

# LA RADIACIÓN SOLAR Y LA CALIDAD DEL AGUA EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ

## SOLAR RADIATION AND WATER QUALITY IN THE YACYRETA DAM

HUGO A. ROJAS<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Docente Investigador de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UNA. E-mail: hugorojas@facen.una.py

**Resumen:** Este trabajo de investigación tiene como objetivo verificar las variaciones en las radiaciones solares en el rango de la radiación ultravioleta (UV) y de la activa a la fotosíntesis (PAR) en el Embalse de Yacyretá, determinando el coeficiente de atenuación y la profundidad de la zona fótica, relacionados con la calidad de agua en la variable química materia orgánica. La radiación se midió en la columna de agua coincidente con la toma de muestras para las determinaciones químicas. La radiación UV-B presentó curva exponencial de atenuación con escasa penetración en la columna de agua. Se encontró muy buena correlación de la radiación PAR con la profundidad, ya que se observó una curva exponencial de atenuación. No se dio diferencia significativa con ANOVA para la materia orgánica hasta los 3 m de profundidad, pero sí se dio diferencia significativa por campaña o muestreo. El coeficiente de atenuación presentó variaciones en concordancia con la materia orgánica medido por oxidación con permanganato.

**Palabras clave:** Radiación UV-B y PAR, Calidad de Agua, Materia Orgánica.

**Summary:** This research aims to verify the variations in solar radiation in the range of ultraviolet radiation (UV) and photosynthesis active (PAR) on Yacyretá Reservoir, determining the attenuation coefficient and the depth of the photic zone, relating to the quality of water in variable organic chemistry. The radiation was measured in the water column coincident with the sampling for chemical determinations. The UV-B radiation exponential attenuation introduced with poor penetration into the water column. Very good correlation was found of the PAR radiation with depth, as was observed attenuation exponential curve. No significant difference occurred ANOVA for organic matter to 3 m deep, but significant differences occurred by or sampling campaign. The attenuation coefficient of variation introduced in accordance with the organic matter by oxidation with permanganate measured

**Keyword:** UV-B and PAR radiation, Water Quality, Organic matter.

### INTRODUCCIÓN

El Sol transforma toneladas de su masa en energía radiante cada segundo, que es emitida como ondas electromagnéticas con longitudes de onda y energías específicas. El conjunto de éstas es denominada espectro electromagnético y es usado en la superficie terrestre para los procesos naturales biológicos y es aprovechado por el ser humano y la biosfera de forma directa o indirecta (Wetzel 1981).

Esta radiación se puede clasificar en diferentes rangos de acuerdo a sus longitudes de onda de la siguiente manera: Vacuum Ultraviolet (VUV), Radiación Ultravioleta (RUV) (C, B y A), Visible e Infrarrojo cercano (IR). (Baird 2001).

La atmósfera, constituida por diferentes gases, absorbe selectivamente la energía radiante de

acuerdo a su longitud de onda. La absorción tiene lugar cuando la frecuencia de la radiación electromagnética cumple con la condición de Bohr, según la cual si  $\epsilon_f$  y  $\epsilon_i$  son las energías de los estados involucrados el valor de dicha frecuencia queda definida por la diferencia  $\Delta\epsilon = \epsilon_f - \epsilon_i = h.v_i \rightarrow f$ . (Figueroa y Dávila 2004).

Según Calvert y Pitts (1966) el ozono en la estratosfera absorbe fuertemente la RUV en la región de 220-320 nm, a lo que contribuyen el O<sub>2</sub> por debajo de 220 nm y el O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> por debajo de 120 nm, filtrando la radiación más energética y peligrosa UV-C y UV-B, y deja pasar solamente la radiación UV-A que se extiende entre 320 y aproximadamente 400 nm, alcanzando la troposfera solamente la luz con una  $\lambda > 300$  nm (Baird 2001).

La destrucción de la capa de ozono estratosféri-

co ha provocado un incremento de la radiación ultravioleta que alcanza la superficie terrestre, cuyos efectos se están estudiando tanto desde el punto de vista ecológico como de la salud. En el ecosistema acuático este efecto va dependerá de las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua. Para los organismos acuáticos una primera barrera importante para la atenuación de la radiación incidente es el agua, en la que no penetra totalmente (Zagarese et al. 1998).

La importancia de la RUV como factor regulador de los ecosistemas acuáticos se consideró secundaria hasta hace unas décadas, ya que es absorbida en los primeros centímetros de la columna de agua. El descubrimiento del agujero de ozono en la Antártica ha promovido la investigación y el desarrollo de espectro-radiómetros sumergibles, lo que ha puesto de manifiesto que en muchos ecosistemas acuáticos la RUV puede penetrar decenas de metros (Zagarese et al. 1998).

La radiación fotosintéticamente activa (PAR) incluye a la región del espectro solar cuya longitud de onda está comprendida entre 400 y 700 nm. Los valores son importantes como parámetro de entrada de energía en diversos procesos biológicos. Su evaluación temporal tiene particular interés en el seguimiento del crecimiento del fitoplancton, y es fundamental para el estudio de los procesos asociados a la productividad primaria (Wetzel 1981).

Los efectos de la radiación sobre el ecosistema están íntimamente relacionados con la concentración, tamaño y estructura de las moléculas de materia orgánica disuelta (MOD), cuantificada frecuentemente como carbono orgánico disuelto (COD) (Reche, Pace y Cole 1998). La cantidad de energía luminosa que penetra es absorbida y dispersada por diferentes mecanismos. Una vez que ha penetrado, su atenuación depende fundamentalmente de la concentración de la MOD, de las sustancias húmicas y fúlvicas y de la cantidad de microorganismos presentes. Cambios en la concentración del fitoplancton provocan también cambios en la reflexión de la superficie (Cole 1988).

Los aportes variables de materia orgánica e

inorgánica pueden incrementar la dispersión de la energía luminosa. El material particulado en suspensión en concentraciones bajas tiene relativamente poco efecto sobre la absorción, aunque si sobre la reflexión, fenómeno que se ve incrementado con el oleaje. Los aportes alóctonos contienen gran cantidad de ácidos húmicos y fúlvicos, compuestos con cromóforos que aumentan la capacidad específica de absorción por parte de la materia orgánica disuelta coloreada (CDOM) (Wetzel 1981).

Esta investigación tiene como objetivo general determinar la influencia e interrelación de los niveles actuales de la radiación solar UV-B y PAR con los parámetros indicadores de la calidad química del agua en el área del embalse de Yacuyretá.

A ese efecto se establecieron objetivos particulares como la determinación de la zona fótica, el coeficiente de extinción de la luz  $k_z$ , la penetración o extinción de la radiación ultravioleta, la radiación PAR relacionada con los parámetros de la calidad química del agua (como la clorofila  $a$ , color aparente, materia orgánica), efectuándose las mediciones de la radiación ultravioleta y de fotosíntesis PAR por medio de sensores sumergibles a distintas profundidades en la columna de agua.

## MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### El espectro solar

La radiación solar es emitida sobre un espectro de longitud de ondas entre 200 a 3000 nanómetros (nm) con una cantidad específica de energía para cada longitud, cuyo intervalo completo constituye el espectro electromagnético (Figueruelo y Dávila 2004).

La atmósfera, constituida por diferentes gases, absorbe energía selectivamente por longitud de onda, originando procesos químicos y fotoquímicos cuando la frecuencia de la radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas. La energía disminuye cuando un fotón colisiona con una molécula de un gas sin ser absorbido con una capacidad de absorción condicionada a la cantidad de ozono y otros gases (Figueruelo y Dávila 2004).

Los cambios en la concentración de ozono producirían aumentos significativos de los niveles de la nociva radiación, cuyo blanco inicial de incidencia a nivel biológico es el DNA. Así, la disminución de la capa de ozono se traduciría en un aumento de la radiación ultravioleta que llega a los sistemas acuáticos (Zagarese et al. 1998).

La radiación fotosintética activa (PAR) comprende la región entre 400 y 700 nm, intervalo de longitud de onda que se aproxima a la respuesta fotosintética de las plantas. Las algas y las plantas verdes utilizan la energía radiante proveniente del sol para sintetizar moléculas orgánicas a partir de las inorgánicas. Prácticamente, la totalidad de la energía que dirige y controla el metabolismo de los lagos deriva directamente de la energía solar utilizada en la fotosíntesis. Es la principal fuente de energía en la mayoría de los ecosistemas naturales (Righini y Grossi Gallegos 2005).

Los efectos de la radiación ultravioleta (RUV) sobre los organismos vivos dependen tanto de la irradiancia como del tiempo de exposición, pudiendo provocar reacciones fotoquímicas que alteran la composición del medio, y son responsables de la formación de especies químicas altamente reactivas como el radical peróxido, radical hidroxilo y súper óxido, oxígeno singlete y otros intermediarios capaces de inducir procesos redox en presencia de materia orgánica (Figueruelo y Dávila 2004).

Asimismo, existe otro conjunto de reacciones fotoquímicas que alteran la materia orgánica disuelta (MOD), como la foto oxidación de la mate-

ria orgánica con la liberación de algunos elementos que se hallan adsorbidos o como materia en suspensión.

La disminución de la energía radiante por dispersión y absorción a mayor profundidad se denomina atenuación de la luz. Esta energía además puede transformarse en calor a medida que va penetrando en la columna de agua. Una vez que ha penetrado, su atenuación depende fundamentalmente de la concentración de materia orgánica disuelta, sustancias húmicas y fúlvicas, y la cantidad de microorganismos presentes (Cole 1988).

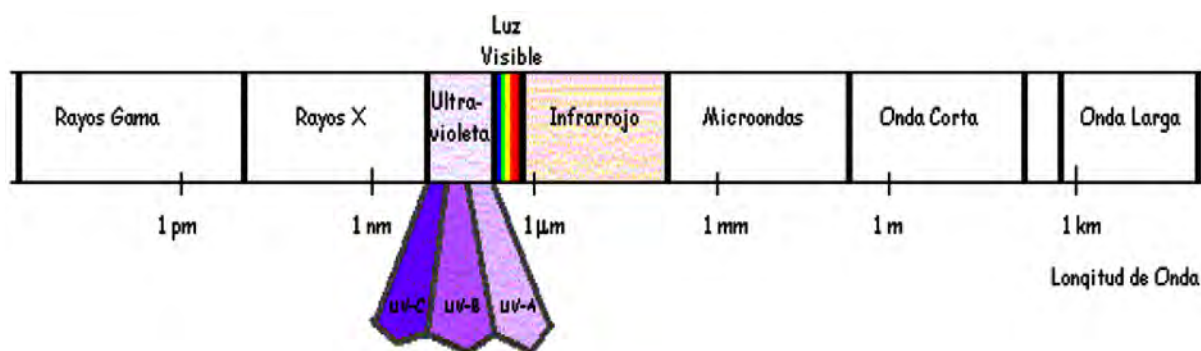
En resumen, la cantidad y composición espectral de la radiación solar que alcanza la superficie de una masa de agua varía enormemente con la latitud, estación, hora del día, altura y condiciones meteorológicas y la polución ambiental. Estas variables son función de las dinámicas cambiantes de la distancia angular, de la radiación, de la transparencia molecular, de la atmósfera y de la distancia que debe recorrer la luz (Wetzel 1981).

La longitud de onda ( $\lambda$ ), la frecuencia ( $\nu$ ) y la velocidad de la luz ( $C$ ) están relacionadas por medio de la expresión (1)

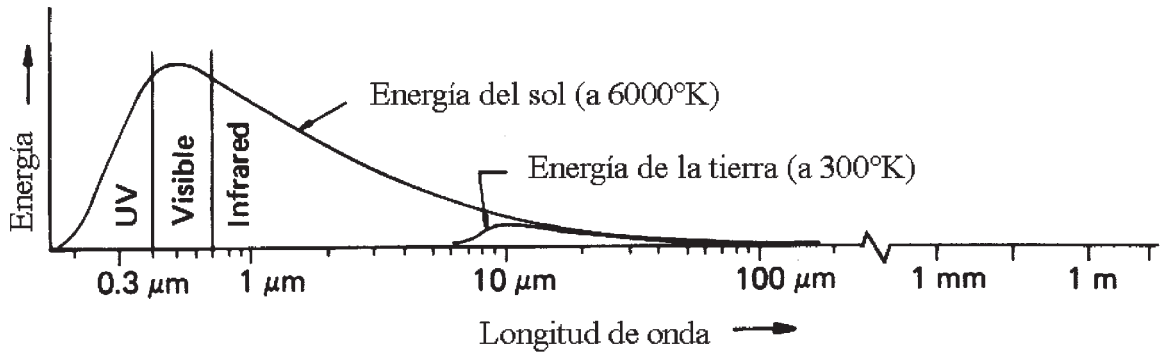
$$\lambda \nu = C \dots\dots\dots (1)$$

En la Figura 1 se observa el espectro electromagnético. No tiene definidos límites superior ni inferior, y la energía de una fracción diminuta de radiación (llamada fotón) es inversamente proporcional a su longitud de onda. A menor longitud de onda, mayor contenido energético.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de ener-



**Figura 1.** Espectro electromagnético de la radiación (Fuente: <http://jrubiano.pbworks.com/f/RADIACI%C3%93N+SOLAR-IDEAM.pdf>)



**Figura 2.** Energía radiada por el sol y la tierra (Fuente: <http://jrubiano.pbworks.com/f/RADIACION%20SOLAR-IDEAM.pdf>).

gía radiada por el sol y la tierra para las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético.

