2 SD	208-2.103	313-1.816	39 5- 8.913	
	Rango	307-1.630	361-1.387	393 - 6.100	
	N	11	8	37(38)	
Clorofila a ($\mu\text{g /L}$)	X	1,7	4,7	14,3	
	X \pm 1 SD	0,8-3,4	3,0-7,4	6,7-31	
	X \pm 2 SD	0,4-7,1	1,9-11,6	3,1-66	
	Rango	0,3-4,5	3,0-11	2,7-78	100-150
	N	22	16(17)	70(71)	2
Valor máximo de clorofila a ($\mu\text{g/L}$)	X	4,2	16,1	42,6	
	X \pm 1 SD	2,6-7,6	8,9-29	16,9-107	
	X \pm 2 SD	1,5-13	4,9-52,5	6,7-270	
	Rango	1,3-10,6	4,9-49,5	9,5-275	
	N	16	12	46	
Profundidad de Secchi	X	9,9	4,2	2,45	
	X \pm 1 SD	5,9-16,5	2,4-7,4	1,45-4,0	
	X \pm 2 SD	3,6-27,5	1,4-13	0,9-6,7	
	Rango	5,4-28,3	1,5-8,1	0,8-7,0	0,4-0,5
	N	13	20	70(72)	

*Las medias geométricas (después de transformarse a logaritmos decimales) se calcularon tras eliminar valores superiores o inferiores a dos veces la desviación estándar obtenida (donde fue posible) en un primer cálculo.

X: media, SD: Desviación estándar. () = los valores entre paréntesis se refieren al número de variables (n) utilizadas.

ASPECTOS BIOLÓGICOS

La base de la vida acuática la conforma el plancton, definido como la comunidad de microorganismos que vive suspendida en el agua. Son organismos microscópicos (varían desde unos pocos micrones a milímetros), con o sin órganos de locomoción, lo que limita sus movimientos. Los componentes más importantes del plancton son las bacterias (bacterioplancton), las microalgas (fitoplancton), los protozoos, los rotíferos, los cladóceros, los copépodos y larvas de insectos y peces.

En los sistemas templados, la temperatura marca ciclos estacionales en el crecimiento del plancton el cual a su vez, determina cambios en la cantidad de nutrientes presentes en el agua. Con el incremento térmico primaveral, se inicia el crecimiento rápido de las diatomeas y las algas verdes, inmediatamente después, el zooplancton crece exponencialmente. Primero se incrementan las poblaciones de cladóceros filtradores de microalgas y luego de copépodos, que predan sobre los cladóceros. A su vez, el incremento del plancton permite que los peces juveniles se alimenten. Durante el verano y el otoño, se incrementan las algas verdes de mayor tamaño y posteriormente las cianobacterias quienes toleran temperaturas más altas y menor oxigenación.

Los sistemas de acuerdo con sus características abióticas tienen comunidades planctónicas específicas, pero en general muchas especies de microalgas son cosmopolitas y presentan máxima abundancia de acuerdo con al fotoperiodo y la temperatura estacional, por lo tanto, la composición de especies como la abundancia de las mismas presenta estacionalidad. Los grupos de algas más importantes son los siguientes:

1. Cianófitas o cianobacterias, comúnmente denominadas algas verdeazules. Son los elementos típicos de los sistemas eutróficos. Los géneros más frecuentes son: *Mycrocystis* y *Anabaena*.
2. Criptofitas. Son microalgas poco diversas pero que pueden alcanzar densidades altas. Los géneros más frecuentes son *Cryptomonas*, *Rhodomonas*, *Chroomonas* y *Chilomonas*.
3. Dinofíceas. Denominadas comúnmente como dinoflagelados, que en algunos géneros están asociados a la producción de toxinas. Los géneros más comunes son *Gymnodinium*, *Peridinium*, *Glenodinium* y *Ceratium*. Este último género es indicador de la presencia de altas concentraciones de materia orgánica en agua.
4. Crysofíceas. Se conocen como algas "pardo-amarillas", por la presencia de carotenos y xantofilas. Algunos géneros como *Dinobryon*, viven en aguas con <20 g de ortofosfatos. Otros géneros frecuentes son *Mallomonas*, *Uroglena* y *Chromulina*.

