

Relaciones entre biomasa algal y nutrientes en embalses subtropicales de Argentina y Brasil

María Mónica Salusso y Liliana Beatríz Moraña

Facultad de Ciencias Naturales
Universidad Nacional de Salta
Avenida Bolivia 5150 (4400) Salta
msalusso@unsa.edu.ar

RESUMEN

El crecimiento del fitoplancton, está limitado por los macronutrientes inorgánicos. En general se acepta que el fósforo, por su reducida biodisponibilidad, suele ser limitante; aunque el hecho de regenerarse desde los sedimentos, determina que en muchos embalses tropicales, sea el nitrógeno restrictivo para el crecimiento algal.

Existen pocos trabajos que exploran la relación entre nutrientes y biomasa algal en regiones sub tropicales, en especial en el hemisferio sur. Se compara la situación trófica de diferentes reservorios del noroeste y centro argentino con reservorios de Brasil para determinar si existen diferencias regionales en la relación entre nutrientes y biomasa autotrófica.

Se utilizaron las variables tróficas: NT y PT, clorofila *a*, transparencia y *K* (coeficiente de extinción total de la luz) de un total de 30 embalses de Brasil y 29 de Argentina, con base a datos de Quirós 1997 modificado; Huszar *et al.*, 2006. Los cuerpos de agua se encuentran emplazados entre 30° y 35.70° de latitud sur.

Los promedios de NT (nitrógeno total) fueron más elevados en reservorios de Argentina (1850,91 µg/L) en comparación con Brasil (1132,90 µg/L) ($W=1021,50, p=0.0262$). En consecuencia, la relación NT/PT presentó la misma tendencia, con promedio en Argentina de 68.94 superior a la proporción obtenida para Brasil (20.30) ($W=1328, p=0.0001$). No obstante, no existieron diferencias significativas en la biomasa algal entre ambos países.

Los reservorios (sub) tropicales analizados en general son meso a eutróficos, y muy pocos hipereutróficos. Los reservorios brasileños no presentaron una mayor producción de biomasa promedio acorde con la posición geográfica (latitud). Las variables morfométricas (área superficial, profundidad media), no incidieron de manera determinante al momento de evaluar la biomasa, dado que independientemente de la distribución de los cuerpos de agua (altitud, tipología del sustrato y presión antrópica relativa), a nivel regional están regulados por la disponibilidad relativa de ambos macronutrientes, (en especial el nitrógeno). La vinculación significativa existente entre la concentración del nitrógeno y la biomasa del fitoplancton parece ser determinante en sistemas ubicados en regiones sub(tropicales).

Palabras claves:

Estado trófico, reservorios, Brasil, Argentina



ABSTRACT

Phytoplankton growth is limited by inorganic macronutrients. It is generally accepted that phosphorus, for its low bioavailability, is often limiting, but the fact their regeneration from the sediments, determines that nitrogen were restrictive of algal growth in many tropical reservoirs.

There are few studies that explore the relationships between nutrients and algal biomass in subtropical regions, especially in the southern hemisphere. We compare the trophic status of different reservoirs in northwestern and central Argentina with Brazil's reservoirs to determine whether regional differences exist in the relationship between nutrients and autotrophic biomass.

We used the trophic parameters (TN and TP, in $\mu\text{g/L}$), transparency, chlorophyll *a* and *K* (total light extinction) of 30 dams in Brazil and 29 in Argentina, based on data from Quirós (1997) modified and Huszar *et al.* (2006). Water bodies are placed between $30^\circ - 35.70^\circ$ S latitude.

The average TN (total nitrogen) was higher in reservoirs of Argentina (1850.91 mg/L) compared to Brazil's (1132.90 mg/L) ($W=1021.50$, $p=0.0262$). Consequently, the ratio NT/NP showed the same trend, averaging 68.94 in Argentina in relation to the ratio obtained for the average data from Brazil (20.30) ($W=1328$, $p=0.0001$). However, there were no significant differences in the algal biomass between the two countries.