**La luz en el agua**

**Penetración de la luz, atenuación y coeficiente de extinción**

La *Radiancia*, potencia radiante o flujo radiante es la medida de la cantidad de energía electromagnética que emite un radiador por unidad de tiempo. Se mide en Watt cuyo equivalente es el Joule/segundo. La energía transportada puede manifestarse de formas muy diversas en los cuerpos que la reciben: propiciando reacciones químicas, efectos eléctricos, efectos mecánicos, calentamiento, etc. Estos efectos de la radiación se expresan en términos de la energía emitida (o recibida) por unidad de superficie en la unidad de tiempo, denominada *Irradiancia* o *Densidad superficial de radiación* expresada en Watt/m<sup>2</sup>

La transmisión y absorción de la luz se pueden calcular de distintas maneras. Quizás la forma más directa sea observar el porcentaje de transmisión o absorción de la luz monocromática en agua pura a profundidades dadas. Esta absorción expresada en tanto por ciento o absorción porcentual está basada en la radiación incidente en superficie y la radiación a una profundidad dada (2) y (3) (Wetzel 1981).

$$\text{Absorción} = I_z / I_o \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Absorción \%} = 100(I_o - I_z) / I_o \dots\dots (3)$$

$I_o$  irradiación en la superficie del agua  
 $I_z$  irradiación a z metros

La ecuación (4) es equivalente a la expresión anterior tomada en logaritmo natural. La intensidad de la luz o irradiancia a una profundidad z (metros) denominada ( $I_z$ ) es función de la intensidad en superficie ( $I_o$ ) multiplicada por el logaritmo natural del coeficiente de extinción negativo  $k$  a una profundidad dada. Estas relaciones de absorción normalmente se expresan gráficamente en forma lineal, o incluso mejor logarítmica, para demostrar las propiedades fundamentales de la transmisión de la luz. Generalmente cerca de un 53% de la energía luminosa total se transforma en calor en el primer metro.

$$I_z = I_o e^{-kz} \dots\dots\dots(4)$$

$$\ln I_o - \ln I_z = kz$$

El coeficiente de extinción de la luz en el agua sigue el modelo descrito, que predice la intensidad que alcanzará una profundidad de z (metros), siendo los parámetros del modelo la intensidad incidente ( $I_o$ ) y el coeficiente de extinción vertical  $K$ . Este coeficiente de extinción vertical depende de la calidad del agua, existiendo diferentes tipos según sus características ópticas (Wetzel 1981).

Raras veces la radiación solar directa penetra en las condiciones ideales de ángulo recto con la superficie y la irradiación indirecta no es nunca perpendicular a la superficie. Además el coeficiente de extinción total ( $K_t$ ) está regido no sólo por

el del agua ( $K_w$ ) sino también por la absorción de las partículas en suspensión ( $K_{particulas}$ ) y sobre todo, por los compuestos disueltos o el color ( $K_{color}$ ). Por tanto el coeficiente de extinción in situ ( $K_{in situ}$ ) está formado por estos componentes (5) (Cole 1988).

$$(K_{in situ}) = K_w + K_p + K_o \dots \dots \dots (5)$$

La proporción de fotones absorbidos por cada metro de agua es constante. Por ejemplo, si en el primer metro la radiación se reduce del 100% al 10%, en el segundo metro se reducirá del 10% al 1%. Por lo tanto, cuando se grafican los datos de radiación versus profundidad en una escala semi-logarítmica se obtiene una línea recta, cuya pendiente representa el coeficiente de atenuación para la longitud de onda considerada (Zagarese et al. 1998).

### La radiación solar y la materia orgánica disuelta (MOD)

La MOD es un conjunto muy heterogéneo de moléculas orgánicas de procedencia diversa y con un contenido variable de cromóforos que absorben

fotones, produciendo la coloración del agua. Estos cromóforos determinan las propiedades ópticas de la MOD, tales como la capacidad de absorción y la foto-reactividad. La capacidad de absorción, o absorción específica, está estrechamente relacionada con la cantidad de cromóforos que contiene la MOD. Cuanto mayor sea la proporción de moléculas con cromóforos absorbiendo en el rango UV, mayor será la absorción específica y menor la transmisión de la radiación UV en la columna de agua (Reche, I. 2003).

En los ecosistemas acuáticos estos efectos dependerán de la transmisión de la radiación UV en la columna de agua, que está controlada por la concentración y las propiedades ópticas de la MOD. El medio acuoso es un filtro protector para los organismos (Reche 2003). Sensibilidad de los ecosistemas acuáticos a la radiación ultravioleta: el papel de la materia orgánica disuelta Ecosistemas, Año XII, Nº 1/ 2003, Enero-Abril). En: Asociación Española de Ecología Terrestre. [revistae-cosistema@ua.es](mailto:revistae-cosistema@ua.es); <http://redalyc.uaemex.mx>.

Generalmente la concentración del MOD se cuantifica analizando su contenido en carbono

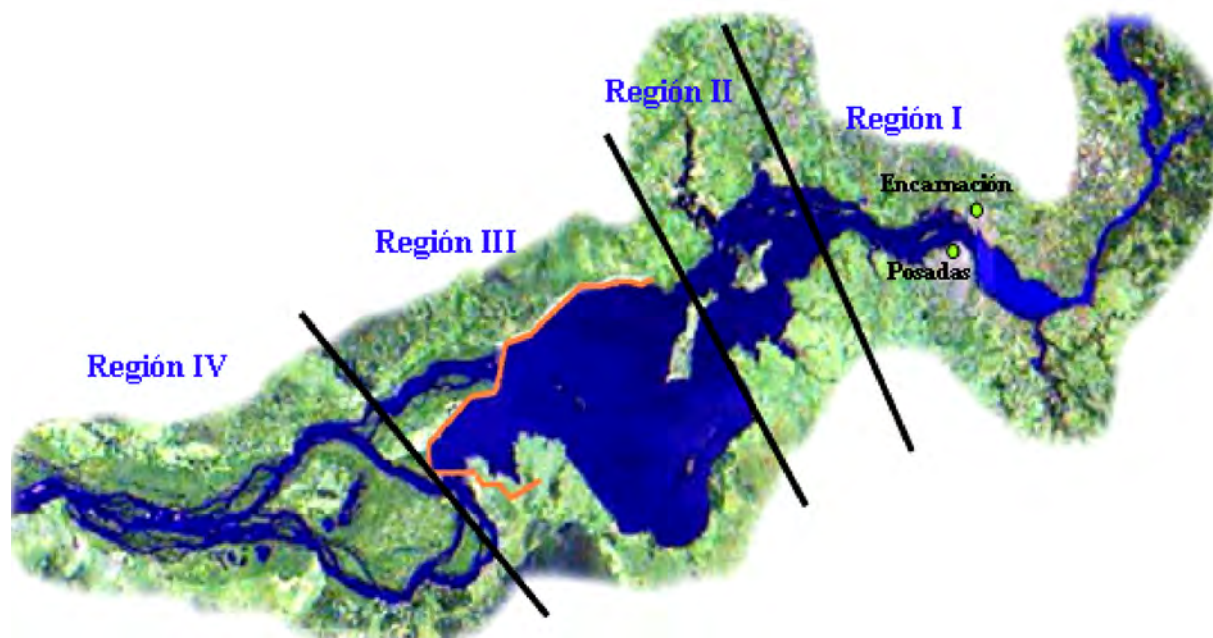


Figura 3. Imagen del embalse de la hidroeléctrica de Yacyretá en donde fue realizado el estudio.



