

Evaluación de la estratificación térmica y su relación con el oxígeno disuelto del agua en la ciénaga Cachimbero, municipio de Cimitarra, Santander

Evaluation of thermal stratification and its relation with the water quality in the wetland Cachimbero, municipality of Cimitarra, Santander, Colombia

*Carlos Augusto Benjumea Hoyos, Álvaro Wills Toro**

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA, Universidad de Antioquia. Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia.

(Recibido el 17 de noviembre de 2005. Aceptado el 12 de abril de 2007)

Resumen

La radiación solar y su disipación en forma de calor influyen directamente en la estratificación térmica de los cuerpos de agua. En la ciénaga de Cachimbero (Cimitarra, Santander), se estudiaron los balances térmicos y la ocurrencia del fenómeno de estratificación del cuerpo de agua y se evaluó la influencia que aquella ejerce sobre la distribución de oxígeno disuelto del agua en el sistema cenagoso. En el estudio se aplicó una metodología apropiada para identificar y caracterizar el fenómeno de estratificación térmica en ciénagas tropicales de aguas someras y oscuras. Para alcanzar estos objetivos se realizaron ocho (8) campañas de muestreo en las cuales se midieron: perfiles de temperatura del agua, temperatura ambiente, radiación solar con base en información climatológica, variables de calidad de agua (oxígeno disuelto, pH, potencial redox, conductividad, etc.). El pH, el potencial redox y la conductividad presentaron poca variabilidad frente a los procesos que controlan la evolución térmica del sistema. Desde diciembre de 2002 se inició la caracterización de las condiciones del sistema y las observaciones se desarrollaron hasta noviembre de 2004.

----- *Palabras clave:* estratificación térmica, ciénaga, calidad del agua.

* Autor de correspondencia: teléfonos: +57 +4 + 210 65 63, fax: +57 +4 + 210 65 64, correo electrónico: awill@udea.edu.co (A. Wills).

Abstract

Solar radiation and its heat dissipation influence directly the thermal stratification of water bodies. In the wetland Cachimbero (Cimitarra, Colombia), the heat budget and existence of thermal stratification within the water body was studied; besides the influence exerted by this stratification on dissolved oxygen in water wetland was related. As a specific objective, an appropriate methodology to identify and to study of thermal stratification in dark water wetlands was applied. In order to attain this objective, eight sampling campaigns were carried out between December 2002 and November 2004 measuring water temperature profiles, room temperature, solar radiation based on meteorological information, water quality variables (dissolved oxygen, pH, redox potential, electrical conductivity, etc.). The water body can be classified like shallow, warm and polymictic lake. It displays recurrent deficit of dissolved oxygen in epilimnion and general anoxia in hypolimnion, and evolution temporary of the profiles follows the pattern general of the thermal profiles.

----- *Key words:* Thermal stratification, Wetland, Water Quality.

Introducción

La evaluación y protección ambiental del recurso agua es de vital importancia para el mantenimiento y conservación de las ciénagas, lagunas, cuencas y demás cuerpos de agua. Desde el punto de vista ecológico, tiene gran interés el conocimiento del origen de los ambientes lénticos (lagos, ciénagas, lagunas), pues esto determina la forma y persistencia de las cubetas y explica la duración de estos sistemas, cuya permanencia es transitoria. Por su naturaleza misma, las ciénagas son ecosistemas altamente dinámicos, sujetos a una amplia gama de factores naturales que determinan su modificación en el tiempo, aun en ausencia de factores de perturbación. Aunque se reconoce su valor para la protección de la pesca y fauna silvestre en general, otros beneficios no se habían identificado sino hasta hace poco tiempo.

Un factor primordial que influye en las características físicas y químicas, además de ser elemento importante en la regulación de los distintos procesos biológicos de cuerpos de agua, es la estructura térmica. Esta está determinada por los intercambios de energía térmica y mecánica que tienen lugar entre la ciénaga y el ambiente, siendo la radiación solar y el viento las principales fuentes de energía. La magnitud de los intercambios depende de la ubicación (latitud), las características morfométricas, y las temperaturas máxima y mínima del cuerpo de agua a estudiar [1]. Los estudios experimentales pioneros de la estructura térmica en lagos tropicales fueron reportados por Lewis desde el año 1973 [2, 3] quien además ha propuesto varios esquemas de clasificación en función de la evolución térmica estacional y diurna [4, 5]. Talling [6] y Padisak y Reynolds [7], por otra parte, han intentado una tipificación de los condicionantes físicos que gobiernan los lagos tropicales someros. La laguna de Cachimbero se puede clasificar como lago tropical somero de aguas oscuras y polimíctico, con estratificación frecuente y deficitario en oxígeno.

En la ciénaga de Cachimbero no se dispone de registro histórico de información primaria que

permita establecer la evolución de las variables físicas del cuerpo de agua. El estudio de su estructura térmica es un punto de partida para comprender algunos de los procesos físicos, químicos o biológicos que allí ocurren, otorgándole mayor importancia a algunos parámetros de calidad del agua y a su hidrodinámica. Para esto se formuló como hipótesis de investigación la siguiente: "Si se presenta la estratificación térmica en el agua de la ciénaga Cachimbero, entonces este fenómeno influirá sobre la concentración del oxígeno disuelto en el sistema cenagoso". Se pretende establecer, así, una aproximación al patrón de variación de las variables estudiadas y su interacción, como elemento en la caracterización del habitat físico.

Zona de estudio

Las ciénagas en Colombia son sistemas poco profundos que usualmente no sobrepasan los 5 m de profundidad. Se localizan sobre terrenos de baja altitud (0 a 1.000 msnm) por lo que su temperatura es propia de climas cálidos [8]. La ciénaga de Cachimbero hace parte del complejo cenagoso del Magdalena medio y está ubicada en las latitudes 6° 24' N - 74° 48' W y a una altitud de 150 msnm. La ciénaga es parte de la jurisdicción del municipio de Cimitarra, Santander, en la región conocida como el Carare, valle medio del río Magdalena. Se localiza cerca a la troncal del Magdalena, 70 km al norte de Puerto Boyacá y a 40 km al sur de Puerto Berrío (Antioquia).

La ciénaga de Cachimbero cubre un área de 15,21 km² y está alimentada por una microcuenca de aproximadamente 141,16 km² de la cual hacen parte las quebradas La Carolina, Mulería y otros caños menores. Presenta una profundidad media de 2,74 m. Sus aguas vierten al río Magdalena por el caño Cachimbero, con una longitud aproximada de 5 km. El área de estudio está ubicada en la zona de vida bosque húmedo tropical, con una temperatura promedio anual de 28 °C y un régimen de precipitación bimodal, con dos periodos de lluvia abril-mayo y agosto-noviembre separados por un periodo de verano fuerte en los meses de diciembre-febrero y un veranillo en los meses de junio-julio [9].

Materiales y métodos

Se establecieron 4 estaciones de muestreo (E1, E2, E3, E4) distribuidas en los diferentes sectores de acuerdo con el eje longitudinal sureste-noroeste (SE-NW) de la ciénaga de Cachimbero; el ciclo de muestreos se realizó entre marzo de 2003 y noviembre de 2004 con un espaciamiento temporal promedio entre muestreos de 2,5 meses para un total de 8 muestreos.

La estación 1 (E1) se encuentra ubicada cerca de la entrada de los caños afluentes (Abeja, Mullerías, Gorgona) que surten de agua la ciénaga. Las estaciones 2 y 3 (E2 y E3) se encuentran distribuidas uniformemente sobre el eje central de la ciénaga en la zona pelágica. La estación 4 (E4) está localizada en la zona efluente de la ciénaga cerca al caño Cachimbero.

En E2 se realizaron seguimientos nictimerales (24 horas) de las variables de interés en la columna de agua (temperatura y oxígeno), con un lapso de 3 horas entre cada toma de datos. Para las estaciones restantes (E1, E3 y E4) se efectuaron mediciones puntuales en diferentes horas del día. Para efectos de análisis, en este artículo se considerarán los resultados obtenidos en dos épocas muestrales contrastantes (época de lluvia y sequía) en la estación número dos (E2), sitio en el cual se realizaron los seguimientos nictimerales en la columna de agua.