5. Bacillarioficeas. Conocidas también como diatomeas, son los representantes más importantes del plancton lím-nico. Los géneros más ampliamente distribuidos son: *Melosira*, *Cyclotella*, *Aulacoseira*, *Stephanodiscus*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Fragilaria*, *Asterionella* y *Synedra*.
6. Xantophiceas. Se caracterizan por su color verde-amarillento debido a la posesión de carotenoides en mayor proporción que la clorofila a y c. Con células móviles provistas de dos flagelos. Los géneros más conocidos en las aguas dulces son *Tribonema*, *Gloechloris* y *Gleobotrys*.
7. Euglenofitas. Células desnudas con uno a tres flagelos, son abundantes en sistemas con alto contenido de mate-ria orgánica. Los géneros más representativos son *Euglena*, *Phacus*, y *Trachelomonas*
8. Clorofitas. Las “algas verdes” conforman un grupo con gran riqueza de especies unicelulares y coloniales. Al-gunos ejemplos son los géneros: *Chlamydomonas*, *Eudorina*, *Pandorina* y *Volvox*. Son frecuentes en lagunas temporales de mediana productividad e incrementan sus poblaciones con temperaturas más elevadas. Este es el caso de *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Crucigenia*, *Coelastrum* y *Dictyosphaerium*. El grupo de los désmidos vive preferentemente en aguas ácidas, pobres en calcio, por ejemplo los géneros frecuentes son *Staurostrum*, *Cos-marium*, *Closterium* y *Micrasterias*.

Los grupos animales planctónicos son los consumidores primarios y podemos identificar los siguientes: Proto-zoos. Se alimentan de microalgas y bacterias y constituyen el alimento para las larvas de insectos y peces. Sarcodinos y Cilióforos son los más abundantes. Los géneros más conocidos son *Arcella* y *Diffugia*. Muchos ciliados tienen la capacidad de tolerar concentraciones bajas de oxígeno, razón por la cual pueden vivir en aguas contami-nadas y con alto contenido de materia orgánica. Los rotíferos son organismos de tamaño pequeño (30 a 2000 µm). Consumen fundamentalmente detritus, bacterias y microalgas. Asplanchna es el único depredador. Los géneros más frecuentes son *Polyarthra*, *Filinia*, *Keratella*, *Brachiurus*, *Conochilus* y *Lecane*. Los cladoceros son conoci-dos como “pulgas de agua”. Su tamaño varía entre 200 y 3000 µm. Entre los géneros más comunes se citan *Daph-nia*, *Ceriodaphnia*, *Diaphanosoma*, *Moina*, *Bosmina*, *Alona* y *Chydorus*. Los copépodos son de mayor tamaño y constituyen muchas veces una fracción importante de la biomasa zooplanctónica (ejemplos: *Diatomus*, *Noto-diatomus*, *Epischura*, *Argyrodiatomus*). Son altamente endémicos. Géneros importantes y de amplia distribu-ción de cyclopoidos son *Cyclops*, *Paracyclops*, *Mesocyclops* y *Thermocyclops*. Los harparcticoideos, se asocia a la vegetación de macrófitas costera. Su mayor o menor tolerancia a la hipoxia los sitúa como buenos indicado-res de calidad del agua.

CARACTERÍSTICAS DE LA EUTROFIZACIÓN

La evolución natural de los sistemas acuáticos se ha visto significativamente acelerada por procesos de eutrofi-zación debido a la demanda creciente de agua. Mayores tasas de ingreso de nutrientes y contaminantes y afluen-tes, disminuyen la diversidad e incrementan la producción de organismos tolerantes a las nuevas condiciones, los cuales son muchas veces nocivos, como las cianobacterias. Esto implica costos altos de tratamiento y recupe-ración.