**Figura 4.** Localización geográfica de los sitios o puntos de muestreo (Fuente: Visualizador GIS, Google Earth).

orgánico disuelto (COD). Los coeficientes de atenuación de las longitudes de onda comprendidas en la banda UV dependen significativamente de la concentración de COD. Una mayor concentración de COD implica una mayor atenuación de la radiación UV. Esta relación es más variable o con mayor dispersión para concentraciones bajas de COD (<3 mg/l) (Reche 2003)

### Área de estudio

El estudio fue realizado en las aguas del embalse de la hidroeléctrica Yacyretá. El mismo tiene un espejo de agua de aproximadamente 1420 Km<sup>2</sup> ubicado entre el paralelo 27° y 28° de Latitud Sur (ver Figura 3).

En la Figura 4 se observan los sitios o puntos de muestreo. El primero está ubicado sobre el ex brazo Añá Cuá, frente a la localidad de San Cosme, con una profundidad de 18 m. El otro punto de muestreo fue ubicado en el sub-embalse lateral Arroyo Tacuary, en la localidad de Carmen del Pa-

raná, formado como consecuencia del embalse de Yacyretá a unos 1000 m aguas abajo del puente sobre la ruta 1, con una profundidad de 10 m en la estación. En ambos casos se desarrollaron las tareas de muestreo y mediciones desde una embarcación a motor.

Se realizaron cuatro mediciones en la estación San Cosme, ubicada sobre el ex-brazo Añá Cuá en pleno embalse de Yacyretá los días 4, 5, 13 y 20 de enero 2011 y en el sub-embalse del Arroyo Tacuary los días 22 y 26 de enero, el 15 de febrero y el 10 de marzo de 2011.

Las técnicas e instrumentos para la recolección de los datos constaron de dos fases. La primera corresponde a la del campo, que incluye la toma de muestra y mediciones in situ de los parámetros de calidad de agua y radiaciones solares en el medio acuático. La segunda fase corresponde a los análisis de laboratorio de parámetros de calidad de agua y paralelamente el trabajo de gabinete con la evaluación de los resultados.

### Parámetros in situ

Los parámetros denominados in situ medidos en cada nivel fueron: Oxígeno disuelto, Temperatura, pH, Conductividad, Sólidos Totales Disueltos, Turbidez, Transparencia al disco de Secchi.

### Análisis de laboratorio

Los análisis realizados sobre muestra de agua de cada nivel fueron: P-total, N-Nitrato, Color aparente, Materia orgánica, Clorofila, Alcalinidad Total. Las muestras para los análisis de laboratorio fueron tomadas en la vertical a distintas profundidades. Una vez extraídas, fueron inmediatamente acondicionadas en cajas térmicas, herméticas refrigeradas a 4° C y al abrigo de la luz, especialmente las muestras para la determinación de clorofila.

Aquí, solamente se han considerado los resultados de las correlaciones de las radiaciones PAR con la materia orgánica; los demás parámetros mencionados por su extensión no son presentados.

### Determinación de materia orgánica

La materia orgánica de las muestras de agua tomadas a distintas profundidades fue determinada por el método del permanganato. El método de oxidabilidad al permanganato consiste en conocer la cantidad de materia orgánica presente en el agua mediante la oxidación con permanganato potásico en caliente y en medio ácido. En la oxidación producida hay un gasto de reactivo, del cual mediante cálculo se deduce la materia orgánica que hay en el agua analizada. El resultado se suele expresar como  $\text{mgO}_2/\text{L}$ , ya que la cantidad de permanganato que es reducida por la materia orgánica presente en la muestra es igual al  $\text{O}_2$  consumido en la reacción de oxidación. (Eaton et al. 1998).

### Medida de la radiación solar en el medio acuático

La radiación PAR y UV-B fueron leídas como función de la profundidad en el mismo sitio de recolección de muestras, con sensores sumergibles de la marca *Solar Light PMA2100 Datalogging Radiometer*, de procedencia Norteamericana con

certificado de calibración del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST).

El aparato está provisto con sensores en el rango de UV-B y PAR, con cables de 30 m de longitud que permitieron efectuar mediciones en la superficie y bajo el agua. De esa manera se obtuvieron los valores de la radiación incidente superficial a tiempo real y del perfil a lo largo de la columna a distintas profundidades y la transmisión de la radiación en el rango específico. Estos valores permiten calcular los porcentajes de luz transmitidas en función de la radiación en superficie como nivel 0 según  $I_z = I_0 e^{-kz}$ . Simultáneamente a las mediciones de radiación se tomaron las muestras de agua de las distintas profundidades

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Radiación UV-B

En la Tabla 1 se presentan los valores de energía de la radiación UV-B en unidades  $\text{Watt}/\text{m}^2$  medidos con el sensor *Solar Light*, la cual verificó muy poca penetración, que decreció a los pocos centímetros de la superficie. Esto dificultó las lecturas por ser el sensor muy sensible aún a las pequeñas ondulaciones o crestas de olas producidas por el viento, por lo que éste no penetró en la generali-

**Tabla 1.** Valores de la radiación UV-B medido con el sensor *Solar Light*.

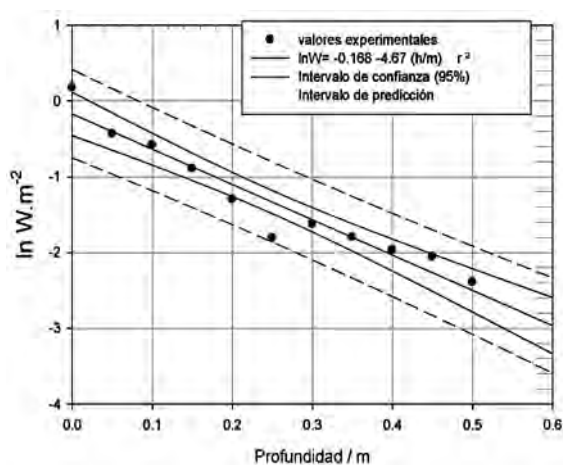
Profundidad (m)	Watt/m <sup>2</sup>
0,00	1,51
0,05	0,369
0,10	0,262
0,15	0,128
0,20	0,0503
0,25	0,01553
0,30	0,02364
0,35	0,0159
0,40	0,0108
0,45	0,00881
0,50	0,004044

dad de las veces más de 30 cm en la masa de agua.

