

Variación diurna y estacional del contenido calórico, la estabilidad y el trabajo del viento en una laguna tropical

RAMIREZ R., J. J.

Universidad de Antioquia, Departamento de Biología, apartado aéreo 1226, Medellín-Colombia.

E-mail: jjram@matematicas.udea.edu.co

RESUMEN: Variación diurna y estacional del contenido calórico, la estabilidad y el trabajo del viento en una laguna tropical. La laguna del Parque Norte (06° 17'N - 75° 33.4' W) es un sistema raso con algunas irregularidades mínimas en el contorno ($D_L = 1.31$), pendientes fuertes en las orillas, fondo plano, zona litoral pobremente desarrollada ($D_v = 2.29$) y alta inestabilidad de la columna de agua ($Z_r = 0.91\%$). La variación anual del contenido calórico durante el presente estudio fue baja ($CV = 3.8\%$) con un valor mínimo de 2.786 kcal.cm² en septiembre 17 de 1991 y un máximo de 3.272 kcal.cm² en mayo 16 del mismo año. Esta baja variabilidad fue corroborada por el valor del contenido calórico anual (0.49 kcal.cm²) y debida al patrón de estratificación diurna del lago, a su poca protección contra el viento, a su baja profundidad y a las altas pérdidas de calor por convección. El contenido calórico diario representó entre el 23.1% y el 49.0% del contenido calórico anual. El sistema no almacena calor en la noche ya que la diferencia entre las medias diurnas y nocturnas de contenido calórico es muy pequeña, por lo que se trata de un sistema altamente disipativo que repone el calor perdido a través de la incidencia de la radiación solar diaria. El índice de tropicalidad (1749.0 cal.cm².m⁻¹), corresponde al de un lago netamente tropical. El valor de la estabilidad térmica fue bajo (1.1 g-cm.cm²) con alta variabilidad (59.5%); por ello, la eficiencia del calentamiento también fue baja (0.066 g-cm.cal⁻¹). El trabajo medio del viento (26.0 g-cm.cm²) fue 23.3 veces mayor que el valor medio de estabilidad (1.1 g-cm.cm²) y presentó también un CV bajo (8.8%) mostrando que fue altamente constante a través del tiempo.

Palabras-clave: contenido calórico, estabilidad térmica, lago tropical, morfometría, trabajo del viento.

ABSTRACT: Diurnal and seasonal variation of heat content, stability and wind work in a tropical pond. Parque Norte lagoon (06° 17'N - 75° 33.4' W) is a shallow system with minimal irregularities in the outline ($D_L = 1.31$), steep slopes on the edges, flat bottom, littoral zone with low development index ($D_v = 2.29$) and high instability of the water column ($Z_r = 0.91\%$). The variation of the Annual Heat Content in this study was very low ($CV = 3.8\%$), with a minimum value of 2.786 kcal.cm² in September 17th 1991 and a maximum of 3.272 kcal.cm² in May 16th of the same year. This small variability was corroborated by the small value of Annual Heat Content (0.49 kcal.cm²) and due to diurnal stratification pattern of the lake, low protection against wind action, small depth and to high losses by convectional heat. Daily Heat Content represented between 23.1% and 49.0% of the Annual Heat Content. The system does not store heat at night because the difference between day and night mean values of Heat Content is very small. Due to this, the system can be considered a highly dissipative one to replace the lost heat through the incidence of daily irradiation. Coche's Tropicality index (1749.0 cal.cm².m⁻¹) indicates a typical tropical system. Thermal Stability value was

small (1.1 g-cm.cm^{-2}) with high variability (59.5%); for this, Heat Efficiency was small too ($0.066 \text{ g-cm.cal}^{-1}$). Mean Wind Work ($26.0 \text{ g-cm.cm}^{-2}$) was 23.3 times higher than mean value of Stability (1.1 g-cm.cm^{-2}) and presented a small coefficient of variation (8.8%), that means very little variation through sampling time.

Key-words: heat content, morphometry, tropical pond, thermal stability, wind work.

Introducción

Las propiedades térmicas de los lagos son descritas comúnmente en términos de sus ciclos de estratificación y circulación, con comparaciones realizadas entre perfiles de temperatura medidos en diferentes momentos del año. Estos ciclos pueden ser seguidos cuantitativamente usando variables estándar de energía, tales como el contenido calórico, la estabilidad térmica y el trabajo del viento, calculados a partir de medidas de temperatura y distribución de los volúmenes de agua (Bowling, 1990).

Aunque los valores máximos de estas variables de energía son controlados principalmente por características morfométricas, el grado de protección contra los vientos prevalecientes y el contenido de sustancias húmicas disueltas, pueden actuar como trampas de calor superficial, reduciendo la capacidad de almacenamiento calórico en el cuerpo de agua. Como consecuencia, la mayoría del mismo será absorbido cerca a la superficie y devuelto a la atmósfera en la noche, más que mezclado para capas más profundas. En general se considera que los factores morfométricos que más inciden en el contenido calórico y en el grado de estabilidad anual y diario son el área y la profundidad media, presentándose las menores cargas calóricas y las menores estabilidades térmicas en los lagos más pequeños (Gorham, 1964; Bowling, 1990).

El conocimiento del contenido calórico de un cuerpo de agua es de vital importancia, pues nos permite indicar la relación entre lagos y situación climática y sus consecuencias en la hidrodinámica lacustre. El metabolismo, la fisiología, la disposición y la conducta de los organismos están directamente relacionados con la distribución de la temperatura del ambiente acuático. Igual sucede con la distribución de nutrientes y gases en el agua. Además, debido al alto calor específico del agua, los volúmenes grandes de la misma cambian de temperatura en forma lenta y por eso, tienden a moderar los climas locales, a proveer mayores estacionamientos de crecimiento para los organismos acuáticos y a servir como registradores integrados de fenómenos climáticos recientes (Wetzel & Likens, 1991).

Los estudios de este tipo son abundantes en zonas templadas, mientras que en el trópico los mismos son limitados, registrándose entre otros pocos los de Talling (1966), Coche (1974), Wood et al. (1976) y Kling (1988) en África tropical y Mackey (1991) en el trópico australiano.

En América del Sur figuran las investigaciones de Lewis (1984) en el Lago Valencia, Venezuela; Carmouze et al. (1983) en el Lago Titicaca, en Bolivia; y las de Henry et al. (1987), Henry & Barbosa (1989), Arcifa et al. (1990) y Henry (1993) en distintos lagos y embalses brasileños.