Subtropical and tropical reservoirs analyzed are generally meso to eutrophic, with few hypertrophic exceptions. The Brazilian dams did not provide a higher average biomass production according to their geographical position (latitude). The morphometric parameters (surface area, mean depth) did not exert a primary influence on biomass, regardless of the water bodies distribution (altitude, type of substrate and human pressure), at regional level are regulated by the relative proportion of both macronutrients (especially nitrogen). The significant relationship between nitrogen concentration and phytoplankton seems to be determinant in aquatic systems located in (sub)tropical regions.

Keywords

Trophic state, reservoirs, Argentina, Brazil

Introducción

El deterioro de los ambientes acuáticos constituye un problema mundial, en particular los sistemas lénticos que sostienen importantes servicios ambientales, tales como soporte de biodiversidad, retención de sedimentos y reciclado de nutrientes, control de inundaciones, y provisión de agua para consumo humano, irrigación, actividades recreativas y pesca, entre otros.

La producción primaria en sistemas tropicales es en general, mucho mayor que en sistemas templados, principalmente debido a la alta capacidad fotosintética del fitoplancton en los primeros (Amarasinghe & Vijverberg 2002).

Los ambientes de agua dulce subtropicales de regiones áridas, se caracterizan por condiciones climáticas rigurosas en particular debido a la estacionalidad de las precipitaciones y a la amplitud térmica diaria y estacional, y en la época de sequía se favorece una mayor producción del fitoplancton debido a la irradiación lumínica y temperaturas cálidas. Mientras que en regiones templadas la productividad de los ambientes lénticos está condicionada principalmente por la variabilidad estacional, en sistemas tropicales el régimen hidrológico de los ríos que los alimentan regula la disponibilidad de nutrientes, turbidez del agua, tasas de sedimentación, migración de peces y productividad primaria, y en general la conectividad de los distintos ambientes en la cuenca (Declerck & Ollevier, 2007).

La biomasa y composición del fitoplancton dependen de las interrelaciones entre factores físicos como temperatura, circulación del agua, y factores químicos como concentración de nutrientes y distribución relativa de diferentes iones disueltos, y de factores biológicos como interacciones de especies.

La productividad primaria de los ambientes acuáticos aumenta en general según va disminuyendo la latitud, debido a que en latitudes más bajas la radiación solar y la temperatura son mayores (Tundisi, 1983).

Se acepta que el crecimiento óptimo del fitoplancton ocurre a una relación atómica N/P de 16:1 (relación de Redfield) y si la relación es inferior a 10:1 puede existir deficiencia en nitrógeno, mientras que si la relación es mayor a 20:1, el ambiente sería deficiente en fósforo; y en el rango comprendido entre 10:1 - 20:1, ambos nutrientes pueden ser limitantes (Elser *et al.*, 1996).

En ambientes sujetos a un ciclo hidrológico de aguas altas y bajas, el crecimiento del fitoplancton durante esta última fase ha sido considerado inferior al período de precipitaciones (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008) debido a los procesos de sedimentación de nutrientes; aunque en algunos reservorios del noroeste argentino, la estabilidad de la columna de agua y la autoregeneración de nutrientes determinó que la biomasa algal sea significativa en esa fase (Salusso, 2010).

El crecimiento del fitoplancton, está restringido por los macronutrientes inorgánicos. En general se acepta que el fósforo, por su reducida biodisponibilidad, suele ser limitante; aunque el hecho de regenerarse desde los sedimentos, determina que en muchos embalses tropicales, sea el nitrógeno restrictivo para el crecimiento algal, sobre todo debido a que es en la estación seca cuando las temperaturas son elevadas, y las bacterias promueven la conversión del nitrato a nitrógeno gaseoso (Moss, 2010).

Existen pocos trabajos que exploran la relación entre nutrientes y biomasa algal en regiones (sub) tropicales, en especial en el hemisferio sur. En este trabajo, se compara la situación trófica de diferentes reservorios del noroeste y centro argentino con reservorios de Brasil para determinar si existen diferencias regionales en la relación entre nutrientes y biomasa autotrófica.

Materiales y métodos

Se utilizaron las variables tróficas (NT y PT en $\mu\text{g/L}$) transparencia (*m*), clorofila *a* ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y *K* (coeficiente de extinción total de la luz, m^{-1}) de un total de 30 embalses de Brasil y 29 de Argentina, con base a datos de Quirós 1997 actualizados; Huszar *et al.*, 2006. Los cuerpos de agua se encuentran emplazados entre 30° y 35.70° de latitud sur.