Uno de los inconvenientes que se presentan en este tipo de mediciones está asociado con el movimiento de las olas. En varias oportunidades, al efectuar lecturas con el sensor UV-B, cualquier movimiento de la embarcación provocaba lecturas inestables muy fluctuantes y erróneas. A este aspecto debía sumársele la escasa penetración de la luz, ya que se extinguía a escasos centímetros de la superficie. Por otro lado, el efecto de la atenuación de la radiación UV-B se observó dependiente de la profundidad y de la presencia de materia orgánica.

En la Figura 5 (elaborado con Sigmaplot) se observan los valores del Ln de la radiación UV-B vs profundidad, con un intervalo de confianza (95%) y su intervalo de predicción. El ajuste de la radiación UV-B con la profundidad se efectúa con una exponencial  $R^2 = 0,9295$  con  $1,51 \text{ Watt m}^{-2}$  como primer valor por debajo de la superficie en el nivel 0, que adquiere a los 5 cm casi la 1/5 parte de su valor inicial:  $0,369 \text{ Watt m}^{-2}$

En la Tabla 2 se muestran los valores de los % de la radiación UV-B a la profundidad  $I_z$ , calculados en relación al valor de superficie  $I_0$  aplicando  $100 * I_z / I_0$ ; y en la Figura 6, el gráfico logarítmico de los % de radiación UV-B transmitida. El 100% le corresponde al máximo en la superficie (nivel 0 cm) o muy próximo a ella y con el 1% de la



**Figura 5.** Gráfico del Ln de los valores experimentales de la radiación UV-B en función de la profundidad, intervalo de confianza y predicción.

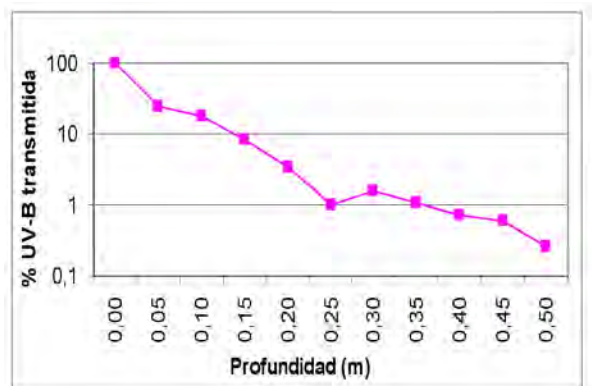
**Tabla 2.** Valores de los % de la radiación UV-B aplicando  $100 * I_z / I_0$ .

Profundidad (m)	% atenuación UV-B
0,00	100
0,05	24,4370861
0,10	17,3576159
0,15	8,47682119
0,20	3,33112583
0,25	1,02847682
0,30	1,56556291
0,35	1,05298013
0,40	0,71523179
0,45	0,58344371
0,50	0,26781457

radiación incidente en superficie a los 25 cm de profundidad.

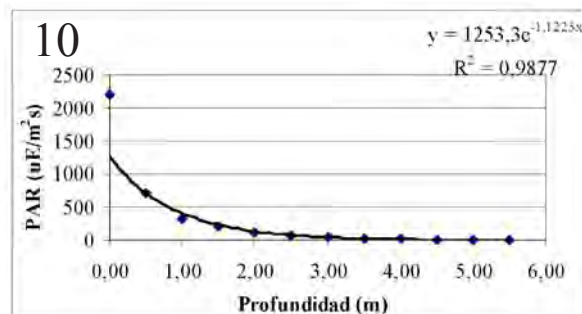
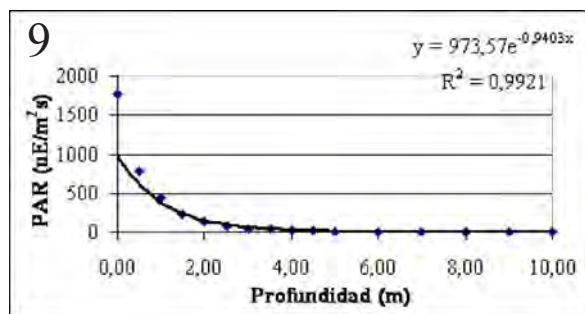
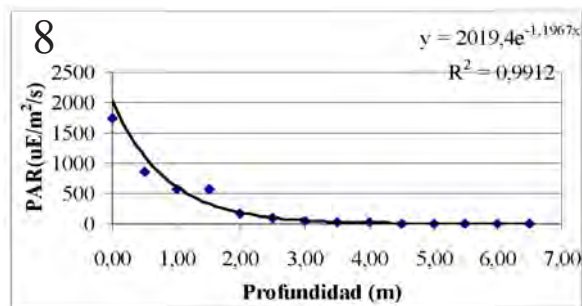
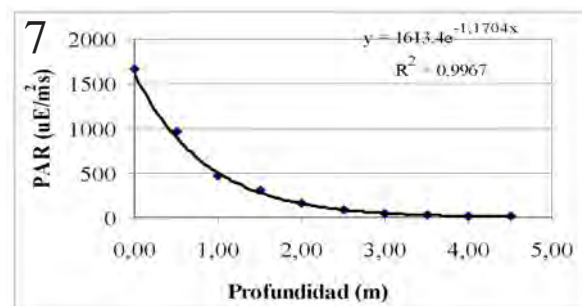
### Radiación fotosintéticamente activa (PAR)

Se realizaron en total ocho (8) mediciones de la radiación de fotosíntesis (PAR) desde embarcación en las dos estaciones fijadas. Cuatro mediciones en la estación San Cosme, ubicada sobre el ex-brazo Añá Cuá en el embalse de Yacyretá los días 4, 5, 13 y 20 de enero 2011 y en el sub-embalse del Arroyo Tacuary otras cuatro mediciones, los días 22 y 26 de enero, el 15 de febrero y el 10 de marzo 2011 respectivamente.



**Figura 6.** Gráfico logarítmico de los % de radiación UV-B transmitida.





**Figuras 7-10.** Radiación PAR San Cosme, correspondiente a las siguientes fechas y lecturas: 7) 04 de enero, leída hasta los 4,50 m; 8) 05 de enero, leída hasta los 6,50 m; 9) 3 de enero, leída hasta los 10 m; 10) 20 de enero, leída hasta los 8 m.