La temperatura (T°), el oxígeno disuelto (OD) y el porcentaje de saturación se registraron cada 0,2 m hasta la máxima profundidad mediante una celda WTW equipada con termistor. Este procedimiento se ejecutó desde una embarcación anclada. Los atributos de precisión de los equipos son:

- Porcentaje de saturación: $\pm 0,5\%$ del valor medido.
- Oxígeno disuelto (OD): $\pm 0,5\%$ del valor medido. ± 1 dígito con la temperatura ambiente entre 5 y 30 $^{\circ}\text{C}$.
- Temperatura: 0,1 K. ± 1 dígito.

El cálculo de almacenamiento de calor, acumulación de calor, el flujo total de calor y la resis-

tencia a la mezcla, se basó en la metodología planteada por Wetzel y Likens que se presenta a continuación [10].

Balances de calor

La ecuación general que se aplica al balance de calor para un cuerpo de agua en un intervalo de tiempo dado es:

$$\theta_R + \theta_E + \theta_L + \theta_V + \theta_S + \theta_B = 0$$

Donde θ_R = radiación neta, θ_E = intercambio de calor latente, θ_L = intercambio sensible de calor con la atmósfera, θ_V = intercambio neto advectivo, θ_S = cambio en el almacenamiento de calor y θ_B = intercambio conductivo de calor a través de los sedimentos del fondo.

La energía que entra se considera positiva, mientras que la energía perdida es negativa.

Radiación neta

La radiación neta se puede medir directamente por medio de un radiómetro sobre la superficie del lago. Alternativamente la radiación neta se puede estimar por medio de la ecuación:

$$\theta_R = (\theta_s - \theta_r) + \theta_{in}$$

Donde θ_s = ingreso total de radiación de onda corta ($\sim 0,3$ a $2,2 \mu\text{m}$) estimada a partir de variables meteorológica y geográficas, θ_r = radiación reflejada por la superficie del lago (albedo) y θ_{in} = radiación neta de onda larga ($\sim 6,8$ a $100 \mu\text{m}$).

Transferencia de calor sensible

El término de transferencia de calor sensible θ_L hace referencia a la conducción y convección de calor de la superficie del lago al aire o viceversa. La transferencia neta puede ser estimada por medidas de gradiente de temperatura en el agua y computándolas con el flujo de calor.

Advección

El flujo subsuperficial, flujo de corrientes y la lluvia son la principal fuente de advección. La

pérdida de calor por advección está asociada al transporte horizontal en el cuerpo de agua. Para propósitos de cálculo se puede asumir que 1 cm³ de agua tiene una masa de 1 g, y el calor específico del agua es de 1 cal/(g°C), por lo tanto el calor ganado o perdido en calorías se calcula multiplicando el volumen de agua intercambiado en cm³ por la temperatura del agua en °C.

Almacenamiento

Siguiendo a Wetzel y Likens [10], se asume operacionalmente que el calor total contenido en un lago consiste en el contenido calórico del agua a la temperatura actual menos la cantidad de calor necesaria para calentar el hielo o la nieve y luego fundirlos. Cualquier cambio en la temperatura constituye un cambio en el término de almacenamiento de calor. El calor total contenido (almacenamiento) en el agua se puede entonces determinar por:

$$\theta_w = \sum_{z_0}^{z_m} t_z A_z h_z$$

Donde θ_w = calor contenido en el agua del lago en calorías, z_0 = superficie del lago, z_m = máxima profundidad del lago, t_z = promedio de temperatura en °C de una capa unitaria de agua con espesor h_z (cm), con punto medio a la profundidad z , y A_z = área a la profundidad z en cm². El calor contenido usualmente se expresa sobre una unidad de área base, θ_w/A_0 , en cal/cm². A_0 = área superficial en cm². Operativamente es conveniente usar un área constante de 1 cm² en los cálculos de contenido de calor del agua. El espesor o profundidad en cm [profundidad (cm) * área (cm²) = volumen cm³] se multiplica directamente por la temperatura en °C para obtener el contenido de calor [10].

Balance simple de calor

Un balance de calor puede desarrollarse para un volumen de agua estable, finito y en un periodo de tiempo dado: acumulación = entradas – salidas ± intercambio de calor superficial.

En este balance, las entradas y salidas representan el flujo advectivo de calor. Esta fuente (aficiente)

representa la entrada de calor a través de las corrientes tributarias o bien a los puntos de descarga. Finalmente, el intercambio de calor en la superficie representa el calor ganado a través de la interfaz aire-agua debido a interacciones con la atmósfera. Otra fuente que se puede incluir en el balance de calor es el intercambio de energía con los sedimentos; sin embargo este intercambio no es significativo para la mayoría de los cuerpos de agua naturales.

Acumulación

La acumulación representa el cambio de calor H en el sistema a través del tiempo t (5):

$$Acumulación = \frac{\Delta(\rho C_p VT)}{\Delta t}$$

Donde: ρ = densidad del agua (kg/m³), C_p = calor específico del agua (J/kg °C), V = volumen de referencia (m³), T = temperatura (°C), t = tiempo (h).

Para facilitar los cálculos se asume que la densidad y el calor específico del agua son relativamente constantes para el rango de temperaturas del lago. También se asume que el volumen del lago es constante. Estas suposiciones permiten sacar dichos parámetros del diferencial. Finalmente, cuando el Δt se hace muy pequeño la ecuación anterior se reduce a:

$$Acumulación = \rho C_p V \frac{dT}{dt}$$

Con esto el calor se acumula a medida que la temperatura se incrementa con el tiempo (dT/dt positivo) y disminuye cuando esta decrece con el tiempo (dT/dt negativo). Para un caso de estado estable, el calor permanece constante ($dT/dt = 0$). Las unidades de la ecuación de acumulación son [11]:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = \frac{kg}{m^3} \left(\frac{J}{kg^\circ C} \right) (m^3) \left(\frac{^\circ C}{h} \right) = \frac{J}{h}$$

Distribución de radiación solar

Radiación de onda corta

El sol es la más importante fuente de radiación sobre la tierra; sin embargo, sólo se recibe una

fracción equivalente a 2×10^{-5} de la radiación solar total emitida por unidad de área. La intensidad solar en la superficie de la atmósfera perpendicular a la radiación incidente es igual a $1,94 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$. Este número se denomina constante solar y comúnmente se aproxima a $2,0 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ [12].

Usando la geometría planetaria [12, 13] fue posible deducir la siguiente expresión para la altitud solar:

$$\text{sen}\alpha = \text{sen}\delta\text{sen}\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\tau$$

Donde δ es la declinación solar, ϕ es la latitud local y τ es el ángulo de hora solar.

$$\delta = \frac{23,45 \pi}{180} \cos\left(\frac{2\pi}{180} (172 - D)\right)$$

Donde D es el día juliano ($1 \leq D \leq 365$ ó 366) y δ está en radianes. El ángulo de hora local, $0 \leq \tau \leq 360$ está dado por:

- $\tau = (T_s + 12 - \Delta T_1 + \Delta T_2) \times 15$; cuando el sol está en la longitud Este del observador.
- $\tau = (T_s - 12 - \Delta T_1 + \Delta T_2) \times 15$; cuando el sol está en la longitud Oeste del observador.

En las ecuaciones anteriores, T_s es el tiempo estándar en horas en la zona de tiempo del observador contado desde medianoche (0,00-23,59). ΔT_1 es la diferencia de tiempo en horas entre la longitud estándar y la local:

$\Delta T_1 = \frac{i}{15} (\theta_s - \theta_L)$; donde $i = -1$ para la longitud oeste o $i = 1$ para la longitud este, relativos al meridiano de Greenwich. θ_s es la longitud del meridiano estándar y θ_L es la longitud del meridiano del observador.