Para Colombia no se registra ninguna investigación sobre este tópico. Por ello, el presente trabajo describe por la primera vez las variaciones diurna y estacional de las variables estándar de energía contenido calórico, estabilidad térmica y trabajo del viento para la laguna del Parque Norte, un ecosistema tropical raso. Se describe también la batimetría de la laguna analizándose los resultados de sus variables morfométricas y su relación con las variables estándar de energía

Material y métodos

Entre abril 4 de 1991 y enero 27 de 1992 fueron realizados 19 muestreos quincenales en una estación de colecta en la laguna del Parque Norte (Fig. 1). Este cuerpo de agua altamente eutrófico se localiza en el municipio de Medellín, en el departamento de Antioquia, Colombia a los $06^{\circ} 17'$ Norte y $75^{\circ} 33.4'$ Oeste. Sus rasgos morfométricos son indicados en la Tabla I. Datos más detallados de la laguna del Parque Norte pueden encontrarse en Ramírez (1987) y Ramírez & Díaz (1994, 1995).

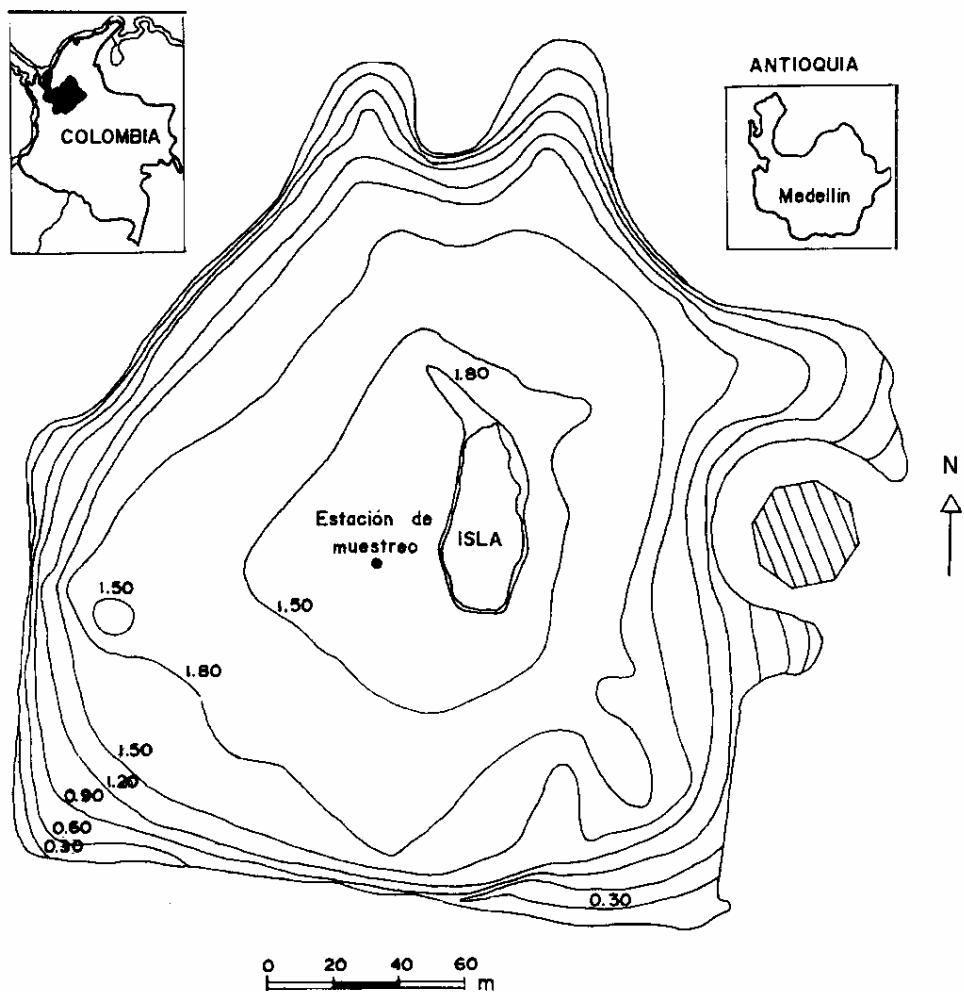


Figura 1: Mapa morfométrico de la laguna del Parque Norte.

Tabla 1: Valores de los parámetros morfométricos de la Laguna del Parque Norte.

Variable	Valor
Localización latitudinal	6° 4' N, 75° 33.4' W
Ao	41425.97 m ²
L	945.00 m
V	66198.51 m ³
Zmáx	2.10 m
Zmedia	1.60 m
Zr	0.91%
Zg	0.74 m
D _L	1.31
D _V	2.29
1/D _V	0.44
Pendiente media	1.06°
Zmedia/Zmáx	0.76
Porcentage de la pendiente media	1.84%

Los perfiles térmicos fueron llevados a cabo con un termistor (0.1°C de precisión) a intervalos de 0.25 m.

La resistencia termal relativa a la mezcla fue establecida para la columna total de agua. La fórmula utilizada es la proporcionada en Hutchinson (1957).

El contenido calórico fue calculado a partir del volumen de cada capa de agua (0.25 m de profundidad) y su temperatura media, asumiendo que un gramo de agua ocupa un volumen de 1 ml y que el calor específico del agua es 1 cal.g⁻¹.°C⁻¹ (Cole, 1983). La razón entre el contenido calórico de todas las capas y el área del lago, expresa el contenido calórico por unidad de área (cal.cm²).

La carga calórica anual fue calculada como la diferencia entre el máximo y el mínimo contenido calórico hallados durante el tiempo de muestreo.

La carga calórica diaria se calculó como la diferencia entre los contenidos calóricos máximo y el mínimo obtenidos en un periodo de muestreo nictermeral.

La ganancia media de calor por día fue establecida como la razón entre el contenido calórico anual y el tiempo transcurrido en días entre el menor y el valor mayor del año.

El trabajo del viento (B), es decir, el trabajo necesario para distribuir el calor y calentar el lago desde una condición isotérmica (determinada a partir del perfil térmico) hasta una condición estratificada, fue calculado según Birge (1916).

La eficiencia del calentamiento se estableció como la razón entre el máximo valor del trabajo del viento y el contenido calórico anual.

La estabilidad (S) de la estratificación térmica, entendida como el trabajo necesario para inducir homogeneidad térmica sin que se pierda calor en el proceso, fue calculada de acuerdo con Idso (1973).

El índice de tropicalidad (IT) utilizado fue el de Coche (1974), definido a partir de:

IT = CR/(profundidad media), CR = calor residual = el mínimo valor de contenido calórico encontrado durante el tiempo de muestreo considerado.

Resultados y discussion

Aspectos morfométricos

La laguna tiene forma subcircular y se caracteriza por ser un sistema de agua raso ($Z_{m\acute{a}x} < 10$ m) de acuerdo al criterio de Barbanti (1985). El valor del índice de desarrollo litoral ($D_L = 1.31$) muestra que la forma del lago se acerca a la circular con algunas irregularidades mínimas en el contorno. Según Wetzel & Likens (1991) y Cole (1983), los cuerpos de agua con valores cercanos a la unidad son de forma circular.