Se consideraron K_p como extinción de la luz debida al fitoplancton, y K_r como la extinción producida por la turbidez debido al material inorgánico, siendo $K_r = K - K_p$. El cálculo de *K* (extinción total de la luz), se determinó a partir de los datos de transparencia (*DS*), siendo $K = -1 \times \ln (DS/DS_0)$. En tanto que $K_p = EB \times Cl$, donde *EB* es la extinción específica de la biomasa del fitoplancton, que varía entre 0.01 y 0.02 (McBride *et al.*, 1993) y para el cálculo se consideró el valor de 0.016 (Huszar *et al.*, 2006).

El análisis estadístico de la información limnológica se realizó utilizando el programa INFOSAT, versión 2013 (Di Rienzo *et al.*, 2013). Con el objeto de sintetizar la información aportada por los principales parámetros limnológicos considerados y dimensionar la importancia relativa de cada uno de ellos en la explicación global de las diferencias entre los reservorios considerados, se aplicó la técnica de Análisis de Correlación Canónica.

Resultados y discusión

Los reservorios considerados abarcan una amplia gama de condiciones morfométricas y limnológicas, tal como se aprecia en las tablas 1 y 2, con rangos de variación de varios órdenes de magnitud en los valores de las variables.

La profundidad media de los reservorios argentinos considerados resultó ser significativamente superior a sus pares brasileños (22,20 m y 11,67 m, respectivamente) ($W=1354,50$; $p=0,0061$). Idéntico comportamiento se observó en relación a los valores de transparencia, con promedios superiores en embalses argentinos (2,52 m), siendo igual a 0,93 m en los brasileños ($W=536$; $p=0,0007$).

Los promedios de nitrógeno total (NT) también fueron más elevados en reservorios de Argentina (1850,91 $\mu\text{g/L}$) en comparación a Brasil (1132,90 $\mu\text{g/L}$) ($W=1021,50$, $p=0,0262$). En consecuencia, la relación NT/PT presentó la misma tendencia, con promedios en Argentina de 68,94 en relación a la proporción obtenida para los datos promedios de Brasil (20,30) ($W=1328$; $p=0,0001$).

La intensidad de la radiación luminosa varía con la latitud, y con la época del año aunque en el medio acuático depende fundamentalmente de los procesos de absorción que cambian por las propiedades específicas de cada cuerpo de agua, atribuibles sobre todo a las sustancias disueltas y al material particulado sestónico (orgánico e inorgánico), que se expresan en los valores que alcanza el coeficiente de atenuación total de la luz ($K \text{ m}^{-1}$).

Existió una relación positiva entre biomasa algal y K ($r=0,77$; $p=0,0005$) (fig.1a). En las presas brasileñas, K presentó valores promedios superiores (2,26 m^{-1}) a pesar de no existir diferencias significativas en la cantidad de biomasa algal entre ambas regiones.

En todos los reservorios tuvo una mayor influencia la concentración del material sestónico abiótico en la conformación del coeficiente de extinción vertical, en especial en aquellos cuerpos de agua situados en la región tropical brasileña (fig. 2), y algunos pertenecientes al noroeste argentino, caso de los embalses El Cadillal (21), El Tunal (25), Escaba (23) (fig. 3). Estos últimos, incluidos en la región de las Sierras Peri-Pampeanas, con fuertes pendientes, y sometidos al impacto de erosión del suelo producto de la agricultura bajo riego, poseen cargas de materia orgánica

usualmente elevadas (Drago & Quirós, 1996; Quirós & Drago, 1999; Quirós, 2000).

La reducción de la zona eufótica causada principalmente por sólidos suspendidos alóctonos, debido a las intensas precipitaciones en el verano, llevan a la disminución de las tasas de productividad primaria, lo que es relativamente común en reservorios brasileños (Tundisi & Matsumura-Tundisi, 2008).

El nitrógeno se vinculó en forma directa con la concentración de clorofila ($r=0,78$; $p=0,0001$) (figura1b). Se observó que la relación entre biomasa y concentración de fósforo no fue significativa, a diferencia de lo que se ha documentado en climas templados (Kalf, 2002).