La radiación por unidad de área por unidad de tiempo (intensidad) está dada por la siguiente ecuación:

$$I_o = \frac{W_o}{r^2} \text{sen}\alpha$$

Donde I_o es la radiación efectiva, W_o es la constante solar y r , es la proporción entre la distancia actual tierra/sol y la distancia media tierra/sol:

$$r = 1,0 + 0,017 \cos\left[\frac{2\pi}{365} (186 - D)\right]$$

Radiación de onda larga

La radiación emitida desde la superficie del agua puede ser representada por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$J_{br} = \epsilon\sigma (T_s + 273)^4$$

Donde ϵ = emisividad del agua (aproximadamente 0,97), σ = constante de Stefan – Boltzmann ($4,9 \times 10^{-3} \text{ J (m}^2 \text{ d K}^4)^{-1}$), T_s = temperatura de superficie del agua.

La emisividad es un factor de corrección que da cuenta del hecho de que el agua no es un emisor perfecto de la radiación.

Conducción y convección

Conducción es la transferencia de calor de una molécula a otra cuando la materia de diferente temperatura entra en contacto. Convección es el calor transferido que ocurre debido al movimiento de la masa del fluido. Ambos pueden ocurrir en la interfaz aire – agua y pueden ser descritos por:

$$J_c = c_1 f(U_w)(T_s - T_{aire})$$

Donde c_1 = coeficiente de Bowen's ($\approx 0,47 \text{ mm Hg } ^\circ\text{C}^{-1}$) T_s = temperatura de superficie del agua, T_{aire} = temperatura ambiente. El término $f(U_w)$ define la dependencia de la transferencia de la velocidad del viento sobre la superficie del agua, donde U_w es la velocidad del viento medida a una distancia fija sobre la superficie del agua.

$$f(U_w) = 19 + 0,95U_w^2$$

Donde la velocidad del viento es medida en m s^{-1} a una altura de 2 m por encima de la superficie del agua.

Evaporación y condensación

El calor perdido debido a la evaporación puede ser representado por la ley de Dalton.

$$J_e = f(U_w)(e_s - e_{aire})$$

Donde e_s = presión de saturación de vapor en la superficie del agua, e_{aire} = presión de vapor del aire y se calculan de la siguiente manera:

$$e_s = 4,596e^{\left(\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}\right)}$$

$$e_{\text{aire}} = \frac{Rh \times e_s}{100}$$

Donde T = temperatura ambiente o de la superficie del agua (°C), según el caso, Rh = humedad relativa.

Radiación atmosférica de onda larga

La atmósfera por sí misma emite radiación de onda larga. Este aumento se puede representar como una modificación de la ley de Stefan-Boltzman,

$$J_{an} = \sigma (T_{\text{aire}} + 273)^4 (A + 0,031\sqrt{e_{\text{aire}}})(1 - R_L)$$

Donde: σ = constante de Stefan-Boltzmann ($4,9 \times 10^{-3} \text{ J (m}^2 \text{ d K}^4\text{)}^{-1}$), T_{aire} = temperatura ambiente, A = coeficiente (0,5 a 0,7), e_{aire} = presión de vapor de aire (mm Hg), R_L = coeficiente de reflexión. El coeficiente de reflexión es generalmente pequeño ($\approx 0,03$) [5].

Resistencia térmica a la mezcla

Este concepto, desarrollado por Birge en 1910 y 1916, es una función de la diferencia de densidad entre la parte superior y el fondo de una capa definida de agua. Birge definió la “resistencia térmica” como la cantidad de trabajo requerida para mezclar completamente una columna de agua:

$$W = \frac{AC^2}{12} (\rho_2 - \rho_1)$$

Donde W = trabajo en ergios, A = área, C = altura de la columna de agua, ρ_1 = densidad superior de la columna de agua, ρ_2 = densidad inferior de la columna de agua. Fue conveniente asumir A constante para realizar los cálculos ($A = 1 \text{ cm}^2$) [10].

Resultados y discusión

De los resultados generales se puede deducir un patrón de variación diurno-nocturno que se ajusta

sensiblemente al patrón observado por Talling [6] en lagos someros tropicales del África, aun cuando se presenten algunas distorsiones dadas por los procesos advectivos. A continuación se presentan los resultados de las campañas de muestreo 5 y 6 en la estación número 2 (E2), los cuales representan el comportamiento térmico característico del sistema cenagoso para las épocas lluviosa y seca, respectivamente.

Campaña de muestreo número 5: (19-20 de abril de 2004).

Perfil de temperatura, figura 1.

Los perfiles de temperatura presentados en la figura 1 corresponden al mes de abril, en el cual se presenta el primer periodo lluvioso del régimen bimodal característico de la zona. Todos los perfiles a excepción del de las 20:30 horas presentan una uniformidad o mezcla en los primeros 80 cm de profundidad, para luego tener un descenso marcado de temperatura y estabilizarse aproximadamente en los 1,8 m de profundidad.

En todos los perfiles las zonas características de estratificación (epilimnio, metalimnio e hipolimnio) se pueden diferenciar con claridad. Los gradientes de temperatura varían en la columna de agua según la hora de la medición. Se puede además observar que en este periodo lluvioso no se presenta mezcla completa en ninguna etapa de la jornada nictimeral. El mayor gradiente de temperatura para la columna de agua se presentó durante las 20:30 horas con un valor de 2,29 °C/m, siendo este perfil el más irregular.

La figura 2 muestra el comportamiento del almacenamiento de calor durante los días 19 y 20 de abril de 2004. Podemos apreciar un máximo durante las 2:35 horas con un valor de 27.037,4 J/cm², valor que parecería anormal durante esta hora pero que se puede explicar por el continuo movimiento de corrientes cálidas en la columna de agua. Luego de este máximo se presenta el mínimo a las 5:30 horas con un valor de 26.489,0 J/cm² para después incrementarse gradualmente con el accionar del sol. Finalmente al caer la tarde se produce nuevamente el descenso esperado en el almacenamiento.