Los resultados de los cálculos morfométricos dan una curva hipsográfica que revela un perfil en forma de U abierta en el perfil del vaso de agua, con pendientes fuertes en las orillas, y declives suaves hacia el centro (Fig. 2A), pendiente media de 1.06° , fondo plano y una zona litoral pobremente desarrollada. Esta curva muestra además una forma convexa, lo que implica según Barbanti (1985) que su área de fondo se encuentra altamente influenciada por los procesos de erosión y transporte, es decir por el factor edáfico. El factor de forma ($1/D_v$, Håkanson, 1981b) que se refiere básicamente a la forma general de la curva hipsográfica de áreas, corrobora lo anterior, ya que entre más bajo sea su valor, más convexo será el fondo o sea, más parecido a un platillo volador. Este mismo factor está relacionado con el hecho de que porcentajes de la pendiente media menores del 5% (PPM = 1.84%) indican una mayor probabilidad de que los depósitos finos se sedimenten en el fondo del cuerpo de agua (Håkanson, 1982).

La curva de profundidad-volumen (Fig. 2B) muestra que el 90% del volumen del lago está contenido en los primeros 1.5 metros de profundidad, valor cercano al de la profundidad media de la laguna (1.60 m).

El valor obtenido para el índice de desenvolvimiento del volumen ($D_v = 2.29$), superior a 1, sugiere una forma alejada de la de un cono y muy cercana a la de una parábola elíptica. Otro parámetro que describe la forma de la cuenca es la relación $Z_{media}:Z_{m\acute{a}x}$. El valor de esta relación en un cono ideal de volumen igual a la unidad es de 0.333 y en los cuerpos de agua que se aproximan a una forma de parábola elíptica tiene un valor de 0.5. El valor real hallado en el ecosistema estudiado es de 0.76, indicando nuevamente un lago con forma de lenteja o platillo volador (= parábola elíptica), como puede apreciarse en la curva hipsográfica de la Fig. 2A. Al respecto, Cole (1983) señala que los lagos con áreas relativamente grandes tienen mayores D_v , lo cual indica que tienen forma de plato, más que de hoyo o bañera. Además, un valor de D_v pequeño, implica orillas pendientes y zona litoral poco desenvuelta; por ello, la curva hipsográfica (Fig. 2A) muestra una inclinación bastante pronunciada en el primer metro de profundidad y las isobatas iniciales en la Fig. 1 se presentan más cercanas entre sí que las isobatas centrales.

Para la profundidad relativa el valor hallado ($Z_r = 0.91\%$) indica que existe una pequeña desproporción entre la $Z_{m\acute{a}x}$ y la raíz cuadrada del área, ya que $Z_{m\acute{a}x}$ es 1.03% de la raíz cuadrada del área. Este índice proporciona indicios acerca de la estabilidad térmica de la columna de agua (Wetzel, 1981) y sugiere, por su bajo valor, una alta inestabilidad térmica de la misma, es decir, muy escasa resistencia a la mezcla. En general, los cuerpos de agua pequeños tienen Z_r mayores cuando comparados con lagos grandes (Cole, 1983). Los lagos con una profundidad relativa baja están menos protegidos contra el viento, mostrando, por tanto, menor transparencia, lo que indica un incremento en la producción fotosintética (Sperling, 1994).

Algunas variables morfométricas son extremadamente significantes en relación con la susceptibilidad del agua a la eutroficación y a la productividad de los ecosistemas. Es el caso de la profundidad media, que muestra una correlación inversa con respecto a la productividad en todos los niveles tróficos de los lagos

grandes. Esta relación pierde valor en lagos pequeños, lo que indica que la regulación de la dinámica del metabolismo y de la productividad en los ecosistemas es polifacética. Por ello, la morfometría, a pesar de su importancia, es sólo uno de los factores de interacción (Wetzel, 1981) y debe enfatizarse en que los valores derivados de su estudio, sólo deben ser utilizados para determinar tendencias y no pueden sustituir un monitoreo adecuado del cuerpo de agua (Sperling, 1994).

En general existe una correlación inversa de la profundidad media con respecto a la densidad fitoplanctónica y el coeficiente de difusión vertical de la temperatura (LeCren & Lowe-McConnell, 1980; Cole, 1983) y directa entre la profundidad media y la capacidad del cuerpo de agua para absorber factores externos de estrés (Vollenweider, 1976).

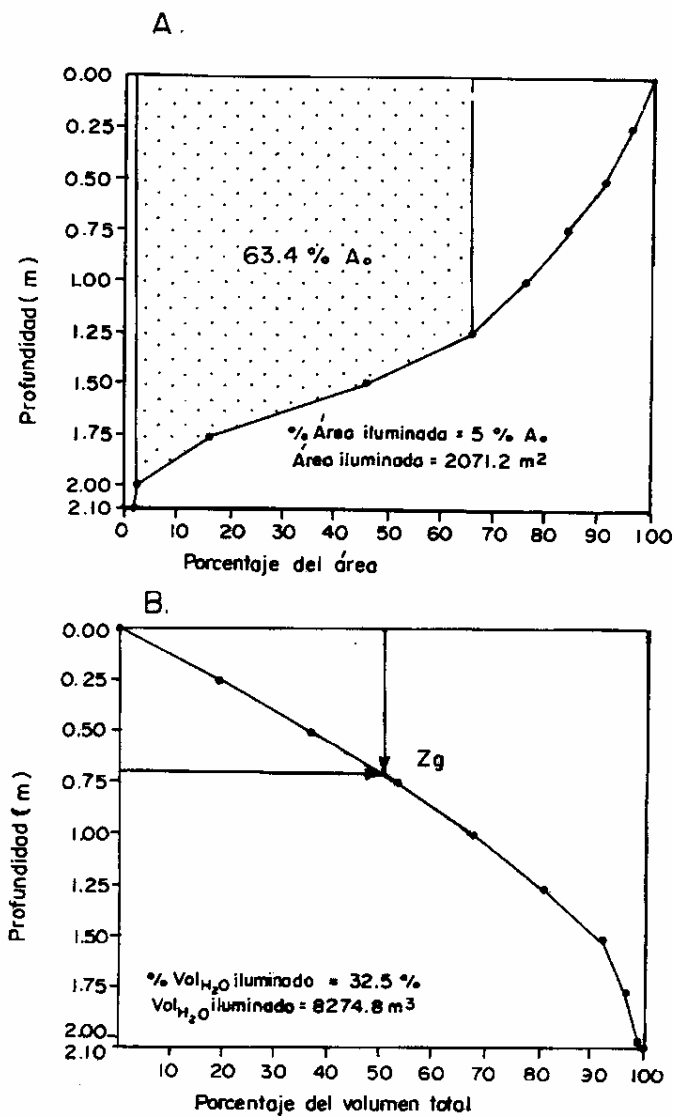


Figura 2: (A) Curva hipsográfica de área. (B) Curva hipsográfica de volúmen.