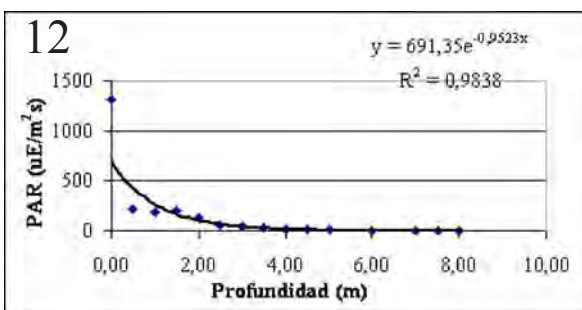
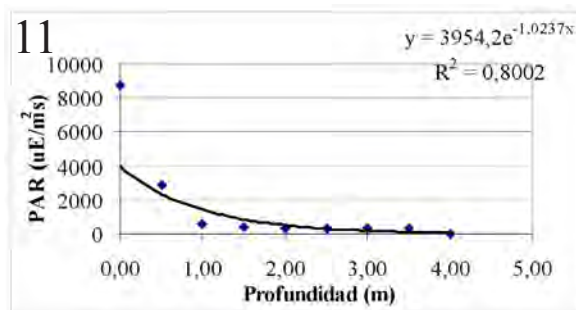
En San Cosme se llegó a medir la radiación hasta una profundidad máxima de 10 m y un mínimo de 4,50 m; en el sub-embalse del Arroyo Tacuary, hasta la profundidad máxima de 10 m; a partir de dicha profundidad el sensor dejaba de percibir señal de radiación. En todos los casos los valores dieron una muy buena correlación con la profundidad, ajustados siempre con una función exponencial, con  $R^2 = 0,98$  y  $R^2 = 0,99$ .

Las Figuras 7, 8, 9 y 10 corresponden a las mediciones de radiación PAR los días 04, 05, 13 y 20 de enero en San Cosme, leídas hasta los 4,50;

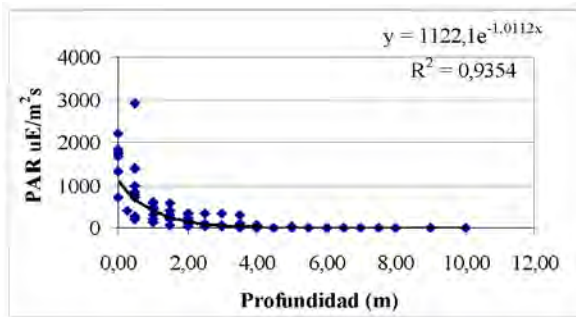
6,50; 10 y 8 m respectivamente. El primer valor corresponde al de superficie tomado ligeramente por debajo del agua (nivel 0).

En el Tacuary las mediciones de radiación PAR se realizaron hasta los 5,50 m de profundidad el día 22 de enero y hasta los 9 m el día 10 de marzo. En los demás días, hasta los 4 y 5 m de profundidad (ver Figura 11 y Figura 12).

La Figura 13 es el gráfico de evolución de la totalidad de los datos de radiación PAR *versus* profundidad de las 8 campañas, ajustado a través de una función exponencial con  $R^2=0,9354$ .



**Figuras 11-12.** Radiación PAR en el Tacuary, correspondiente a las siguientes fechas y lecturas: 11) el 22 de enero, leída hasta los 5,50 m; 12) 10 de marzo en el Tacuary leída hasta los 9 m.



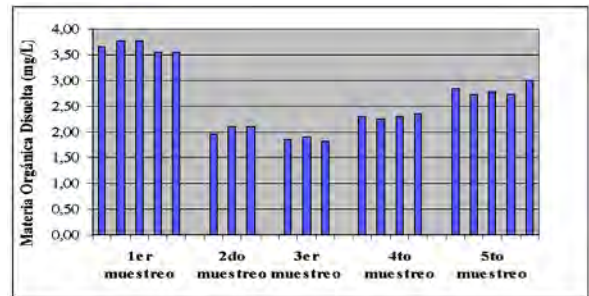
**Figura 13.** Gráfico con la totalidad de los datos de radiación PAR versus profundidad recabados en las 8 campañas ajustado con una exponencial con  $R^2=0,9354$ .

El resumen de las funciones de mejor ajuste de la radiación PAR versus profundidad de las 8 mediciones efectuadas en los dos sitios seleccionados se muestra en la Tabla 3.

Los cambios del valor del exponente se deberían a diferencias en el contenido de materia orgánica disuelta en las aguas en los diferentes muestreos con la que interactúa la radiación. La materia orgánica de las muestras de agua de distintas profundidades tomadas por muestreo a las que se le aplicó el test ANOVA presentó diferencia significativa ( $p<0,05$ ). (Montgomery 2005).

La Figura 14 es el desarrollo en gráfico de barras de los valores de la materia orgánica proveniente de muestras de agua de cinco campañas tomadas en varios niveles o profundidades, donde se visualiza la variación del parámetro en cada campaña como también con la profundidad.

La materia orgánica de las muestras de agua de



**Figura 14.** Materia orgánica disuelta de cinco muestreos y a varias profundidades.

distintas profundidades a las que se aplicó el test ANOVA tomadas por muestreo presentó diferencia significativa ( $p<0,05$ ). (Montgomery 2005).

### Análisis estadístico de la radiación PAR

#### Prueba de homogeneidad de varianzas

En la Tabla 4 se muestran los valores de la radiación PAR en el agua hasta la profundidad de 4,50 m de ocho campañas con distribución normal con el estadístico Kolmogorov-Smirnov en algunos niveles (1; 1,5; 2; 4,5 m) ( $p>0,05$ ), y en los restantes no (0; 0,5; 2,5; 3; 3,5; 4 m) ( $p<0,05$ ); y no homocedástico ( $p<0,05$ ) con el de Levene (Pérez 2004; Montgomery 2005) para los valores medidos desde la superficie, nivel 0, cada 0,50 m.

El test ANOVA arrojó diferencia significativa ( $p<0,05$ ) al ser aplicado a los valores de radiación PAR de ocho campañas tomados hasta los 4,50 m de profundidad. Promediando los valores de cada nivel de la radiación PAR de las ocho veces hasta

**Tabla 3.** Resumen de las funciones de ajuste de la radiación PAR versus profundidad.

Estación	Fechas	Función	R2
San Cosme	04-ene-2011	$y = 1613,4e^{-1,1704x}$	0,9967
	05-ene-2011	$y = 2019,4e^{-1,1967x}$	0,9912
	13-ene-2011	$y = 973,57e^{-0,9403x}$	0,9921
	20-ene-2011	$y = 707,73e^{-0,9625x}$	0,9805
Tacuary	22-ene-2011	$y = 1253,3e^{-1,1225x}$	0,9877
	26-ene-2011	$y = 3954,2e^{-1,0237x}$	0,8002
	15-feb-2011	$y = 1686,4e^{-0,8514x}$	0,9797
	10-mar-2011	$y = 354,37e^{-0,8777x}$	0,9883