Conjuntamente con conocer las relaciones funcionales de los sistemas es importante conocer el ingreso de nu-trientes y de materia orgánica, las tasas respectivas de reciclamiento biogeoquímico, la descomposición bacteriana de material sedimentario disuelto y particulado, el metabolismo general de los sedimentos los cuales son entre otros, aspectos cruciales en la comprensión de las respuestas y la capacidad de resiliencia de los sistemas acuáti-cos a la intervención continua del hombre en ellos.

En relación con estos temas es fundamental discutir y analizar las variables forzantes y predictoras para pro-gramas de vigilancia de los sistemas acuáticos continentales con el fin de obtener una base de datos confiable para el uso de modelos de predicción de la eutrofización y en la mantención de la calidad de las aguas interiores para el uso humano y la conservación de la diversidad biológica, así como la implementación de algunas medidas de re-mediación de sistemas deteriorados.

El apoyo de instituciones tanto de gobierno como privadas en aspectos de investigación, y especialmente en el desarrollo acelerado de la educación y formación de recursos humanos en ciencias del agua y aspectos afines, representa en la actualidad un tema crítico en la conservación de la calidad y cantidad del agua para responder a las demandas de gobierno y sociedad con adecuado conocimiento científico y tecnológico en estos temas.

Los lagos naturales y artificiales se clasifican generalmente en oligotróficos (del griego "poco alimento") o eu-tróficos (del griego "bien alimentado"). Una tercera categoría, mesotrófico, se utiliza generalmente para describir las aguas en estado de transición entre la oligotrofia y la eutrofia. Aunque estas descripciones tróficas no tienen un significado absoluto, hoy se utilizan de forma general para denotar la situación de la cantidad de nutrientes de una masa de agua, o para describir los efectos de los nutrientes en la calidad general del agua y/o de las condiciones tróficas de los sistemas. Durante los últimos años, se ha intentado relacionar estos términos tróficos descriptivos con valores "límites" específicos de ciertos parámetros de la calidad del agua. Un ejemplo, es el Programa Inter-nacional Cooperativo de la OCDE para la Supervisión de Aguas Interiores (1992), proporciona valores límites

específicos de fósforo total, de clorofila a y de la profundidad de Secchi, para estas condiciones tróficas, en el ámbito de los sistemas acuáticos de zonas templadas (Tabla 1).

Como las variaciones son significativas para diferentes sistemas acuáticos y a veces se produce cierto grado de superposición, la OCDE ha tratado de superar esta limitación, aplicando un cálculo estadístico a su base de datos. El esquema de clasificación de "límite abierto" resultante se ilustra en la Tabla 3. Con este último sistema, una masa de agua puede considerarse correctamente clasificada si no hay más de un parámetro de la Tabla 2 que se desvíe de su valor medio geométrico por su valor de desviación de 2 (OCDE, 1992).

Tabla 2. Valores límite de la OCDE para un sistema concreto de clasificación trófica (modificado de OCDE, 1992).

Categoría Trófica	TP	Chl Media	Chl Máxima	Media de Secchi	Mínimo de Secchi
Ultraoligotrófico	<4,0	<1,0	<2,5	>12,0	>6,0
Oligotrófico	<10,0	<2,5	<8,0	>6,0	>3,0
Mesotrófico	10-35	2,5-8	5-25	6-3	3-15
Eutrófico	35-100	8-25	25-75	3-1,5	1,5-0,7
Hipertrófico	>100	>25	>75	<1,5	<0,7

TP: media anual de la concentración de fósforo total en el lago ($\mu\text{g/L}$), Chl media: media anual de la concentración de clorofila a en aguas superficiales ($\mu\text{g/L}$), Chl máxima: pico anual de la concentración de clorofila a en aguas superficiales ($\mu\text{g/L}$), Media de Secchi: media anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m), Mínimo de Secchi: mínimo anual de transparencia de la profundidad de Secchi (m).

Tabla 3. Características generales de lagos y pantanos oligotróficos y eutróficos en la zona templada.