Se ha señalado que en sistemas subtropicales y tropicales existiría predominantemente limitación para el crecimiento algal debido al N (Elser *et al.*, 1990), aunque también existen evidencias que los sistemas pueden variar entre una limitación por P ó por N, e incluso co-limitación de ambos, con variaciones incluso estacionales en el mismo sistema (Huszar *et al.*, 2006).

En general, cabría esperar mayor restricción del crecimiento de la biomasa algal en los reservorios argentinos, por una menor disponibilidad del fósforo en relación al nitrógeno comparado con los cuerpos de agua brasileños, no obstante tener estos últimos menores concentraciones relativas de nitrógeno (fig. 4). Por otra parte, la temperatura media superior en éstos últimos, favorece la cinética del crecimiento microbiano.

El análisis de correlación canónica realizado considerando como variables dependientes a la concentración de clorofila a y los coeficientes K_p y K_r ; y como variables independientes a las concentraciones de fósforo y nitrógeno total, área, profundidad media y disco de Secchi; mostró que las dos primeras correlaciones canónicas resultaron altamente significativas (fig. 5 y 6) (tablas 3 y 4). Se observó que los valores de la primera y segunda correlación fueron 0,91 y 0,77 respectivamente. La prueba de significancia indicó que estas dos correlaciones canónicas fueron estadísticamente diferentes de cero ($p=0,000$).

La proporción de la varianza total de los datos explicada por el primer par de variables canónicas (primera correlación canónica) fue del 82 % y para el segundo par del 60 %. La construcción del primer par de variables canónicas ($C1-1=$ dependiente; y $C1-2=$

Variable	Mediana	Media	CV	Mínimo	Máximo
Área superficial (km^2)	13.50	79.35	213	1.50	816
Profundidad media (m)	15.65	22.20	88	3.00	79.40
Profundidad Secchi (m)	1.99	2.52	95	0.30	10.50
Coefficiente extinción (m^{-1})	0.86	1.33	84	0.16	5.67
Clorofila a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	7.00	18.73	211	0.66	218.10
PT ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	25.50	108.71	238	3.00	1398.33
NT ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	1334.00	1850.9	116	222.95	11200.00
TN:TP	59	68.94	69	24	272.80

Tabla 1: Estadísticos de valores promedios de variables limnológicas en embalses argentinos.

Variable	Mediana	Media	CV	Mínimo	Máximo
Área superficial (km^2)	20.85	171.46	228	0.01	1489
Profundidad media (m)	9.20	11.67	71	0.90	36.00
Profundidad Secchi (m)	0.85	0.93	47	0.40	1.90
Coefficiente extinción (m^{-1})	2.01	2.28	48	0.89	4.25
Clorofila a ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	9.39	19.44	125	1.50	97.03
PT ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	44.86	87.42	145	10.00	685.29
NT ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	828.99	1132.90	81	42.44	3571.15
TN:TP	16.60	20.30	80	1.95	93.80

Tabla 2: Estadísticos de valores promedios de variables limnológicas en embalses brasileños.

	L(1)	L(2)	L(3)
R	0.91	0.77	0.62
R ²	0.82	0.60	0.39
Lambda	98.64	44.08	15.43
g1	15.00	8.00	3.00
p-valor	0.00	5.5E-07	1.5E-03

Tabla 3: Correlaciones canónicas.

	L(1)	L(2)	L(3)
Chl-µg/l	-3.36	-4.47	3.85
Kp1	3.90	3.67	-4.81
Kr	0.27	0.15	1.41
Km2	-0.04	0.07	-0.12
Zmean-m	0.09	0.03	0.14
TN-µg/l	0.04	-1.19	-0.08
TP-µg/l	-0.95	0.68	-0.55
Secchi disk (m)	0.08	0.03	-1.19

Tabla 4: Coeficientes de las combinaciones lineales.

independiente) en función de los coeficientes canónicos (estandarizados) de las combinaciones lineales, resultó en las siguientes fórmulas:

Variable canónica dependiente o variable de criterio o endógena:

$$C1-1 = -3,36 \times [Cl- \mu\text{g/l}] + 3,90 \times [Kp] + 0,27 \times [Kr]$$

Variable canónica independiente o variable predictora o exógena:

$$C1-2 = -0,04 \times [\text{área km}^2] + 0,09 \times [Z \text{ media}] + 0,04 \times [\text{nitrógeno total } \mu\text{g/l}]$$

$$-0,95 \times [\text{fósforo total } \mu\text{g/l}] + 0,08 \times [\text{disco de Secchi}]$$

Los coeficientes canónicos de la primera variable canónica dependiente indican que la información aportada por el coeficiente Kp y la concentración del pigmento fotosintético poseen la mayor influencia en su formación. Los coeficientes canónicos de la primera variable canónica independiente sugieren que la concentración de fósforo total posee el mayor peso en su formación.

Al realizar el gráfico de la primera correlación canónica (figura 5), donde la variable canónica independiente (C1-2) se ubicó en el eje X y la dependiente (C1-1) en el eje Y, podemos observar la distribución espacial de los sitios estudiados, hacia la parte negativa de la C1-2 se ubicaron muestras de reservorios brasileños (Tapacurá (b41), Algodões (b1), Garças (b3), Juturnaiba (b6),

Chapeu(b10), Paranoá(b39), caracterizados por poseer los mayores registros de clorofila a y de fósforo total. Son sitios que presentan menor profundidad y con alta capacidad regenerativa del nutriente desde los sedimentos.

La construcción del segundo par de variables canónicas (C2-1= dependiente; y C2-2= independiente) en función de los coeficientes canónicos (estandarizados) de las combinaciones lineales resultó en las siguientes fórmulas:

Variable canónica dependiente o variable de criterio o endógena:

$$C1-1 = -4,47 \times [Cl- \mu\text{g/l}] + 3,67 \times [Kp] + 0,15 \times [Kr]$$

Variable canónica independiente o variable predictora o exógena:

$$C1-2 = -0,07 \times [\text{área km}^2] + 0,03 \times [Z \text{ media}] - 1,19 \times [\text{nitrógeno total } \mu\text{g/l}]$$

$$+ 0,68 \times [\text{fósforo total } \mu\text{g/l}] + 0,03 \times [\text{disco de Secchi}]$$

Los coeficientes canónicos de la segunda variable canónica dependiente sugieren que la concentración de clorofila y por ende el coeficiente Kp poseen la mayor influencia en su formación, mientras que en la segunda variable canónica independiente,

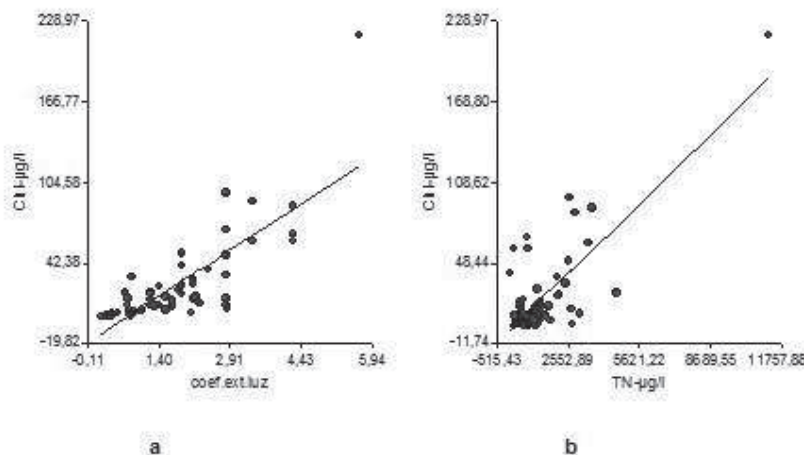


Fig. 1: Distribución de los valores de biomasa en función del coeficiente de extinción vertical de la luz (a) y de la concentración de nitrógeno total (b).