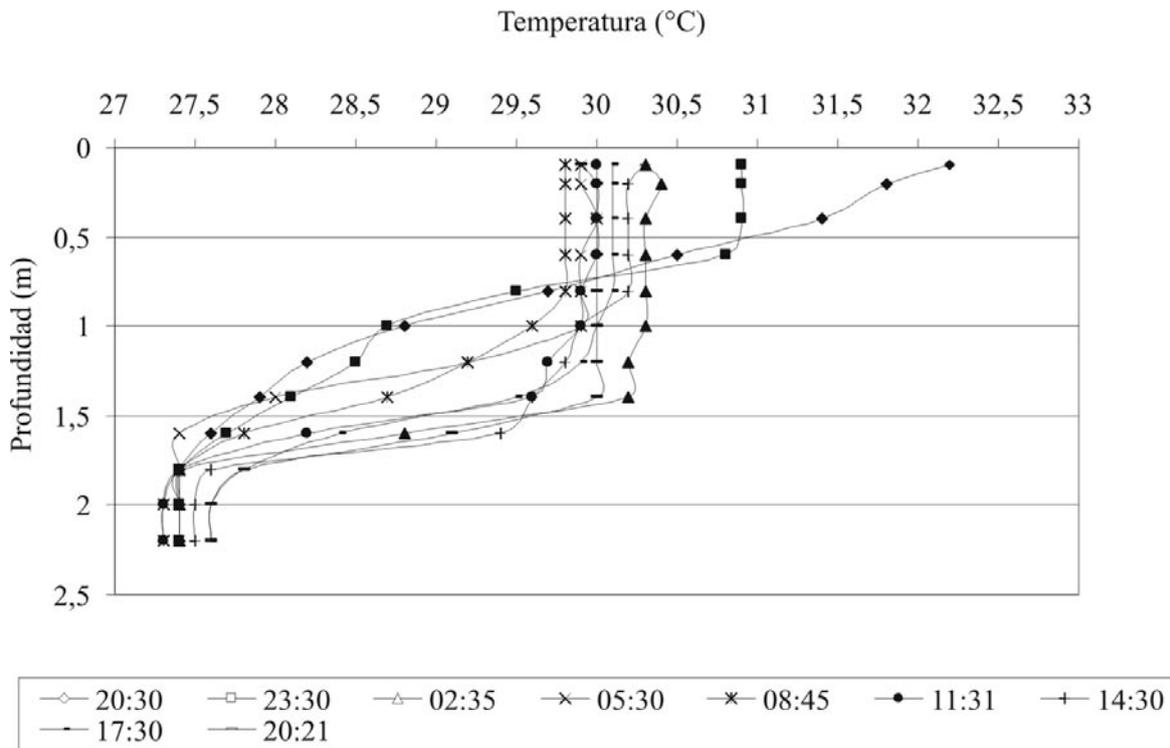


Figura 1 Perfil de temperatura. 19-20 de abril de 2004

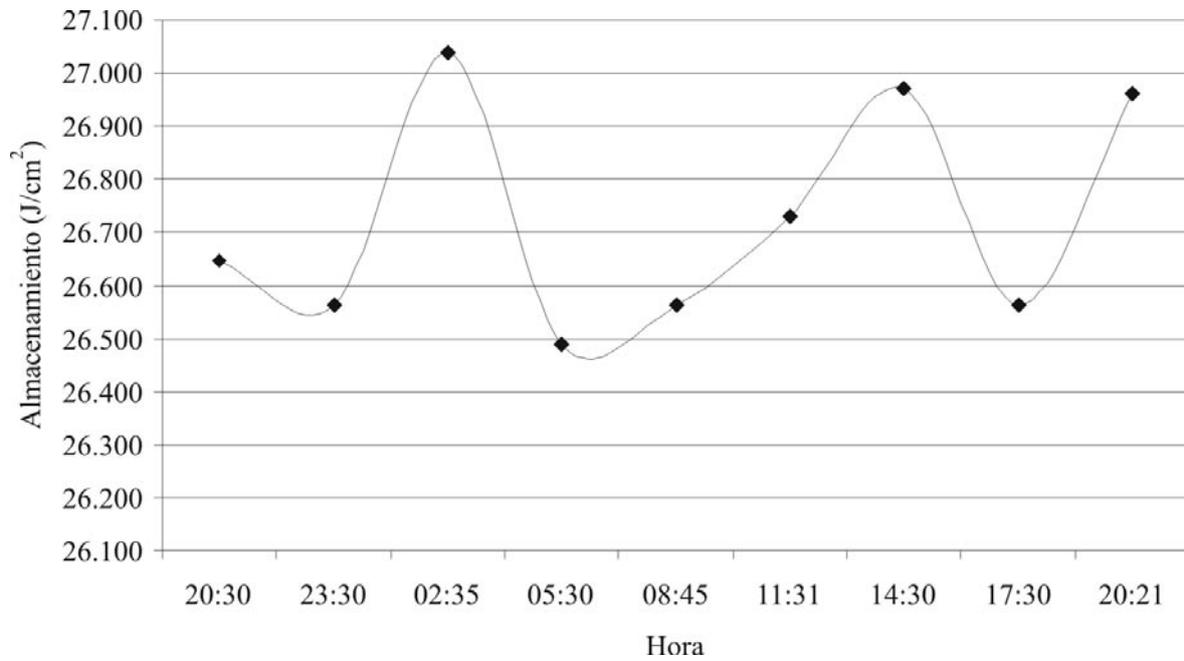


Figura 2 Almacenamiento de calor. 19-20 de abril de 2004

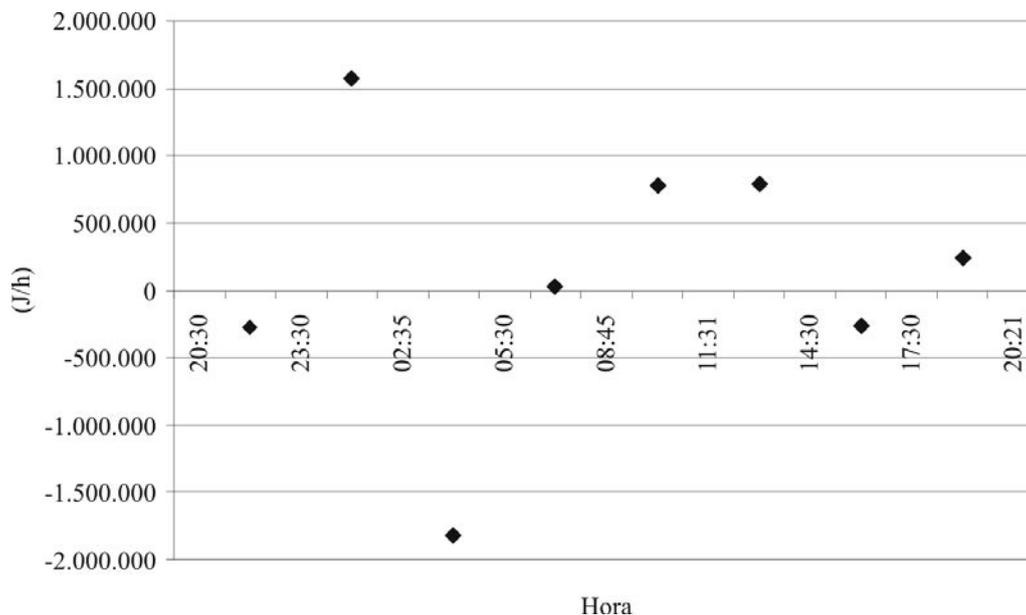


Figura 3 Acumulación de calor. 19-20 de abril de 2004

Las temperaturas medias de la columna de agua oscilaron entre 28,76 y 29,36 °C, presentándose esta última durante las 2:35 horas.

El comportamiento observado en la figura 3 (acumulación de calor), se asemeja al presentado en la figura 2 (almacenamiento de calor). Con un máximo entre las 23:30 y las 2:35 horas, un mínimo entre las 2:35 y las 5:30 horas y valores de 1.572.384,604 y -1.822.852,948 Joules respectivamente. Estos valores son el resultado de los gradientes de temperatura que se presentan entre las distintas horas de muestreo.

El mayor gradiente (0,17121 °C/h) coincide con la máxima acumulación y el menor gradiente (-0,19848 °C/h) con la mínima acumulación.

Los valores calculados para los flujos totales de calor presentan un comportamiento uniforme para la hora del día en que fueron calculados (tabla 1). Es decir ganancia de calor durante las horas de actividad solar y pérdida durante la noche o madrugada, con una máxima ganancia de 9.841.899,87 Joules entre las 11:31 y las 14:30 horas y pérdida máxima de -1.315.734,01 Joules entre las 20:30 y las 23:30 horas.

La resistencia a la mezcla durante esta época del año (invierno) es muy baja debido a la uniformidad que presenta la temperatura media en la columna de agua y por ende su densidad (figura 4). Se tiene un valor máximo del trabajo del viento de 5,874 ergios durante las 20:30 horas y un mínimo de 2,674 ergios durante las 20:21 horas. Estas cifras indican que durante la época de invierno la estabilidad de la columna de agua se reduce considerablemente con respecto al verano en la ciénaga de Cachimbero debido a la diferencia de densidades entre la superficie y el fondo para cada uno de los períodos del año.