Tipo de masa de agua		
Parámetro	Oligotrófica	Eutrófica
I- Biológico: - Producción de plantas y animales - Número de especies de plantas y animales. - Niveles generales de biomasa en la reserva de agua - Aparición de proliferaciones de algas Cantidad relativa de algas verdes y verde-azul distribución de algas - Crecimiento de plantas en zona litoral - Grupos características de algas - Grupos característicos de zooplancton - Animales característicos del fondo - Tipos característicos de peces	Baja Numerosas Bajos Rara Baja En el hipolimnion Puede ser escaso o abundante; vegetación sumergida y en desarrollo Algas verdes: Désmidos: <i>Staurastrum</i> ; Diatomeas: <i>Tabellaria</i> , <i>Cyclotella</i> ; Algas crisofíceas: <i>Dinobryon</i> <i>Bosmina obtusirostris</i> , <i>B. coregoni</i> , <i>Diatomus gracillius</i> <i>Tanytarsus</i> Peces de profundidad y agua fría (salmón, trucha).	Asterionella Alta Baja. Alta densidad depocas especies. Altos Frecuente Alta sólo en las aguas superficiales Con frecuencia abundante; generalmente aumento de algas filamentosas. Algas verde-azul: <i>Anabaena</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Microcystis</i> <i>Oscillatoria</i> Diatomeas: <i>Melosira</i> , <i>Fragilaria</i> , <i>Stephanodiscus</i> <i>Asterionella</i> <i>Bosmina longirostris</i> , <i>Daphnia culcullata</i> Chironómidos Peces de superficie y agua caliente (carpas, pejerreyes, perca).

II. <i>Químico:</i> Contenido en oxígeno de las aguas del fondo	Alto todo el año	Puede ser bajo o estar ausente
Contenido total de sales (conductividad específica)	Generalmente baja	A veces muy alta
III. <i>Físico:</i> Profundidad media de la masa de agua Volumen del hipolimnion Temperatura de las aguas del hipolimnion	Frecuentemente profunda Frecuentemente grande Generalmente fría	Frecuentemente poco profunda Puede ser pequeño o grande Generalmente el agua fría es mínima.
IV. <i>Uso del agua</i> Calidad del agua para la mayoría de los usos domésticos e industriales	Buena	Frecuentemente deficiente
II. <i>Químico:</i> Contenido en oxígeno de las aguas del fondo	Alto todo el año	Puede ser bajo o estar ausente
Contenido total de sales (conductividad específica)	Generalmente baja	A veces muy alta
III. <i>Físico:</i> Profundidad media de la masa de agua Volumen del hipolimnion Temperatura de las aguas del hipolimnion	Frecuentemente profunda Frecuentemente grande Generalmente fría	Frecuentemente poco profunda Puede ser pequeño o grande Generalmente el agua fría es mínima.
IV. <i>Uso del agua</i> Calidad del agua para la mayoría de los usos domésticos e industriales	Buena	Frecuentemente deficiente

La eutrofización de los sistemas acuáticos se considera, generalmente, como una situación indeseable, ya que sus efectos pueden interferir de forma importante con los distintos usos que el hombre hace de los recursos acuáticos (por ejemplo, abastecimiento de agua potable, uso recreativo, riego, etc.). Por consiguiente, las aguas eutróficas están más sujetas a restricciones en su utilización general que las oligotróficas. Sin embargo, también debe tenerse en cuenta que el aumento de la productividad a todos los niveles tróficos en el proceso de la eutrofización puede tener rasgos positivos en algunas circunstancias.

OECD (1992), señala que los lagos oligotróficos se caracterizan normalmente por tener concentraciones bajas de nutrientes en la columna de agua, poseer baja productividad primaria y de biomasa, y mayor riqueza de flora y fauna lo cual permite usos diversos del agua. En contraste, las aguas eutróficas tienen un alto nivel de productividad y de biomasa en todos los niveles tróficos. En estos niveles, con frecuencia proliferan las cianobacterias, mientras que otros grupos poseen una baja riqueza. En las aguas profundas, anóxicas (hipolimnion), los períodos de estratificación térmica poseen a menudo menos diversidad y tienen un crecimiento intenso de plantas acuáticas en la zona litoral y una calidad inadecuada del agua para muchos de sus usos (Tabla 3). Se cita que cantidades altas de nitrógeno en el agua pueden ser también peligrosas para la salud humana. Los efectos negativos de la eutrofización están relacionados con el suministro del agua potable, los usos industriales, el abastecimiento para riego y el uso deportivo.