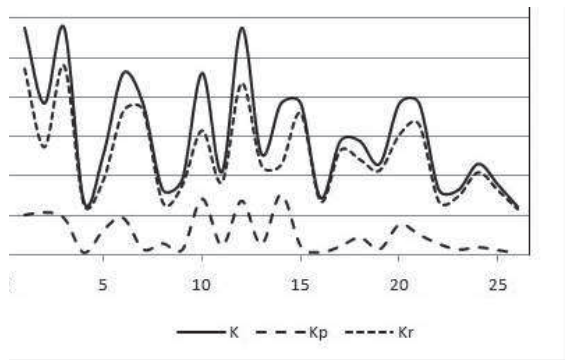


Fig. 2. Comparación de valores de coeficientes de absorción (K= extinción total, Kp= por clorofila y Kr= sestón abiótico) en reservorios brasileños.

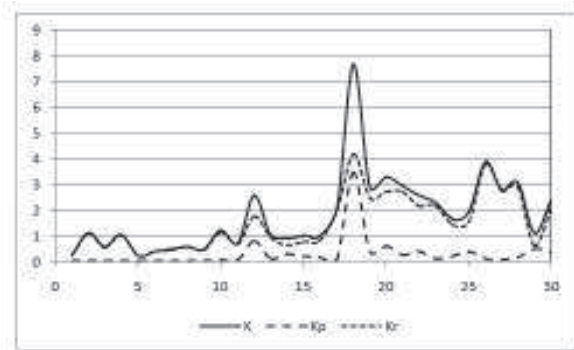


Fig. 3. Comparación de valores de coeficientes (K=extinción total, Kp= clorofila y Kr= sestón abiótico) en reservorios argentinos.

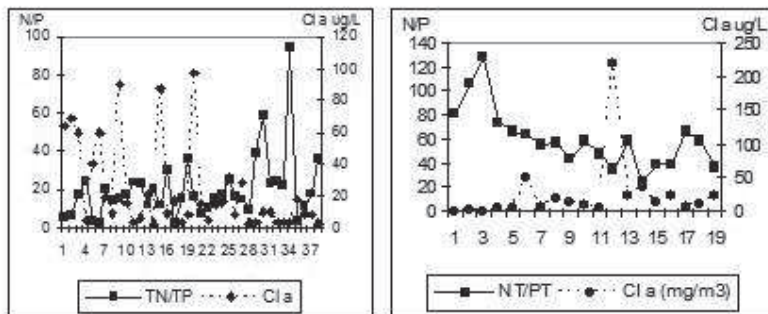


Fig. 4. Valores de biomasa del fitoplancton ($m.g.m^{-3}$) y de relación NT/PT ($\mu g/L$) en reservorios brasileños (izquierda) y argentinos (derecha).

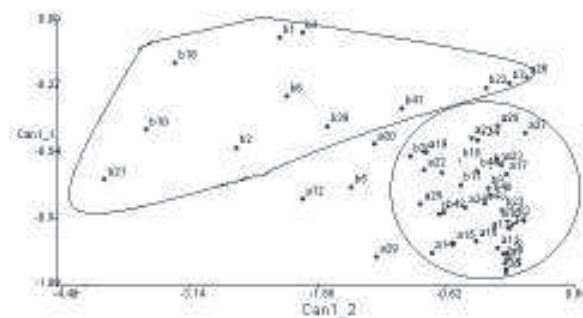


Fig. 5. Representación gráfica de la Primera Correlación Canónica.

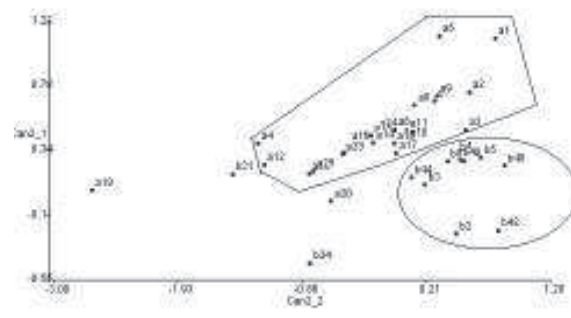


Fig. 6. Análisis de la Segunda Correlación Canónica.

los mayores pesos fueron aportados por las concentraciones de nitrógeno y fósforo total.