Las concentraciones de oxígeno disuelto en la columna de agua presentadas en la figura 5 exhiben valores muy bajos. La máxima concentración de oxígeno a 0,1 m de la superficie se presentó a las 20:30 horas (4,61 mg/l), situación explicable únicamente por la acción del viento, puesto que en las horas de la noche la producción de oxígeno por parte de las algas es nula, mientras el consumo de este gas sí es alto debido a la respiración de las plantas. Como podemos apreciar en el gráfico durante las horas de actividad solar y luz los perfiles de oxígeno muestran mínimas concentraciones, siendo

Tabla 1 Flujo total de calor por periodo de tiempo. 19-20 de abril de 2004

Hora	Rad. Agua. OL.	Conv.-Cond.	Evap. Conden.	Rad. Atm. OL	Rad. Solar OC	Flujo total de calor	Flujo total de calor
(h)	$J_{br} = (J/m^2 \cdot d)$	$J_c = (J/m^2 \cdot d)$	$J_e = (J/m^2 \cdot d)$	$J_{an} = (J/m^2 \cdot d)$	$J_{sn} = (J/m^2 \cdot d)$	$J = (J/m^2 \cdot d)$	$J = (J/m^2 \cdot \text{periodo})$
20:30	40.889.716,49	19,65	148,37	30.364.012,41	1.214.603,84	-9.311.268,26	-1.163.908,53
23:30	40.381.033,27	22,01	134,73	29.889.388,81		-10.491.801,21	-1.311.475,15
2:35	40.115.544,77	22,77	127,59	29.646.031,26		-10.469.663,87	-1.308.707,98
5:30	39.983.259,66	13,69	100,40	29.882.864,76	33.271.196,56	23.170.687,58	2.896.335,95
8:45	40.009.690,48	3,83	201,52	29.989.207,91	67.528.093,62	57.507.405,69	7.188.425,71
11:31	40.141.975,59	-8,14	252,69	30.332.339,00	106.988.989,36	97.179.108,21	12.147.388,53
14:30	40.168.432,60	-3,10	206,74	30.053.689,33	85.295.656,50	75.180.709,58	9.397.588,70
17:30	40.062.552,14	5,95	153,68	29.860.156,56	29.847.099,27		2.455.568,01
20:21							

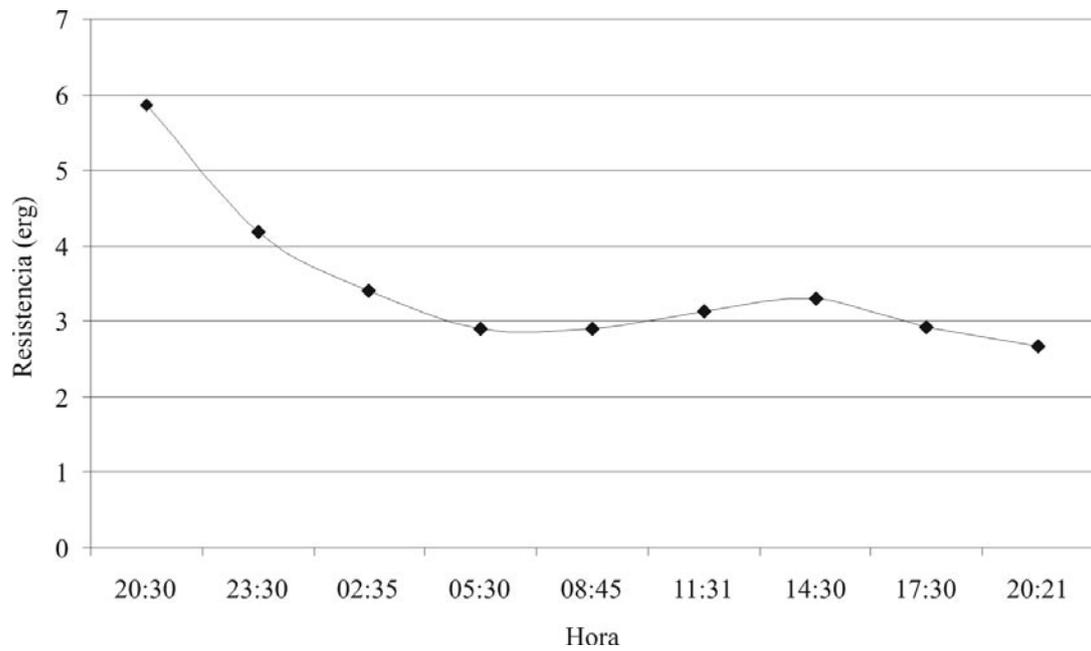


Figura 4 Variación horaria de la resistencia a la mezcla. 19-20 de abril de 2004

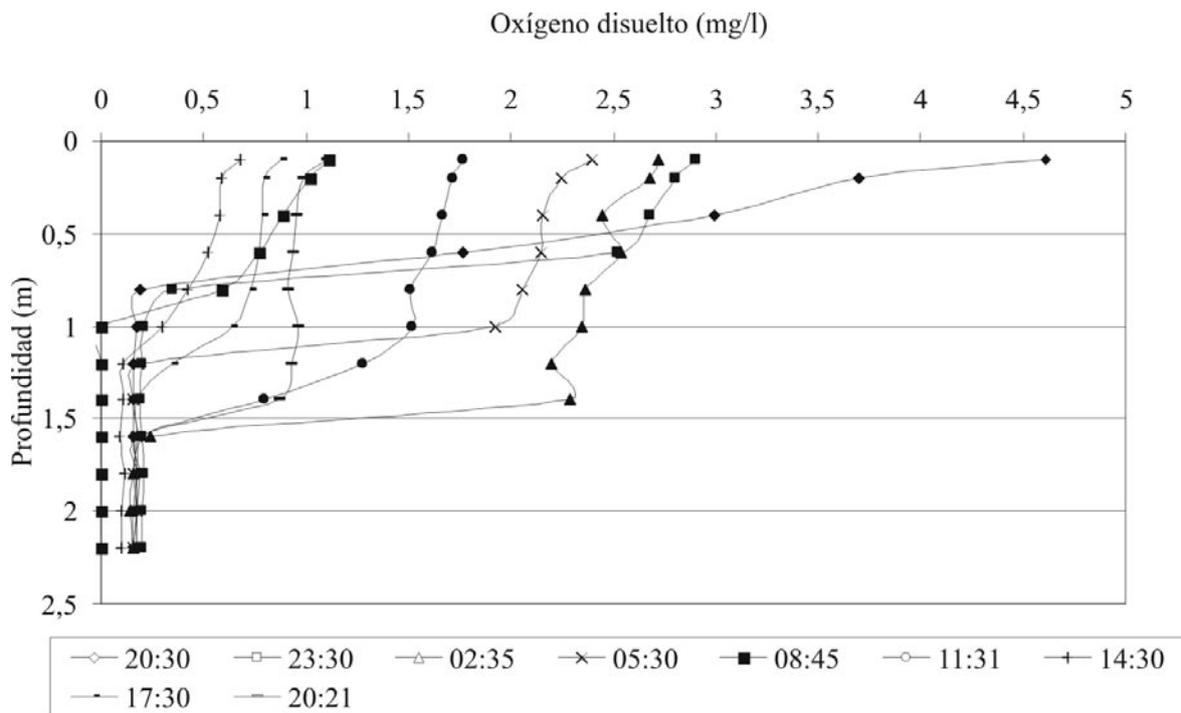


Figura 5 Perfil de Oxígeno. 19-20 de abril de 2004

las 14:30 horas la más crítica con una concentración de 0,68 mg/l a 0,1 m de la superficie.

Todos los perfiles presentaron concentraciones por debajo de 1 mg/l después de los 1,2 m de profundidad, hecho que podría ser letal para la fauna piscícola de la ciénaga.

Campaña de muestreo número 6: (12-13 de junio de 2004).

En la figura 6 podemos apreciar el comportamiento de los perfiles de temperatura para una época seca. Esta temporada corresponde a las fechas 12 a 13 de junio de 2004.

Los perfiles de temperatura muestran una estratificación persistente durante las horas de muestreo (24 horas). La temperatura superficial (0,1 m) oscila entre 28,5 y 34,2 °C para la hora más fría y más caliente del monitoreo, respectivamente; y la temperatura de fondo siempre se mantuvo entre 26 y 26,5 °C para las nueve repeticiones durante el nictimeral.

Estos perfiles evidencian lo que podríamos llamar una “clara” termoclina ubicada, en promedio, a un metro de profundidad. También vemos cómo este comportamiento es constante durante las nueve repeticiones que se hacen en el muestreo.