La disponibilidad de oxígeno en el hipolimnion, las reacciones a las menores concentraciones de éste en la interfase sedimento-agua, son claves para la dinámica total del lago; y en este aspecto, las características y estado de los sedimentos pueden ser tanto o más importantes que la columna de agua. Los sedimentos están conformados por partículas pequeñas separadas por espacios intersticiales llenos de líquido o “agua de poro”. En la interfase sedimento-agua o microzona se intercambian elementos como fósforo, entre los sedimentos y la columna de agua. Si esta interfase está anóxica, iones fosfatos pueden difundir a una tasa dependiente del gradiente de concentración entre el “agua de poro” y el agua de la columna. Si la interfase está oxigenada, los iones fosfatos precipitan y no difunden. Los sedimentos anóxicos liberan fósforo hasta 1000 veces más que los óxidos.

La actividad química más importante en la interfase es el cambio del fósforo desde la fase sólida a fosfato soluble en las aguas intersticiales, desde donde puede ser liberado a la columna de agua. Las muestras de sedimento

reflejan la fertilidad relativa de los lagos y contienen 0,06 a 10 mgL de fósforo soluble intersticial. Estos niveles son muchas veces mayores que los de las aguas de la interfase que solo alcanzan entre 0,002 y 0,05 mgL . La cantidad de arcillas en los sedimentos es un factor importante para determinar la capacidad de mantención de fósforo. Estas arcillas son una combinación de silicatos complejos de aluminio y hierro y sus óxidos. La forma más pura de arcilla es la kaolina cuya composición es $AlO \times 2SiO \times 2H O$. Las arcillas adsorben fósforo por la interacción entre el PO y el Al . El fosfato es incluso adsorbido directamente a óxidos hidratados de hierro o aluminio, partículas de calcita (carbonato de calcio) y apatita (fosfato de calcio). El fosfato puede ser incluso ocluido en óxidos de hierro y sedimentos. La cantidad de fosfatos precipitados, a diferencia del fosfato adsorbido es también controlado por pH y E Como la concentración de fosfato y el pH varían, se precipitan diversos compuestos metálicos de fósforo. Cuando el proceso es revertido, la cantidad de fosfato liberado a las aguas intersticiales es regulado por minerales que tamponan las pérdidas desde otros minerales. Adicionalmente, el fósforo orgánico liberado por los organismos en descomposición modifica aún más la cantidad de fósforo en el “agua de poro”. La actividad biológica afecta al fósforo del “agua de poro” ya que los sedimentos son una fuente importante de animales detritívoros tales como larvas de insectos, gusanos, moluscos, crustáceos e incluso peces. Estos organismos excretan compuestos solubles de fósforo en el “agua de poro” mientras ellos excavan y se alimentan en los primeros centímetros del sedimento recientemente depositado, especialmente cuando la producción de plancton es alta y sedimenta a su muerte. Las algas y macrófitas junto al zooplankton liberan fósforo al descomponerse, a lo cual se suma la actividad bacteriana.

SALINIZACIÓN

El deterioro acelerado de la calidad de las aguas naturales durante las últimas décadas se debería al efecto de la permanente incorporación de materia orgánica y desechos agroindustriales en los sistemas acuáticos. A este efecto se suma la creciente demanda por el agua y los cambios globales que inciden en algunas zonas del mundo en la disminución del volumen de los sistemas a niveles críticos. Esto es especialmente importante en regiones con déficit hídrico como es el caso de las zonas áridas, donde la evaporación es superior a la pluviosidad.

En la meseta de altura del sur de Los Andes conocida como altiplano, el agua de los humedales es el factor gravitante en la conservación de la biota de este desierto de altura y adaptaciones a características extremas, especialmente de luz, temperatura y salinidad.