Contenido calórico

La pluviosidad y la temperatura del aire en los Trópicos presentan comportamientos marcadamente contrastantes, considerándose a la primera conjuntamente con el patrón de vientos como los factores climáticos más influyentes en el comportamiento de los cuerpos de agua en esta zona. Por eso, en la Fig. 3A se observa que mientras la temperatura media mensual del aire mostró un comportamiento relativamente uniforme (CV = 3.4%), la pluviosidad mostró una alta variación (CV = 58.9%). Esto significa que la variación de la pluviosidad fue 17.3 veces la de la temperatura media del aire en el mes, como es de esperar en estas latitudes, donde las variaciones de temperatura y radiación anuales son relativamente estables en comparación con las variaciones diurnas.

La Fig. 3B presenta el porcentaje de desviación de la temperatura del día de muestreo respecto al valor medio del mes. Se observan en ella dos sectores que muestran temperaturas superiores a la media mensual, presentándose temperaturas más alejadas de la misma en el segundo sector. Nuevamente se observa que el mes de septiembre divide ambos sectores. En este mes, aunque los porcentajes fueron negativos, se situaron cerca a su media mensual. Igual sucedió para los meses de agosto, octubre y diciembre.

El contenido calórico durante el año de muestreo (Fig. 3C) presentó una disminución a partir de junio 27 de 1991. El valor medio del periodo de muestreo correspondió a 2.978 kcal.cm⁻², el mínimo fue registrado en septiembre 17 de 1991 (2.786 kcal.cm⁻²), y el máximo en mayo 16 del mismo año (3.272 kcal.cm⁻²). Observando el valor del coeficiente de variación (3.8%), puede concluirse que el cambio anual del contenido calórico fue bajo. A pesar de ello, se observa una leve estacionalidad marcada por la división del muestreo en dos periodos y señalada por el mes de septiembre. Esta aparente estacionalidad tendría que ser corroborada por estudios continuados en varios años. Sin embargo, se observa que coincide con la estacionalidad mostrada por la temperatura media mensual del aire, la pluviosidad y los porcentajes de desviación de la temperatura del aire en el día de muestreo con referencia a la temperatura media mensual del aire (Figs. 3A y 3B).

El contenido calórico anual, correspondiente a la amplitud estadística del contenido calórico, fue de 0.49 kcal.cm⁻², corroborando la poca variabilidad de este factor estándar de energía en la laguna del Parque Norte.

Esta poca variabilidad es debida principalmente al patrón de estratificación diurna del lago, a su poca protección contra el viento, su baja profundidad media y su fondo relativamente plano, que no le permiten disipar la fuerza estresante del viento en los primeros metros y con ello la mezcla diaria y la pérdida de calor. Debe resaltarse que las cargas calóricas anuales están fuertemente influenciadas por la profundidad media, ya que las columnas de agua más profundas poseen una mayor capacidad de almacenamiento de calor. Se espera incluso que el efecto de la profundidad sea mayor en los lagos rasos, como el presente. El efecto del área sobre el contenido calórico anual es tan fuerte como el de la profundidad, debido a que las áreas superficiales mayores brindan mayores oportunidades para que el estrés producido por el viento produzca un epilimnion poco profundo, mezcla de la columna de agua y exposición de las aguas profundas más frías, que roban calor (Gorham, 1964).

Los anteriores factores facilitan la pérdida del calor almacenado. Esta pérdida ocurre además por irradiación para la atmósfera y por evaporación del agua superficial, combinadas en lo que se denominan pérdidas conveccionales. No puede pensarse en pérdidas grandes por remoción del agua, ya que el volumen de agua que sale, aunque no establecido, es pequeño. Sin embargo, Coie (1983) informa que en lagos pequeños el sedimento representa una fuente relativamente significativa en la retención del calor, que aunque no fue incluida en los cálculos del contenido calórico, debe tener una influencia considerable, si se tiene en cuenta la poca profundidad del cuerpo de agua.

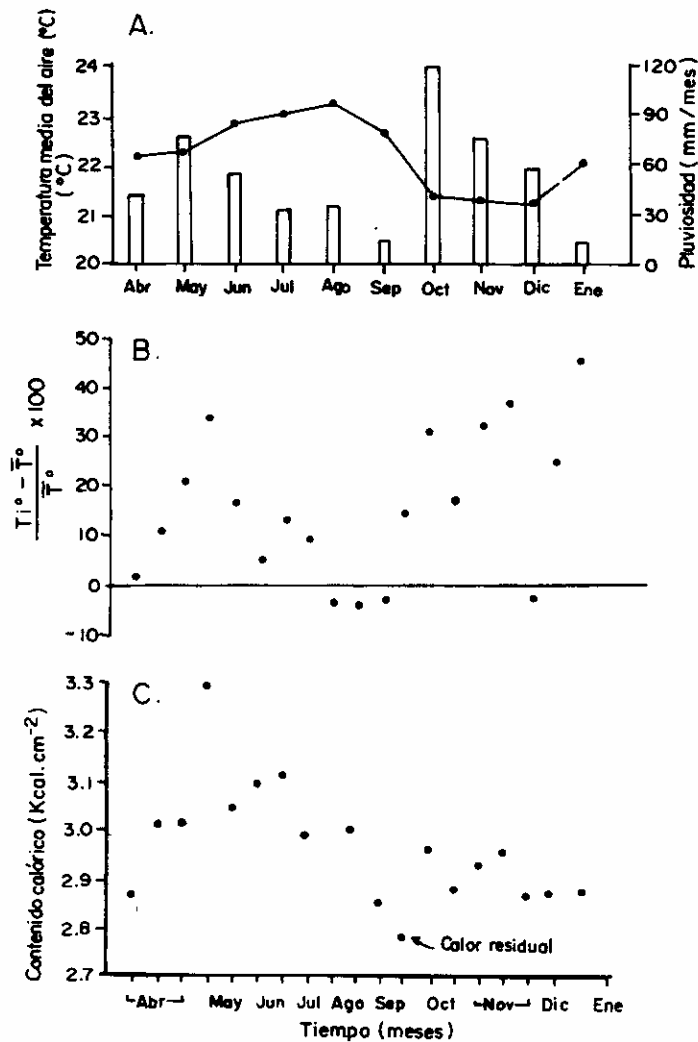


Figura 3: (A) Variación temporal de la temperatura media del aire (—●—) y la pluviosidad (□), (B) el porcentaje de desviación de la temperatura del día de muestreo en relación a la media mensual, y (C) el contenido calórico.