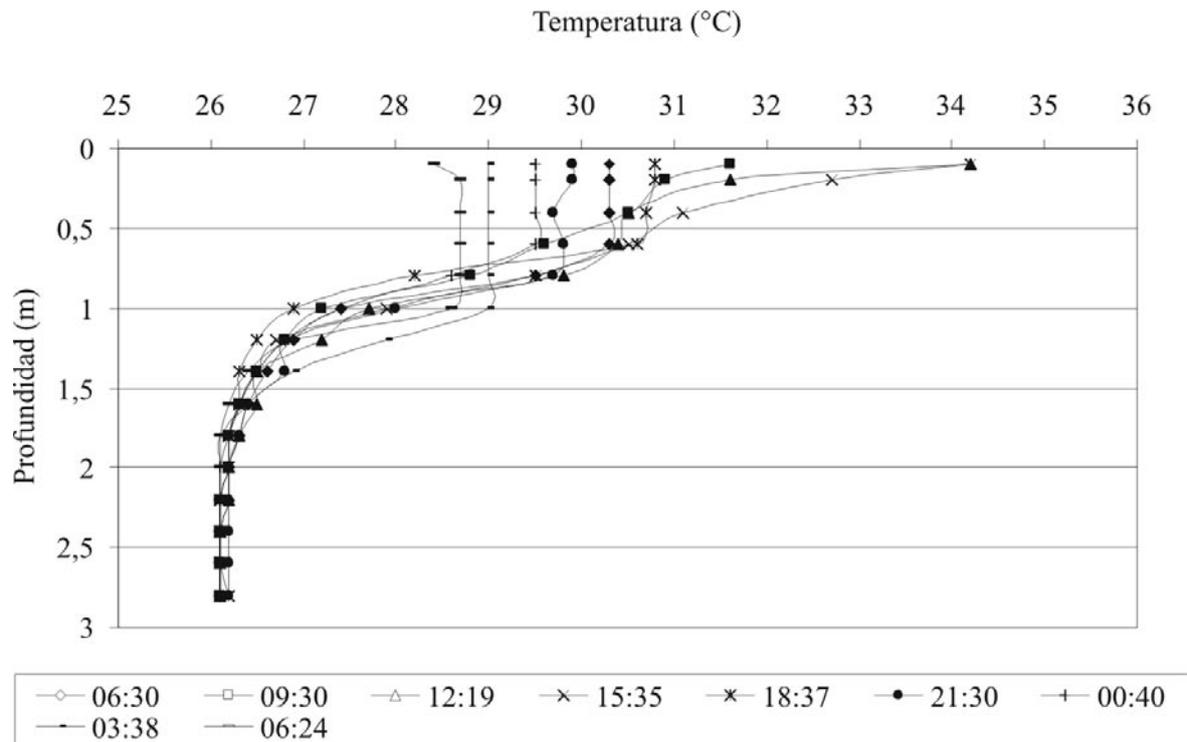


Figura 6 Perfil de temperatura. 12-13 de junio de 2004

Los perfiles de temperatura comprueban cómo en esta época calurosa la mezcla en la columna de agua no se da. Esto debido a las altas temperaturas que irradian el cuerpo cenagoso durante el día.

El calor almacenado durante la jornada de estudio se presenta en la figura 7 donde se ve claramente el máximo almacenado 32.600 J/cm² entre las 12 y las 15 horas, y el mínimo 31.790 J/cm² a las 18:30 horas.

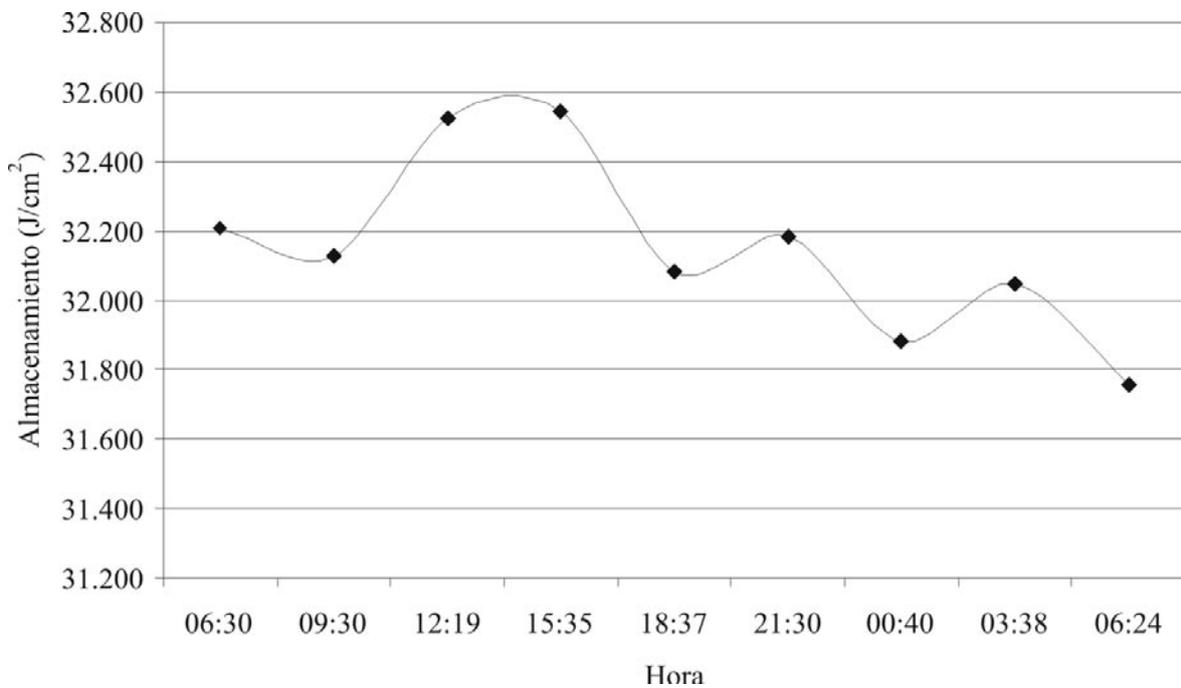


Figura 7 Almacenamiento de calor. 12-13 de junio de 2004

Esta baja pérdida de calor en la columna de agua no permite que ésta tenga una mezcla total; este comportamiento es característico de lagos oligomicticos, en los cuales la temperatura del agua superficial oscila entre 20 y 30 °C, manteniéndose casi constante durante todo el año. El gradiente térmico es débil, y se producen por consiguiente cambios poco notorios. La circulación vertical es irregular y rara vez es total.

La figura 8 muestra el comportamiento de la acumulación de calor en Joules para la jornada nictimeral de 12-13 de junio de 2004. Se aprecia una ganancia máxima de 1.321.916,26 Joules entre las 9:30 y las 12:19 horas la cual coincide con el periodo de máximo almacenamiento de calor (figura 7) y máxima actividad solar, produciendo un gradiente de temperatura máximo de 0,11310 °C/h. El período de pérdida máxima, -1.544.554,788 Joules, ocurre entre las 15:35 y las 18:37 horas, que coincide con la caída del sol y produce un descenso en la temperatura media de la columna de agua entre los

dos periodos, dando como resultado un gradiente mínimo de temperatura de -0,13214 °C/h.

Los flujos totales por periodo presentados en la tabla 2 exhiben un comportamiento normal, es decir durante las horas de máxima actividad solar la ganancia de calor es alta con un máximo de 8.528.771,82 Joules entre las 9:30 y las 12:19 horas. La máxima pérdida de calor ocurre en las horas de la noche o cuando la actividad del sol es mínima, permitiendo así que las salidas por evaporación, conducción-convección y radiación del agua de onda larga supere la energía en forma de calor que entra durante estos periodos. El valor de máxima pérdida que se obtuvo durante estos periodos (00:40-3:38 horas) fue de -1.515.777,561 Joules.

Estas pérdidas se deben principalmente al alto poder reflectivo del espejo libre de agua y alta humedad que se presenta en la zona durante esta época, 83,5% en promedio.