Estudios recientes se han centrado en la evaluación de la calidad del agua considerando el efecto de los cambios cíclicos de mediano y largo plazo sobre la base de la estimación de las tasas de evapotranspiración en zonas de humedales, por el significado que esta tendría en la generación de los salares originados desde los paleolagos de la zona.

La salinización de las aguas es el producto de dos procesos históricos: la incorporación de solutos como consecuencia de reacciones químicas de alteración de rocas y la concentración de sales por evaporación. El estudio de los salares ha demostrado que variaciones mínimas de los parámetros climáticos provocan variaciones de la superficie lacustre y de su nivel (Risacher y Fritz 1995). La mayor demanda de agua y los cambios climáticos actuales podrían estar acelerando el proceso de salinización en la región.

La zona de los humedales altiplánicos, presentan lluvias torrenciales en cortos períodos de tiempo y con arrastre de materiales que incorporarían sales minerales al sistema, lo cual se acentúa durante los eventos cíclicos generados con el Fenómeno de El Niño. El régimen pluvial tiene fuerte variabilidad interanual y ha sido descrito que durante la fase negativa de la Oscilación del Sur, la precipitación en el altiplano suele ser deficitaria presentan un balance hídrico negativo durante los últimos años (Aceituno 1997; Salazar 1997).

A pesar de que los sistemas acuáticos intertropicales se señalan como estables, la salinidad y la composición del fitoplancton del lago presenta variaciones significativas durante los últimos años, (Dorador, 2002). Los cambios interanuales e interdecadales de la precipitación, modifican la calidad química del agua y consecuentemente la composición y abundancia de la vegetación y de las microalgas.

El proceso de salinización en el altiplano muestra la existencia de numerosas cuencas cerradas con lagunas y salares que tienen una compleja historia geoquímica. La sucesión de eventos de precipitación de sales en períodos geológicos secos y su redisolución en épocas húmedas se observan en la columna estratigráfica. En esta suelen encontrarse estratos salinos a distintas profundidades que constituyen fuentes de solutos, en especial para aguas subterráneas. El alto número de salares del altiplano, incluido el extenso salar de Uyuni provienen de la desecación de paleolagos del Cuaternario. La salinización del agua en estas cuencas ha sido el producto de dos mecanismos. Uno es el de incorporación de solutos como consecuencia de reacciones químicas de alteración de rocas. Otro posterior, es el de su concentración.

En el primer mecanismo la descomposición de la materia y la consecuente producción de gases CO y CH₄, desde vertientes y acuíferos de los humedales se incrementa al ser transportados aguas abajo en solución. La incorporación de CO₂ acidificaría el agua y se produciría una mayor alteración meteórica de las rocas. Esto conjun-

tamente con la mayor tasa de evapotranspiración ha incrementado la concentración salina de las aguas superficiales.

Si se considera que los cambios climáticos actuales implican especialmente la incorporación de CO a la atmósfera y el incremento térmico de algunas zonas, a los ciclos de sequía en las zonas áridas, se sumaría la salinización del agua por los efectos mencionados junto con la disminución del volumen de los sistemas acuáticos. Estudios recientes acerca de los lagos salados señalarían que variaciones mínimas de los parámetros climáticos provocarían rápidamente variaciones de la superficie del lago y de su nivel (Aceituno, 1997) lo que es de importancia si se considera que la hidrología de la zona y el proceso geológico de generación de sistemas de salares podría estar siendo acelerado por los cambios climáticos globales.

En su sentido más simple, un modelo es una aproximación del mundo real” (Ryding y Rast, 1992) y permiten obtener información de los sistemas sin repetir la obtención de información y los modelos simples de eutrofización de lagos y embalses que relacionan la concentración y la carga de fósforo, han probado ser muy útiles para la estimación de la eutrofización.

Se describen a continuación los modelos más usados internacionalmente en esta predicción. Ellos son preferentemente empíricos y han sido diseñados para predecir la concentración total de fósforo como una función de la carga anual de este elemento. Sus respectivas ecuaciones se detallan en orden cronológico.