**Tabla 4.** Datos de radiación PAR hasta 4,50 m de profundidad de ocho campañas.

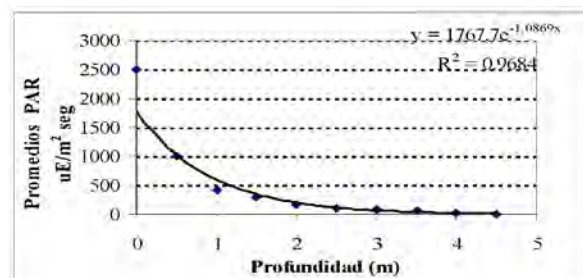
Prof.	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8
0,00	1670	1745	1779	1310	2200	8744	1830	700,62
0,50	970	846	777	218	713	2911	1404	259,03
1,00	460	583	440	190	320	599	584	124,40
1,50	300	583	236	200	195	423	390,4	76,00
2,00	154	166	130	130	114	347	251,2	45,20
2,50	84	94	74	53	71	331		32,31
3,00	40	54	44	43	36	336		21,43
3,50	27	30	30	25	23	295	108,1	13,30
4,00	14	18	18,5	17,8	14	32	71,3	9,27
4,50	10	11	12	8,6	8,5			6,03

la profundidad de 4,50 m y ajustando con una exponencial con  $R^2=0,9684$ , los resultados son los que se muestran en la Figura 15.

### Porcentaje de atenuación PAR

Se desarrolló el decaimiento de la luz a la profundidad  $z$ , calculado como  $100 \cdot I_z / I_0$ . Al máximo valor de superficie (nivel 0 cm) o muy próximo a ella le corresponde el 100% de la radiación incidente  $I_0$ , que decae exponencialmente con la profundidad, con el 1% de la radiación incidente en superficie generalmente a partir de los 4 m. Se determinó así el patrón de extinción de la luz a lo largo del perfil de profundidad que permitió conocer hasta qué profundidad la intensidad de luz es suficiente para sostener la actividad fotosintética, considerando a ésta como el 1% de la radiación en la superficie.

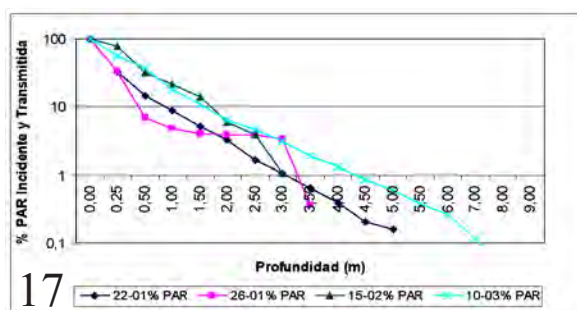
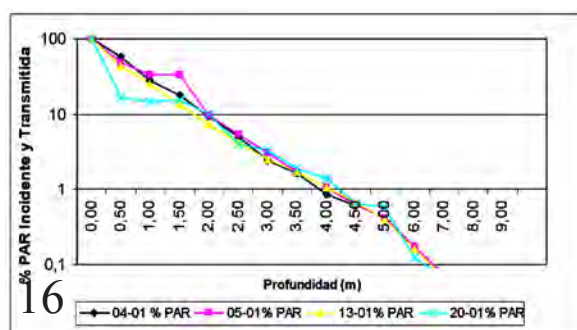
La Figura 16 y la Figura 17 corresponden a los



**Figura 15.** Promedios de la radiación PAR ajustados con una exponencial con  $R^2=0,9684$ .

gráficos de evolución de la radiación PAR expresados en % de la luz de superficie que se transmite en cada nivel, con los datos de todas las mediciones efectuadas de San Cosme y Tacuary respectivamente.

En función a los valores del % de la luz incidente y transmitida en cada nivel con los datos de San Cosme, las aguas del embalse tienen el 1% de



**Figura 16-17.** Radiación PAR en % de la luz transmitida. Mediciones de San Cosme (16) y Tacuary (17).

**Tabla 5.** Valores de la materia orgánica de la muestra inicial, agrupados por muestreo y profundidad.

Prof.	1 <sup>er</sup> muestreo	2 <sup>do</sup> muestreo	3 <sup>er</sup> muestreo	4 <sup>to</sup> muestreo	5 <sup>to</sup> muestreo
0,50	3,65	1,95	1,86	2,29	2,84
1,00	3,76	2,09	1,90	2,24	2,73
2,00	3,76	2,09	1,81	2,29	2,78
3,00	3,54			2,35	2,73
4,00	3,54				2,99

la luz de superficie alrededor de los 4 m de profundidad tomado como límite de la profundidad de la zona fótica alrededor de la cual es posible que se produzca fotosíntesis. Se ve uniformidad en la disminución en los % de la luz por cada nivel, alcanzando todas las veces el 1% del valor inicial a esa profundidad.

En el Tacuary se verificaron variaciones de la profundidad a la que se obtuvo el 1% de la luz de superficie. Se observó el 1% a los 3 m para el día 22 enero. El día 26 enero se tuvo un salto desde 3,37% a los 3 m a 0,37% a los 3,50 m. El día 15 febrero se tuvo nuevamente el valor referencial del 1% a los 3 m y en la última campaña del día 10 marzo se desplazó a los 4,50 m, sobrepasando esa vez la profundidad dada en San Cosme.

Las funciones de mejor ajuste del logaritmo de la radiación PAR *versus* profundidad en todos los casos se dio a través de una exponencial en donde el valor del exponente se corresponde con el coeficiente de extinción *kz*, cuyas variaciones estuvieron oscilando entre 0,51 y 0,62 para la radiación PAR, lo que es atribuible a las variaciones de materia orgánica.

Los cambios en el valor del exponente se deberían a diferencias en el contenido de materia orgánica disuelta con la que interactúa la radiación en las aguas en los diferentes muestreos.

### Materia Orgánica

Las mediciones de materia orgánica disuelta se realizaron en el laboratorio como oxígeno consumido por el método del permanganato en cinco oportunidades; una vez con muestras de San Cosme y otras cuatro con muestras provenientes del Tacuary. Los análisis químicos se efectuaron sobre una muestra cruda que denominamos inicial y sobre otras dos provenientes del incubado de la productividad primaria de los frascos claro y oscuro de distintos niveles o profundidades.

En la Tabla 5 se dan los valores de las determinaciones de la materia orgánica en la muestra inicial, agrupados por muestreo y profundidad, para cinco muestreos. El primero pertenece a San Cosme y los cuatro restantes al Tacuary. En la Tabla 6 se da el resumen de la estadística básica descriptiva de la materia orgánica por nivel o profundidad.