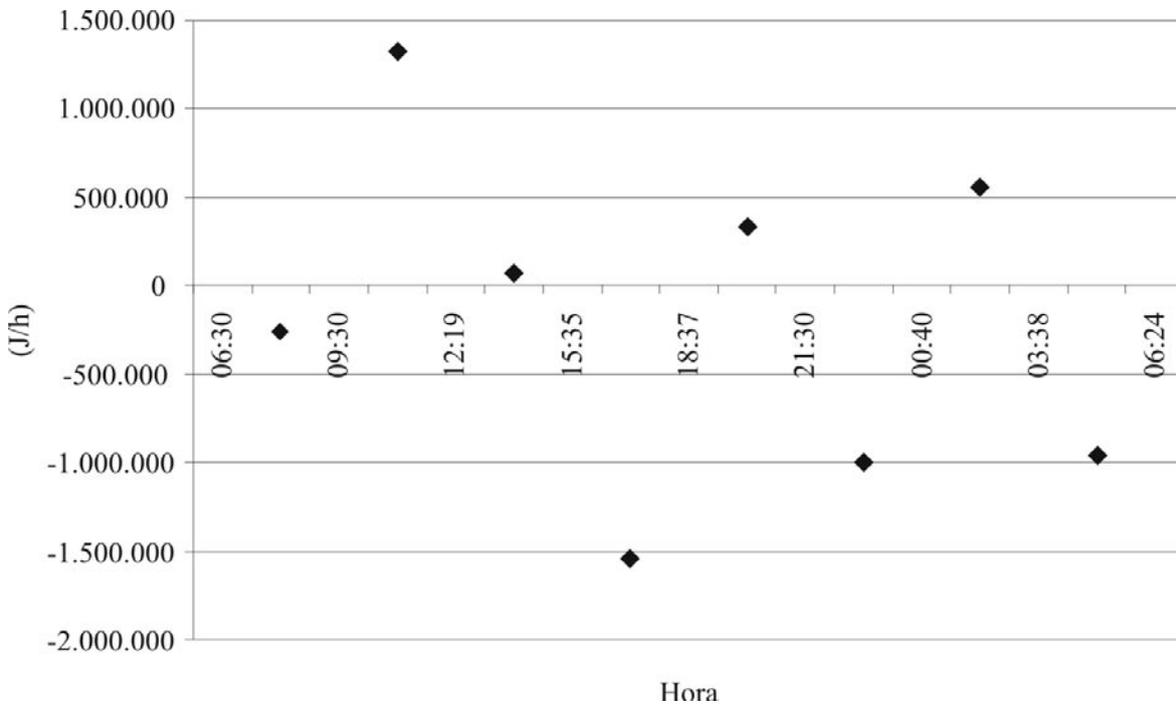


Figura 8 Acumulación de calor. 12-13 de junio de 2004

La resistencia a la mezcla que muestra la figura 9 presenta su máxima estabilidad durante las 12:19 y las 15:35 horas con un valor de 16,2 ergios. Esto es muy comprensible debido a las altas temperaturas que se presentan en la superficie del agua, 34,2 °C para ambas horas, dando como resultado un gradiente alto en toda la columna de agua 3 °C/m y por ende una diferencia de densidad considerable entre la superficie y el fondo.

Al llegar la tarde y entrada la noche la resistencia a la mezcla disminuye periódicamente hora a hora hasta alcanzar un valor mínimo de 4,17 ergios a las 6:24 horas; en este punto la estabilidad de la columna de agua es mínima.

La figura 10 representa los perfiles y distribución de oxígeno en la columna de agua de la ciénaga de Cachimbero durante el mes junio de 2004 (verano).

Los niveles más altos de oxígeno disuelto (5-7,3 mg/l) se encuentran en los primeros 30 cm y durante las horas de mayor acción del sol (12-

16 horas). Esto puede deberse a que parte del oxígeno disuelto en el agua es el resultado de la fotosíntesis de las plantas acuáticas que se encuentran cerca de la superficie. También la turbulencia de la corriente puede aumentar los niveles de OD, sobre todo en la superficie, debido a que el aire queda atrapado bajo el agua que se mueve rápidamente y el oxígeno del aire se disuelve en el agua. Los niveles de oxígeno disuelto que presenta la ciénaga de Cachimbero durante esta fecha se encuentran entre 0 y 7,3 mg/l, estas concentraciones varían de acuerdo a la hora del día y profundidad a la que se haga la medición. En estos perfiles notamos cómo el oxígeno siempre tiende a agotarse conforme se descende en la columna de agua, muchas veces hasta llegar a la anoxia.

Conclusiones

- En el comportamiento térmico de la ciénaga de Cachimbero se pueden apreciar dos características principales:

Tabla 2 Flujo total de calor por periodo de tiempo. 12-13 de junio de 2004

Hora	Rad. Agua. OL	Conv.-Cond.	Evap. Conden.	Rad. Atm. OL.	Rad. Solar OC	Flujo total de calor	Flujo total de calor
(h)	$J_{wr} = (J/m^2 d)$	$J_c = (J/m^2 d)$	$J_e = (J/m^2 d)$	$J_{an} = (J/m^2 d)$	$J_{sn} = (J/m^2 d)$	$J = (J/m^2 d)$	$J = (J/m^2 \text{ periodo})$
6:30	40.568.441,30	13,15	130,07	30.351.804,36	32.267.266,12	22.050.485,96	2.756.310,74
9:30	41.622.942,69	10,40	233,32	31.185.106,47	82.218.638,69	71.780.558,75	8.972.569,84
12:19	42.330.428,01	18,16	344,16	31.231.239,10	100.521.955,27	89.422.404,04	11.177.800,50
15:35	41.408.867,58	28,82	313,98	29.808.082,59	62.918.702,59	51.317.574,80	6.414.696,85
18:37	40.248.485,73	39,15	221,16	28.338.677,03	30.968.270,32	19.058.201,30	2.382.275,16
21:30	39.904.202,50	44,39	193,22	27.849.771,03	-12.054.669,07	-1.506.833,63	-1.506.833,63
0:40	39.667.500,43	45,62	189,85	27.541.515,42	-12.126.220,48	-1.515.777,56	-1.515.777,56
3:38	39.379.630,01	37,32	155,81	27.799.722,49	6.282.338,75	-5.297.761,91	-662.220,24