Dillon y Rigler (1974)

Este modelo combina la ecuación del coeficiente de retención de fósforo (R) con una relación simple predictiva de fósforo. El coeficiente de retención (R) se define como la razón entre la cantidad de fósforo retenido en el lago y el ingreso de fósforo. Puede ser calculada usando la ecuación de regresión de Kichner y Dillon. Estos autores usaron este coeficiente para predecir la concentración total de fósforo. (TP, mgL) combinándola con la carga total de ingreso de fósforo (Lp,mgm yr) y la carga de área anual (qs,myr), tal cual se muestra a continuación (Dillon y Rigler, 1974).

$$R = 0,426 * e^{(-0,271 * qs)} + 0,574 * e^{(-0,00949 * qs)}$$

$$TP = \left(\frac{Lp}{qs}\right) * (1 - R)$$

Vollenweider (1975)

Vollenweider (1975) desarrolló en diferentes etapas la relación que predice la concentración total de fósforo (TP, mgL) como una función del aporte anual de fósforo (Lp, mg.m yr), la carga anual por área (qs, m.yr) y el tiempo de residencia (tw, yr).

$$TP = (Lp / qs) * (1 + \sqrt{tw})$$

Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico “OECD” (1992)

OECD (1992) verificó la aplicabilidad de la ecuación de Vollenweider e hizo algunos cambios produciendo una expresión nueva. Esta nueva relación predice la concentración anual promedio de fósforo ([P] , gL) como una función del flujo promedio anual de concentración total de fósforo ([P] , gL) y el tiempo de residencia del agua. (tw, yr).

$$[P]_a = 1.55 * \left\{ [P]_j / (1 + \sqrt{tw}) \right\}^{1.82}$$

CONCLUSIONES

La ubicación geográfica y el origen de los sistemas lacustres y fluviales, conjuntamente con la calidad del suelo que drenan y los afluentes que reciben determinan las variables físicas, químicas, la diversidad biológica y por ende la producción de los mismos. Es importante discutir y analizar las variables forzantes y predictoras para programas de vigilancia de los sistemas acuáticos continentales con el fin de obtener una base de datos confiable para el uso de modelos de predicción de la eutrofización y en la mantención de la calidad de las aguas interiores para el uso humano y la conservación de la diversidad biológica, así como algunas medidas de remediación de sistemas deteriorados.

REFERENCIAS

Aceituno P., 1997, Aspectos Generales del Clima en el Altiplano Sudamericano. El Altiplano, Ciencia y Conciencia de los Andes. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Santiago (Chile): 63-69.

- Dillon P.J.; Rigler, F. H., 1974, The Phosphorus-Chlorophyll Relationship in Lakes. *Limnology and Oceanography* 19, 5, 767-773.
- Dorador, C., Pardo, R.; Vila, I., 2003, Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del lago Chungará. *Revista Chilena de Historia Natural* 76:15-22.
- Horne, J.; Goldman, Ch., 1994, *Limnology*. Mc Graw-Hill. 576 pp.
- Jones J. R.; Bachman, R.W., 1976, Prediction of Phosphorus and Chlorophyll levels in Lakes. *Journal WPCF* 48, 9, 2176-2182.
- Rast, R.W.; Jones A.; Lee G.F., 1983, Predictive capability of US OECD phosphorus loading eutrophication response models. *Journal WPCF*, 55, 7, 990-1003.
- Reckhow, K.H., 1979, Uncertainty analysis applied to Vollenweider's phosphorus loading criterion. *Journal WPCF* 51, 8, 2123-2128.
- Ryding, S.O.; RAST,W., 1992, El control de la eutrofización en lagos y pantanos. UNESCO. Ed. Pirámide, S.A. Madrid.
- Salazar, C., 1997, Hidrología del sector altiplánico chileno. *El Altiplano, Ciencia y Conciencia de los Andes. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos. Santiago (Chile):71-77.*
- Wetzel, R., 2001, *Limnology*. Saunders College Pu. 767 pp.

[Volver a: Agua en el cono sur de América](#)