El contenido calórico de los lagos puede variar en días, lo que hace impredecible el momento del máximo contenido calórico (Stewart, 1973). Con intervalos de muestreo quincenales o mayores, los tiempos actuales del mínimo y máximo contenido calórico pueden ser fácilmente ignorados, conduciendo a una sobreestimación del contenido calórico anual, el trabajo del viento y la estabilidad térmica. Por ello, el conocimiento de las fluctuaciones en periodos cortos de estas variables estándar de energía es muy importante, aunque según Stewart (1973), estas fluctuaciones en muchos lagos son a menudo insignificantes en el contexto de sus cambios anuales. En nuestro caso, los cálculos referidos a los cuatro periodos nictemerales (Tab. II), mostraron que el contenido calórico diario representó entre el 23.1% y el 49% del contenido calórico anual. Esto significa que la variación en el contenido calórico diario oscila aproximadamente entre la cuarta parte y la mitad de la anual. Estos valores, no pueden considerarse insignificantes, ya que muestran que el contenido calórico diario es casi tan pronunciado como el anual, a pesar de

odos los factores climáticos y morfométricos que tienden a disminuirlo. Esto ocurre quizás porque la entrada anual de calor en los lagos tropicales es pequeña cuando comparada con aquella de los lagos templados (Mackey, 1991) debido a que las variaciones diarias son más pronunciadas que las anuales. Además, según Cole (1983), los lagos en las regiones tropical y polar tienen bajos contenidos calóricos porque los contrastes anuales de temperatura no son tan grandes como en zonas templadas. Estos bajos contenidos calóricos son más obvios aún en la zona ecuatorial, cerca a la cual está situada la laguna estudiada.

Gorham (1964) encontró asociación positiva entre el volumen del lago y el Contenido Calórico almacenado. En la laguna del Parque Norte esta relación se cumple perfectamente, ya que por su pequeño volumen no podría esperarse un contenido calórico alto.

Se observa en la Tab. II que la diferencia entre las medias diurna y nocturna del contenido calórico es muy pequeña, lo que significa que el sistema no almacena

Tabla II: Valores de la variación nictemeral del contenido calórico y sus respectivos estadísticos de tendencia central y dispersión en cuatro periodos del año de muestreo.

Estadístico	Unidad	Abril 30	Julio 19	Octubre 18	Diciembre 13
Media aritmética	kcal.cm ⁻²	3.148	3.035	2.883	2.923
CV	%	2.2	2.4	1.3	1.6
CCD	kcal.cm ⁻² .d ⁻¹	0.225	0.240	0.113	0.140
CCH	kcal.cm ⁻² .d ⁻¹	0.025	0.016	0.090	0.008
Media diurna	kcal.cm ⁻²	3.130	3.030	2.906	2.936
Media nocturna	kcal.cm ⁻²	3.164	3.041	2.861	2.910

CV = coeficiente de variación relativa de Pearson

CCD = carga calórica diaria

CCH = carga calórica horaria

calor en la noche, comportándose, al igual que otros cuerpos de agua, como un sistema altamente disipativo que repone el calor perdido a través de la incidencia de la radiación solar diaria. Se observa además que a pesar de que el sistema se desestratifica en la noche, principalmente en el período de sequía (Ramírez & Díaz, 1995), las diferencias en el contenido calórico diario entre los días del muestreo nictemeral, son muy pequeñas, aunque ligeramente menores en los dos últimos. Además, en la misma Tabla se observa que la variabilidad fue ligeramente menor en los periodos lluvioso (octubre de 1991) y de transición (diciembre de 1991), como es mostrado por los valores del coeficiente de variación. Esas pequeñas diferencias entre días de colecta muestran que en todas las épocas, el sistema pierde calor de una forma similar. Esta pérdida está ligada principalmente a la poca protección del sistema contra el viento y a la poca profundidad, como ya fue establecido anteriormente.

Los bajos valores de la ganancia calórica diaria en cada nictemeral (Tab. II) corroboran lo anterior, pues muestran que el balance energético ("input" y "output" de calor) es muy pronunciado y rápido. Esto significa que la variación diaria en la absorción de calor es muy pequeña, debido a que no se acumula en el cuerpo de agua (a pesar de la alta radiación solar tropical) ya que las pérdidas por irradiación y convección son mayores. Esto muestra que la laguna del Parque Norte es un sistema altamente disipador de energía por su pequeño tamaño y por el enfriamiento evaporativo en la superficie del agua, que contrarresta la alta toma de calor proveniente del ambiente. Además, Lewis (1984) considera que en cuerpos de agua endorreicos,

como supuestamente es el presente, la importancia de los términos advectivos en la carga calórica es de menor trascendencia, pudiéndose concluir que las propiedades térmicas y de mezcla están casi enteramente determinadas por las condiciones meteorológicas más las del sedimento.

La relación entre la temperatura del agua en la superficie y el contenido calórico, se observa en la Fig. 4A. En ella, se muestra una dependencia relativamente alta entre ambas variables, la cual no es mayor debido a los bajos valores del contenido calórico por las causas ya explicadas. Por eso, el valor del coeficiente de determinación indica que los cambios en la temperatura superficial explican sólo el 34.5% de la variación del contenido calórico, ya que existen otras condiciones (humedad relativa, velocidad del viento, etc.) que inciden en esta última variable.

Como se ha mencionado repetidas veces, el bajo contenido calórico de la laguna es debido básicamente a la influencia del viento, cuya acción se magnifica por las características morfométricas del cuerpo de agua estudiado. La regresión efectuada entre el trabajo del viento y el contenido calórico (Fig. 4B), presentó valores altamente significativos ($r = 0.85$, $p = 0.00001$), lo que realza la dependencia entre ambas variables estándar de energía. Por ello, el trabajo del viento explicó el 71.6% de la variación en el contenido calórico. El porcentaje de variación restante (28.4%) es explicado por los fenómenos convectivos del cuerpo de agua. El bajo valor encontrado para la eficiencia del calentamiento ($0.066 \text{ g-cm.cal}^{-1}$, Tab. III) enfatiza el papel del trabajo del viento en el contenido calórico de la laguna.

Según Coche (1974), los índices de tropicalidad entre $35\text{-}373 \text{ cal.cm}^2\text{.m}^{-1}$ constituyen el intervalo de variación para algunos lagos templados. Para algunos lagos tropicales (Tab. IV), los valores registrados oscilaron entre 1302.0 y $2710.0 \text{ cal.cm}^2\text{.m}^{-1}$. El valor encontrado para la laguna del Parque Norte ($1740.0 \text{ cal.cm}^2\text{.m}^{-1}$) se encaja un poco abajo del valor medio (porcentaje de desviación con respecto al valor medio = - 10.0%). Sin embargo, se inserta perfectamente en lo que Coche (1974) identifica como lago tropical, siendo 4.66 veces mayor que el mayor valor reportado por este autor para lagos templados ($373 \text{ cal.cm}^2\text{.m}^{-1}$). Puede decirse entonces que la "tropicalidad" de la laguna del Parque Norte se origina en el "stock" permanente de calor por metro de profundidad, que es casi igual al de otros lagos tropicales mucho mayores como el Kariba y el Victoria (ver valor del calor residual en la Fig. 3C). Se origina además en las temperaturas del agua relativamente altas a las que se presenta la mayor profundidad de mezcla, que sucede en el momento en que se presenta el menor valor del contenido calórico (24.5°C , septiembre 17). Estas temperaturas son mayores que las del Lago Kariba (20°C , Coche, 1974) y Victoria (23°C , Talling, 1966). El bajo valor del coeficiente de variación (17.3%) muestra la poca variación del índice de tropicalidad para los lagos considerados, aunque se encuentren situados en continentes diferentes, lo cual permite pensar que se trata de un índice confiable.