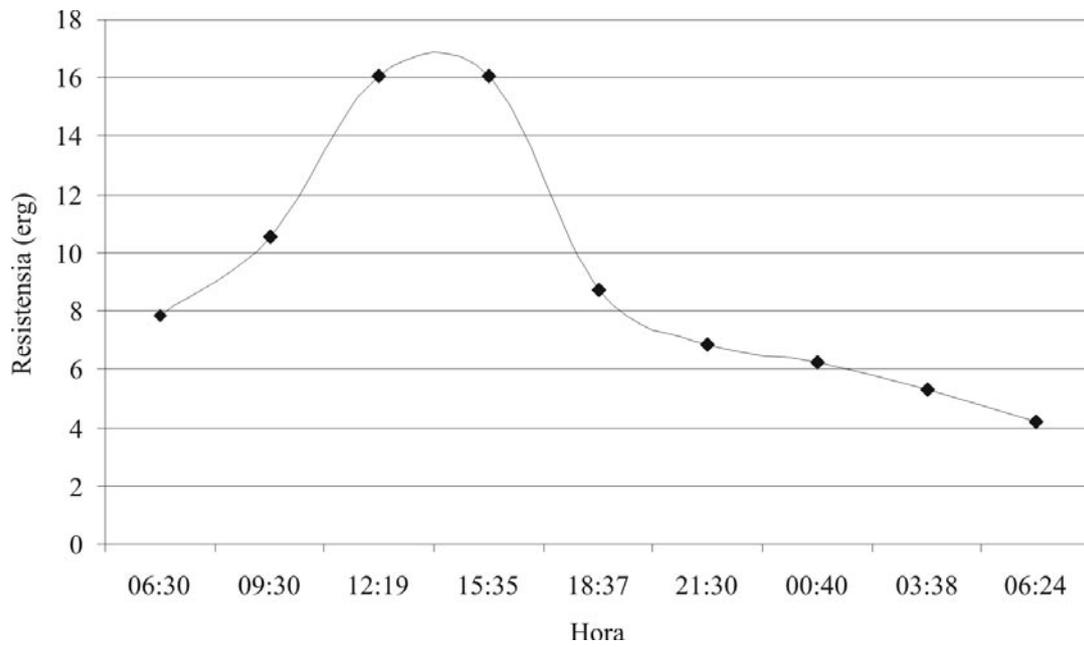


Figura 9 Variación horaria de la resistencia a la mezcla. 12-13 de junio de 2004

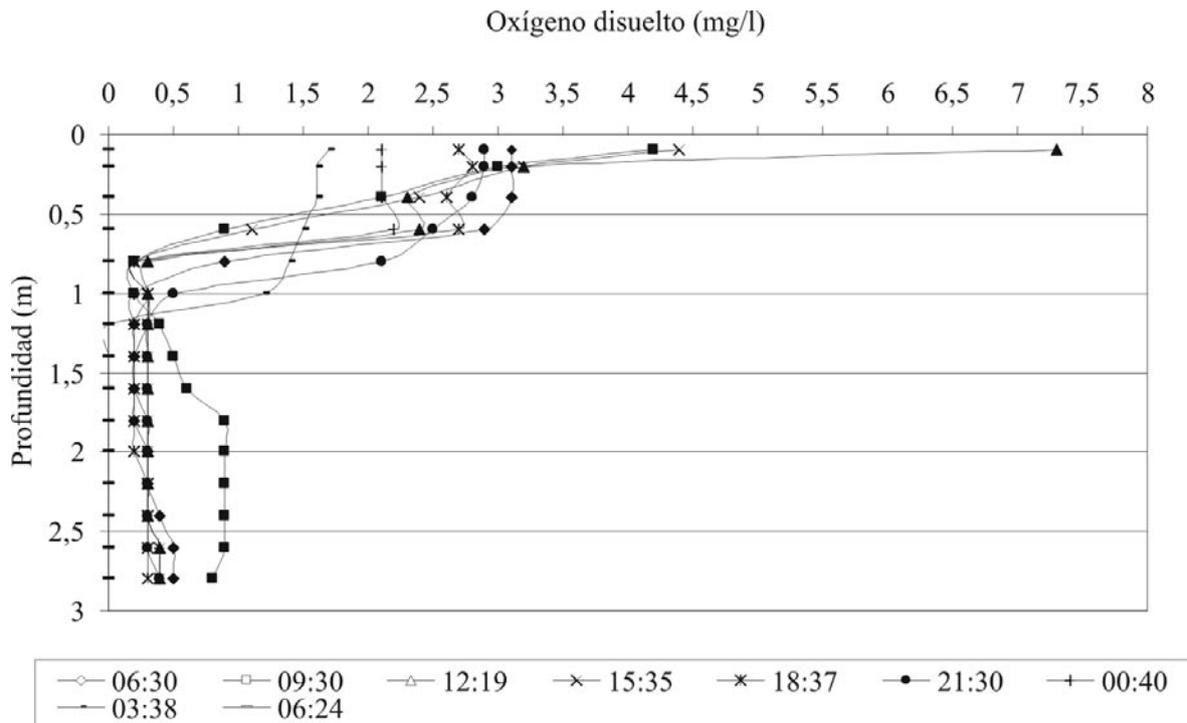


Figura 10 Perfil de oxígeno. 12-13 de junio de 2004

1. Comportamiento de mezcla diaria durante los dos periodos lluviosos del año comprendidos en abril-mayo y septiembre-octubre. Durante las horas de sol aumenta la temperatura del sistema cenagoso en las capas superiores, la cual va disminuyendo conforme se aumenta la profundidad. Entrada la noche, cuando la acción del sol es nula, los perfiles se tornan ortogrados; es decir el gradiente de temperatura que se presenta durante las horas de sol decrece progresivamente lo cual lleva a una uniformidad en la densidad de la columna de agua. Esto permite que el trabajo que realiza el viento para mezclar la columna de agua sea menor, ayudado por la baja profundidad que presenta todo el complejo cenagoso, razón por la cual se logra una mezcla completa en las horas de la noche y entrada la madrugada. Este comportamiento, en estas épocas del año (invierno), es típico para lagos de tipo polimíctico, los cuales se encuentran en regiones tropicales y mantienen una continua mezcla.
 - El sistema cenagoso es somero, sus aguas presentan un alto contenido de dióxido de carbono (CO₂) y sustancias húmicas, las cuales le dan un color ámbar al agua y limitan la entrada de luz, pero aumenta la absorción de energía en las primeras capas de la columna de agua dando como resultado gradientes de temperatura considerables en los 60 cm iniciales de la columna de agua.
 - La calidad del agua en el complejo cenagoso está estrechamente ligada al ciclo diario de estratificación térmica durante las horas del medio día y a su ruptura y mezcla al final de la tarde.
 - Las concentraciones de oxígeno en la columna de agua son bajas y disminuyen con la profundidad y hora del día, muchas veces llegando a la anoxia. Este comportamiento se debe a la concentración de materia orgánica, aliada a las altas temperaturas, que contribuye decisivamente a la desoxigenación del agua.
2. Comportamiento de estratificación permanente durante las 24 horas en los dos periodos secos uno en diciembre-febrero y el segundo en el mes de julio. Los gradientes máximos de temperatura están ubicados entre 0,6 y 1 m de profundidad. Además de ofrecer la mayor estabilidad debido a la diferencia de densidad que se presenta entre la superficie (metalimnio) y el fondo (hipolimnio). Esta baja pérdida de energía (calor) en la columna de agua no permite una mezcla total. Este comportamiento es característico de lagos oligomícticos, en los cuales la temperatura del agua superficial oscila entre 20 y 30°.

Referencias:

1. G. Roldán. *Fundamentos de limnología neotropical*. Medellín. Editorial Universidad de Antioquia. 1992. pp. 205-223.
2. W. M. Jr. Lewis. "The Thermal Regime of Lake Lanao (Philippines) and its Theoretical Implications for Tropical Lakes". *Limnology and Oceanography*. Vol. 18. 1973. pp. 200-217.
3. W. M. Jr. Lewis "Temperature, heat and mixing in Lake Valencia, Venezuela". *Limnol. Oceanogr.* Vol. 18. 1983. pp. 273-286.
4. W. M. Jr. Lewis. "A revised classification of lakes based on mixing". *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 40. 1983. pp. 1779-1787.
5. W. M. Jr. Lewis. "Tropical Limnology". *Ann. Rev. Ecol. Syst.* Vol.18. 1987. pp. 159-184.
6. J. F. Talling. "Environmental controls on the function of shallow tropical lakes". *Hydrobiology*. 458. 2001. pp. 1-8.
7. J. Padisák, C.S. Reynolds. Shallow lakes. The absolute, the relative, the functional and the pragmatic. *Hydrobiology*. Vol. 506. 2003. pp. 1-11.
8. G. Ramírez, G. Viña. *Limnología colombiana, aportes a su conocimiento y estadísticas de análisis*. Bogotá. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. 1998. pp. 131-145.
9. J. C. Restrepo, J. L. Toro. *Reserva Natural Laguna de Cachimbero: Caracterización Biofísica*. Medellín. Corantioquia-Corporación Laguna de Cachimbero. 1997. p. 158.

10. D. Wetzel, G. Robert. H. Likens, E. Gene. *Limnological Analyses*. New York. 3^a ed. Springer. 2000. pp. 45-56.
11. S. Chapra. *Surface Water Quality Modeling*. New York. McGraw-Hill. 1997. pp. 560-588.
12. R. L. Bras. *Hydrology: An introduction to hydrologic science*. United States of America. Addison – Wesley Publishing Company. 1990. p. 643.
13. P. S. Eagleson. *Dynamic Hydrology*. New York. McGraw-Hill. 1970. p. 448.14.