Al realizar el gráfico de la segunda correlación canónica, donde la variable canónica independiente (C2-2) se ubicó en el eje X y la dependiente (C2-1) en el eje Y, se observó que, en general, hacia la región positiva de la variable canónica dependiente se ubicaron los reservorios argentinos caracterizados por menores registros de clorofila a y menores valores de Kp, mientras que hacia la parte negativa se encontraron distribuidos los sitios de estudio brasileños (figura 6).

Conclusión

Los reservorios subtropicales analizados son en general meso a eutróficos, y con pocas excepciones hipereutróficos. A pesar de

efecto diferencial del material particulado, y su incidencia en los menores valores de transparencia en los reservorios brasileños; éstos no presentaron una mayor producción de biomasa promedio acorde con la posición geográfica (latitud). Las variables morfológicas (área superficial, profundidad media), no incidieron de manera determinante en la biomasa, dado que independientemente de la distribución de los cuerpos de agua (altitud, tipología del sustrato y presión antrópica relativa), a nivel regional están regulados por la disponibilidad relativa de ambos macronutrientes, (en especial el nitrógeno). La vinculación significativa existente entre la concentración del nitrógeno y la biomasa del fitoplancton parece ser determinante en sistemas ubicados en regiones subtropicales.

Referencias

- Amarasinghe, P. B. & Vijverberg, J. 2002. Primary production in a tropical reservoir in Sri Lanka. *Hydrobiologia*, 487: 85–93.
- Declerck, S. & Ollevier, F. 2007. Recent advances in the aquatic ecology of temperate and tropical freshwater systems. Pp. 1009-1018. In: Jan Feyen, Luis Aguirre y Mónica Moraes (eds). International Congress on Development, Environment and Natural Resources: Multi-level and Multi-scale Sustainability. Universidad Mayor San Simón. Cochabamba, Bolivia
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini M.G.; González, L.; Tablada, M. & Robledo, C.W. 2013. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Elser, J.J.; Marzolf E.R. & Goldman, C.R. 1990. Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwater of North America: a review and critique of experimental enrichment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47: 1468 -1477.
- Elser, J.J.; Dobberfuhl, D.R.; Mackay, N.A. & Schampel, J.H. 1996. Organism size, life history, and N:P stoichiometry. *BioScience*, 46: 674-684.
- Huszar, V.L.M.; Caraco, N.F.; Roland, F. & Cole, J. 2006. Nutrient-chlorophyll relationships in tropical subtropical lakes: do temperate models fit?. *Biogeochemistry*, 79 : 239 – 250.
- Kalf, J. 2002. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall, New Jersey.
- Mc Bride, G.B.; Vant W.N.; Cloern, J.E. & Liley J.B. 1993. Development of a model of phytoplankton blooms in Manukau Harbour. *Ecoyst.*, 3: 1 – 52.
- Moss, B. 2010. *Ecology of Freshwaters. A view for the twenty-first century*. Wiley-Blackwell 4th ed. 470 pp.
- Quirós, R. 1990. Factors related to variance of residuals in chlorophyll-total phosphorus regressions in lakes and reservoirs of Argentina. *Hydrobiologia* 200/201:343-355.
- Quirós, R. 1997. Classification and state of the environment of the Argentinean Lakes. ILEC Workshop on Sustainable Management of the Lakes of Argentina. Pp. 29-50.
- Quirós, R. & Drago, E. 1999. The environmental state of Argentinean lakes: An overview. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 4: 55-64.
- Quirós, R. 2000. La eutrofización de las aguas continentales de Argentina. 2000. pp: 43-47. En: A. Fernández (ed.) *El Agua en Iberoamérica: Acuíferos, Lagos y Embalses*. CYTED. Aprovechamiento y Gestión de Recursos Hídricos. 147 pp.
- Salusso, M.M. 2010. Caracterización limnológica de una cuenca subtropical arida del noroeste argentino. 2010. Editorial Académica Española, 126 pp.
- Tundisi, J.G. 1983. A review of basic ecological processes interacting with production and standing stock of phytoplankton in lakes and reservoirs in Brazil. *Hydrobiologia*, Baarn, Holanda. 100: 223 -243.
- Tundisi, J.G. & Matsumura-Tundisi, T. 2008. *Limnologia*. Oficina de Textos, Sao Paulo, Brazil. 631 pp.