Tabla III: Valores de la eficiencia del calentamiento para algunos lagos tropicales.

Lago	Eficiencia Del Calentamiento
Dom Helvecio	$0.17 \text{ g-cm.cal}^{-1}$
Carloca	$0.07 \text{ g-cm.cal}^{-1}$
Valencia	$0.55 \text{ g-cm.cal}^{-1}$
Jurumirim	$0.22 \text{ g-cm.cal}^{-1}$
Laguna del Parque Norte	$0.066 \text{ g-cm.cal}^{-1}$

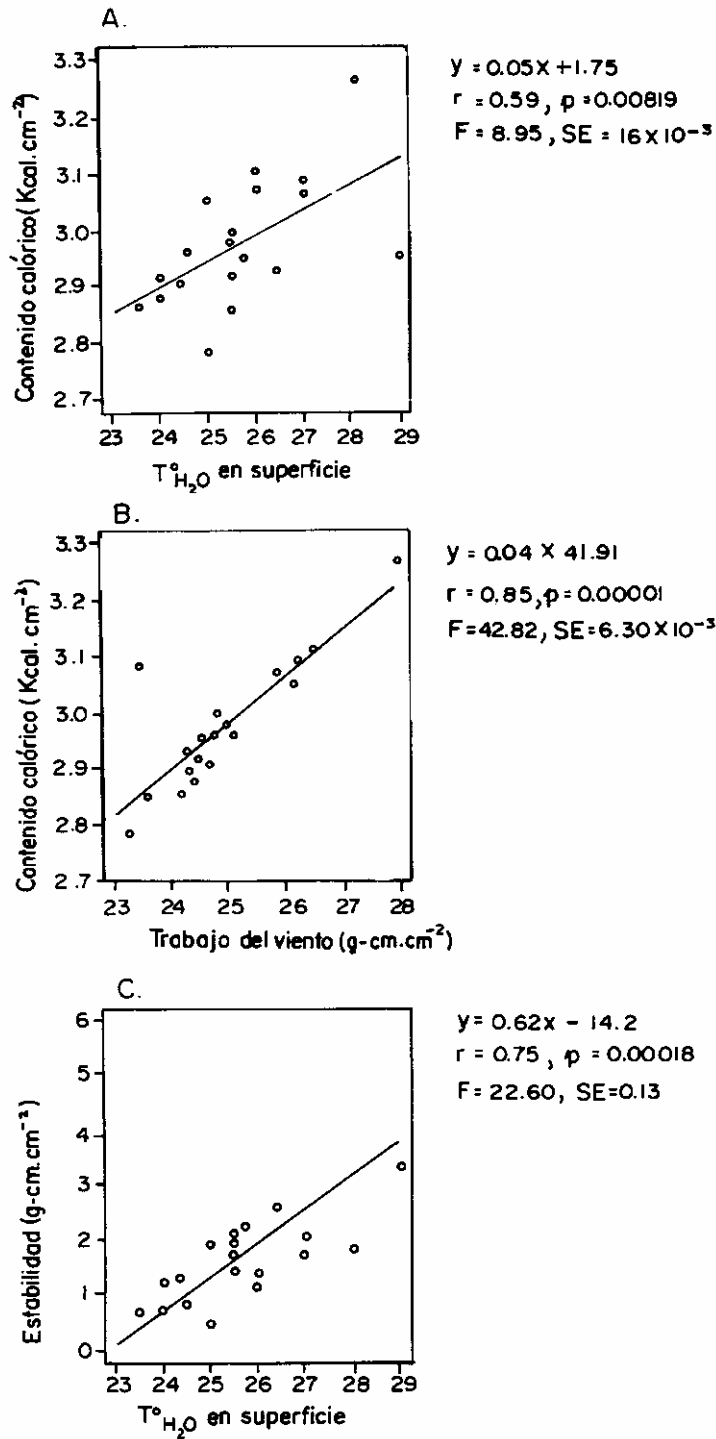


Figura 4: Resultados del análisis de regresión lineal simple para las variables (A) temperatura del agua en superficie-contenido calórico. (B) trabajo del viento-contenido calórico y (C) temperatura del agua en superficie-estabilidad térmica.

Tabla IV: Valores del índice de tropicalidad para algunos lagos tropicales.

Sistema Ecológico	Índice De Tropicalidad (Cal.Cm ² .M ⁻¹)
Embalse de Río Pardo	1302.0
Embalse de Lobo (Broa)	1767.0
Embalse Monte Alegre	1776.0
Lago Kariba	1735.5
Embalse Jurumirim	1978.0
Lago Dom Helvecio	2010.0
Laguna Carloca	2159.0
Lago Valencia	2710.0
Lago Lanao	2012.0
Lago Ranu-Kindungan	2100.0
Lago Victoria	1900.0
Laguna del Parque Norte	1740.0
Media aritmética	1932.5
Coefficiente de variación (%)	17.3

Estabilidad térmica

El valor medio mensual de esta variable estándar de energía fue bajo ($m = 1.1 \text{ g-cm.cm}^{-2}$) y su variación durante el periodo de medición considerado fue alta ($CV = 59.5\%$, Fig. 5) cuando comparada con la del contenido calórico ($CV = 3.8\%$, Fig. 3C). Este valor medio referido a otros lagos tropicales, también es muy bajo (Tab. V) y explicado posiblemente porque los cambios anuales en la estabilidad térmica siguen generalmente a aquellos del contenido calórico, variando con la extensión de la estratificación, aunque no necesariamente el valor máximo de estabilidad tiene que coincidir con el máximo valor del contenido calórico (Huichinson, 1957). Por ello, se observa que la estabilidad térmica mostró un patrón estacional similar al del contenido calórico en la Fig. 3C e influenciado por el comportamiento de la temperatura del agua (Fig. 3B) y el de la resistencia termal relativa a la mezcla (Fig. 6C). Además, como el contenido calórico fue pequeño ($m = 2.978 \text{ kcal.cm}^{-2}$), no podría esperarse otra cosa de los valores de estabilidad. Igualmente, la baja eficiencia de calentamiento que también presentó valores bajos ($0.066 \text{ g-cm.cal}^{-1}$, Tab. III), corroboran lo anterior.

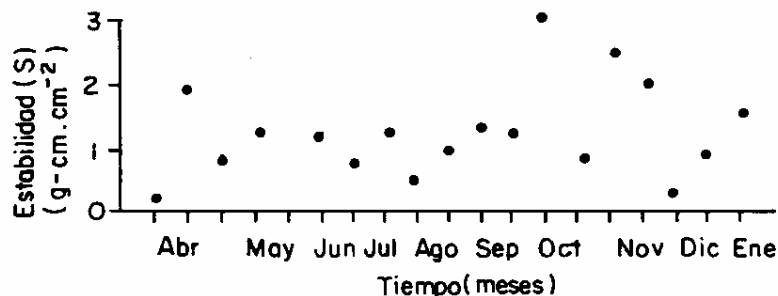


Figura 5: Variación temporal de la estabilidad térmica.

Tabla V: Valores de estabilidad para algunos lagos tropicales.

Sistema Ecológico	Estabilidad (g-cm.cm ⁻³)
Embalse de Río Pardo	1.06
Embalse de Lobo (Broa)	1.75
Embalse de Monte Alegre	1.82
Embalse de Jurumirim	1.23
Lago Dom Helvecio	1.32
Laguna Carioca	2.08
Lago Valencia	1.99
Lago Titicaca	1.62
Laguna del Parque Norte	0.03
Media aritmética	1.43
Coficiente de variación (%)	43.9

Como la estabilidad es directamente dependiente de la temperatura del agua, se espera entonces encontrar un patrón anual que refleje los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Esto fue corroborado por la regresión realizada entre ambas variables, la cual mostró ser altamente significativa ($r = 0.75$, $p = 0.00018$), con la temperatura del agua explicando el 57% de la variación en la estabilidad (Fig. 4C). La distribución relativamente uniforme de la temperatura en la columna de agua ocasionó igual hecho en la distribución de calor y, por tanto, los bajos valores de estabilidad. Como esto ocurrió el período entero de muestreo, la laguna del Parque Norte es un cuerpo de agua que se ajusta a la clasificación de Polimíctico Cálido Continuo (Lewis, 1983). Este patrón de mezcla es corroborado por el alto valor del coeficiente de variación encontrado para el índice de estabilidad en los cuatro muestreos nictemerales (Tab. VI). En la Fig. 5, se observa que la estabilidad térmica fue mayor al final del periodo de muestreo (octubre-noviembre), gracias al incremento en la resistencia termal relativa (Fig. 6C) que disminuyó el trabajo del viento (Fig. 6B), oponiéndose a su acción mezcladora. El resto del tiempo de muestreo, la estabilidad fue menor, aunque la resistencia termal relativa fue alta, debido a que el trabajo del viento fue ligeramente mayor y consiguió alcanzar valores suficientes para vencer la resistencia del agua a la mezcla.

Tabla VI: Valores de la variación nictemeral de la estabilidad y sus respectivos estadísticos de tendencia central y dispersión en cuatro periodos del año de muestreo.

Estadístico	Unidad	Abril 30	Julio 19	Octubre 18	Diciembre 13
Media aritmética	g-cm.cm ⁻³	1.00	1.20	0.32	0.42
CV	%	94.5	75.7	91.7	154.0
Media diurna	g-cm.cm ⁻³	1.53	2.02	0.64	1.20
Media nocturna	g-cm.cm ⁻³	0.46	0.71	0.12	0.004

Trabajo del viento

Aunque los procesos de mezcla en los lagos son complejos, la mayoría se origina en eventos meteorológicos que actúan en la superficie de los mismos. El trabajo del viento ofrece una cuantificación de la energía involucrada para conseguir la distribución del calor observada a través de la mezcla y puede ser usado para

cuantificar la exposición de un cuerpo de agua al viento. Bajos valores indican una débil acción, con distribución poco efectiva del calor en la columna de agua (Bowling, 1990). Según el mismo autor, en general, los cambios anuales en el trabajo del viento son mayores que aquellos en la estabilidad en los cuerpos de agua poco profundos, como el presente. Por eso, en la laguna del Parque Norte, al comparar los valores medios del trabajo del viento y los de estabilidad, se observó que esta última fue 23.3 veces menor que la primera. Esto significa que se requiere más trabajo para destruir la estratificación que para crearla. Por eso, del trabajo total (G), la estabilidad (S) representó valores que oscilaron entre 0.0 y 9.2% (Fig. 6A), mientras que el trabajo del viento mostró valores oscilantes entre 90.8 y 100%. Esto significa que aproximadamente 91% del trabajo total para mantener la isoterma hipotética fue usado para distribuir el calor a través de la columna de agua, mientras que sólo el 9.0% fue usado para mantener la poca estabilidad presente.

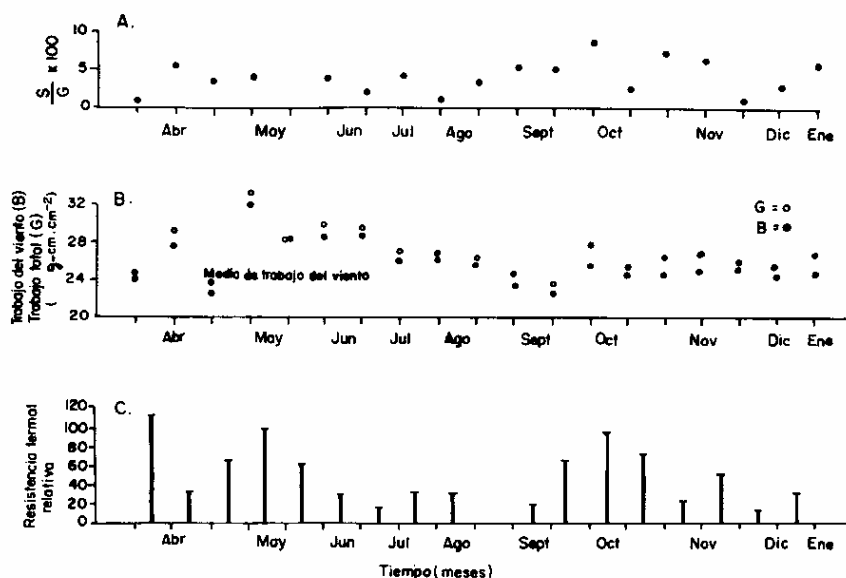


Figura 6: Variación temporal de la razón estabilidad térmica-trabajo total (A), los trabajos del viento y total (B) y la resistencia termal relativa (C).

Al igual que el contenido calórico, el trabajo del viento mostró un leve patrón estacional (Fig. 6B). El valor bajo del coeficiente de variación (8.8%) muestra que su efecto fue muy similar a lo largo del tiempo de muestreo, lo que pone en evidencia el bajo grado de protección del sistema contra el viento.

Observando los valores de la resistencia termal relativa a la mezcla en la Fig. 6C puede verse que fueron altos y que fueron además los responsables de los valores relativamente altos del trabajo del viento, ya que como se sabe la resistencia a la mezcla ejercida por el viento es mayor cuando las diferencias de temperatura son más acentuadas, como ocurre en la zona tropical. Podría entonces pensarse, ya que el trabajo del viento es 23.3 veces el valor de la estabilidad, que existe más trabajo del necesario para desestratificar la columna de agua de poca profundidad presente en la laguna.

En los cuerpos de agua poco profundos, debido a que la mayoría del calor es absorbido en las aguas epilimnéticas, una buena parte del mismo, es rápidamente devuelto a la atmósfera en la noche, más que mezclado a las capas más profundas y retenido, determinando así las cargas calóricas anuales. Las aguas más profundas tienen una limitada participación, sobre todo en lagos profundos. En estos lagos, estas aguas frías pueden constituir el 50% o más del volumen total. En los lagos rasos, como el estudiado aquí, la baja profundidad envuelta en el intercambio de calor, probablemente reduce la influencia dominante que los factores morfométricos, especialmente la profundidad, tienen en determinar los valores máximos, no únicamente del contenido calórico, sino también de la estabilidad térmica y el trabajo del viento (Bowling, 1990). Sin embargo, el bajo grado de protección contra el viento, conjuntamente con la poca profundidad actúan sinérgicamente para determinar los descensos en los valores de estas variables en la laguna.

Agradecimientos

El presente trabajo es parte de la investigación "Estudio limnológico de la laguna del Parque Norte" financiado por el Centro de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Exactas y naturales (CIEN) de la Universidad de Antioquia (project # IN 36CE).

Referências citadas

- Arcifa, M., Meschiatti, A.J. & Gomes, E.A.T. 1990. Thermal regime and stability of a tropical shallow reservoir: Lake Monte Alegre, Brazil. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 23:271-281.
- Barbanti, L. 1985. Some problems and new prospects on Physical Limnology: a review. *Mem. Isnt. Ital. Idrobiol.*, 43:1-32.
- Birge, E.A. 1916. The Work of the Wind in warming a lake. *Trans. Wis. Acad. Sci.*, 18: 341-391.
- Bowling, L.C. 1990. Heat contents, thermal stabilities and birgean wind work in dystrophic tasmanian lakes and reservoirs. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 41:429-441.
- Carmouze, J.P.; Aquize, E.; Arze, C. & Quintanilla, J. 1983. Le bilan énergétique du Lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. Trop.*, 16:135-144.
- Coche, A.G. 1974. Limnological study of a tropical reservoir. In: Balon, E.K. & Coche, A.G. (eds.). *Lake Kariba: a man made tropical ecosystem in Central Africa*. Dr. W. Junk, The Hague. 247p.
- Cole, G. 1983. A textbook of Limnology. Mosby, London. 401p.
- Gorham, E. 1964. Morphometric control of annual Heat Budgets in temperate lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 9:525-529.
- Håkanson, L. 1981a. A manual of lake morphometry. Springer-Verlag, Heidelberg. 78p.
- Håkanson, L. 1981b. On lake bottom dynamics: the energy-topography factor. *Can J. Earth Sci.*, 18: 899-909.
- Håkanson, L. 1982. Bottom dynamics in lakes. *Hydrobiologia*, 91:9-22.
- Henry, R. 1993. Thermal regime and stability of Jurumirim reservoir (Paranapanema River, São Paulo, Brazil). *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, 78:501-511.
- Henry, R., Tundisi, J.G., Calijuri, M.C. & Ibañez, M.S. 1987. A comparative study of thermal structure, heat content and stability during the summer in three lakes of the Rio Doce Valley Park (Minas Gerais, Brazil). In: Yatsuka, S. & Tundisi, J. G. (eds.) *Limnological studies in Rio Doce Valley lakes and Pantanal Wetland, Brazil* (2nd report). Water Research Institute, Nagoya University, p.15-20.

- Henry, R. & Barbosa, F.A.R. 1989. Thermal structure, heat content and stability of two lakes in the National Park of Rio Doce Valley (Minas Gerais, Brazil). *Hydrobiologia*, 171:189-199.
- Hutchinson, G.E. 1957. *A Treatise on Limnology. I. Geography, physics and chemistry.* Wiley, New York. 1015p.
- Idso, S. 1973. On the concept of lake stability. *Limnol. Oceanogr.*, 18:681-683.
- Kling, G.W. 1988. Comparative transparency, depth of mixing and stability in lakes of Cameroon, West Africa. *Limnol. Oceanogr.*, 33:27-40.
- Le Cren, E. & Lowe-McConnell, R. 1980. *The functioning of freshwater ecosystems.* Cambridge University Press, Cambridge. 588p.
- Lewis Jr., W.M. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40: 1779-1787.
- Lewis Jr., W.M. 1984. A five-year record of temperature, mixing and stability for a tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). *Arch. Hydrobiol.*, 99:340-346.
- Mackey, A.P. 1991. Aspects of the limnology of Yeppen Yeppen Lagoon, Central Queensland. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 42:309-325.
- Ramírez, J.J. 1987. Contribución al conocimiento de las condiciones limnológicas de la laguna del Parque Norte. *Actual. Biol.*, 16:12-30.
- Ramírez, J.J. & Díaz, A. 1994. Caracterización limnológica y estructura de la comunidad fitoplanctónica en la laguna del Parque Norte, Colombia. *Hoehnea*, 21:9-29.
- Ramírez, J.J. & Díaz, A. 1995. Cambios diurnos de temperatura y variables físicas y químicas en dos épocas del año en la laguna del Parque Norte, Colombia. *Acta Limnol. Bras.*, 7:23-34.
- Reynolds, C.S. 1994. The long, the short and the stalled: on the attributes of phytoplankton selected by physical mixing in lakes and rivers. *Hydrobiologia*, 289:9-21
- Sperling, E. 1994. Morphometric features of some lakes and reservoirs in the State of Minas Gerais. In: Pinto-Coelho, R.; Giani, A. & Sperling, E. (eds.) *Ecology and human impacts on lakes and reservoirs in Minas Gerais with special reference to future development and management strategies.* SEGRAC, Belo Horizonte, 193p.
- Stewart, K.M. 1973. Detailed time variations in mean temperature and heat contents of some Madison lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 18:218-226.
- Talling, J.F. 1966. The annual cycle of stratification and phytoplankton growth in Lake Victoria (East Africa). *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, 51:545-621.
- Vollenweider, R. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Mem. Isnt. Ital. Idrobiol.*, 33:53-83.
- Wetzel, R.G. 1981. *Limnology.* W. B. Saunders, Philadelphia. 743p.
- Wetzel, R. G. & Likens, G. E. 1991. *Limnological analyses.* Berlin, Springer Verlag. 391p.
- Wood, R. B.; Prosser, M. V. & Baxter, R. M. 1976. The seasonal pattern of thermal characteristics of four of the Bishotu crater lakes, Ethiopia. *Freshwat. Biol.*, 6: 519-530.