En la Tabla 7, el estadístico Levene para la

**Tabla 6.** Estadística descriptiva de la materia orgánica tomada por nivel o profundidad.

mt.	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
0,50	4	2,235000	0,4438093	0,2219046	1,528800	2,941200	1,8600	2,8400
1,00	4	2,240000	0,3550587	0,1775293	1,675022	2,804978	1,9000	2,7300
2,00	4	2,242500	0,4088500	0,2044250	1,591928	2,893072	1,8100	2,7800
3,00	2	2,540000	0,2687006	0,1900000	0,125821	4,954179	2,3500	2,7300
4,00	1	2,990000					2,9900	2,9900
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>2,329333</b>	<b>0,3933095</b>	<b>0,1015521</b>	<b>2,111526</b>	<b>2,547141</b>	<b>1,8100</b>	<b>2,9900</b>

**Tabla 7.** Estadístico Levene para la prueba de homogeneidad de varianzas confirma la Homocedasticidad de la muestra tomando todos los valores con ( $p > 0,05$ ).

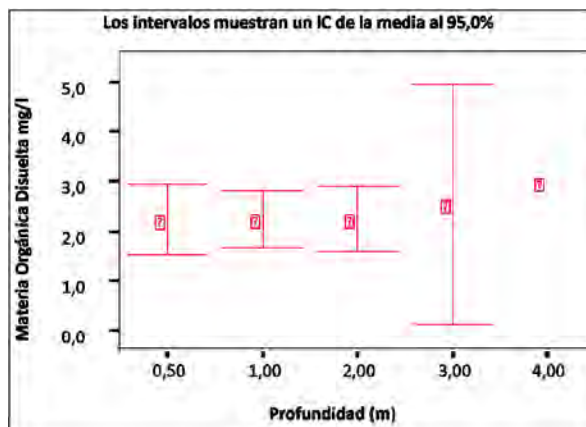
Estadístico de Levene	Grados de libertad 1	Grados de libertad 2	Significación
0,231(a)	3	10	0,873

prueba de homogeneidad de varianzas confirma la homocedasticidad de la muestra por niveles o profundidad tomando todos los valores con ( $p > 0,05$ ), por lo que es apropiado la aplicación de ANOVA.

En la Tabla 8, la inferencia no arroja diferencia significativa para la materia orgánica promedio tomado por nivel o profundidad hasta los 2 m ( $p > 0,05$ ).

La Figura 18 contiene los intervalos de confianza de la materia orgánica promedio por profundidad para la media a un nivel de confianza del 95%, y la cantidad de observaciones en cada nivel o profundidad. Las variaciones en cuanto a los niveles de profundidad son similares hasta los 2 m, presentando una mayor amplitud a los 3 m. El estadístico ha rechazado la muestra de la profundidad cuatro por insuficiencia de datos.

En la Tabla 9 se da el resumen de la estadística básica descriptiva de la materia orgánica para



**Figura 18.** Gráfico de los intervalos de confianza de la materia orgánica promedio por profundidad para la media a un nivel de confianza del 95%, y la cantidad de observaciones en cada nivel o profundidad.

todos los valores tomados por campaña o días de muestreo. El estadístico de Levene, Tabla 10, nos confirma la homocedasticidad de la muestra de materia orgánica tomando los valores por campaña ( $p > 0,05$ ). El ANOVA correspondiente a los promedios de la materia orgánica por campaña se visualiza en la Tabla 11. Se observa diferencia significativa ( $p < 0,05$ ).

La Figura 19 muestra los intervalos de confian-

**Tabla 8.** La inferencia no arroja diferencia significativa para la materia orgánica en promedio con todos los valores tomados por nivel o profundidad hasta los 2 m ( $p > 0,05$ ).

	Suma de cuadrados	Grado de libertad 1	Media cuadrática	F	Significación
<b>Inter-grupos</b>	0,623	4	0,156	1,009	0,447
<b>Intra-grupos</b>	1,543	10	0,154		
<b>Total</b>	2,166	14			

**Tabla 9.** Resumen de la estadística básica descriptiva de la materia orgánica para todos los valores tomados por campaña o días de muestreo.

	N	Media	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
1	3	2,046800	0,0824456	0,0476000	1,841994	2,251606	1,9516	2,0944
2	3	1,856400	0,0476000	0,0274819	1,738155	1,974645	1,8088	1,9040
3	4	2,295225	0,0454500	0,0227250	2,222904	2,367546	2,2422	2,3533
4	5	2,814000	0,1088663	0,0486865	2,678825	2,949175	2,7300	2,9925
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>2,330700</b>	<b>0,3929139</b>	<b>0,1014499</b>	<b>2,113112</b>	<b>2,548288</b>	<b>1,8088</b>	<b>2,9925</b>

**Tabla 10.** Prueba de homogeneidad de varianzas Levene confirma la homocedasticidad de la muestra de materia orgánica tomando los valores por campaña ( $p > 0,05$ ).

Estadístico de Levene	Grados de libertad 1	Grados de libertad 2	Significación
1,296	3	11	0,324

za al 95% para la media de la materia orgánica por campaña a varias profundidades de los cuatro muestreos realizados en el Tacuary, excluyendo el primer muestreo realizado en San Cosme, con un nivel de confianza del 95%; además de la media y de la cantidad de observaciones en cada nivel o profundidad.

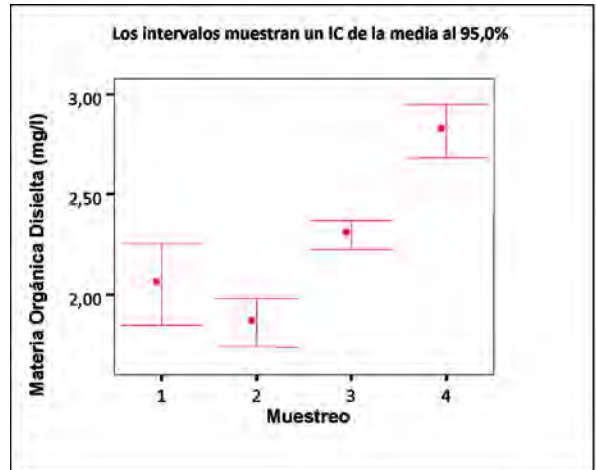
Se ha trabajado además con las muestras provenientes de los frascos incubados claros y oscuros, comparándolos con la muestra cruda denominada inicial de manera a evaluar los posibles cambios de la materia orgánica en aquellos frascos claros que fueron sometidos a la radiación solar bajo el agua y los oscuros a los que no les llegó la luz. En general, no se ha observado diferencia significativa entre la materia orgánica proveniente de la muestra incubada en los frascos claros y oscuros. Sería conveniente, para ahondar en esta línea de investigación, prolongar el tiempo de exposición a la luz e implementar otra técnica de análisis de la materia orgánica disuelta, como ser el carbono orgánico total (COT).

## CONCLUSIÓN

En el estudio de las radiaciones solares y la calidad química del agua efectuado en aguas del embalse de Yacyretá entre los meses de enero y marzo del 2011 se ha verificado el comportamiento de las radiaciones en el rango UV-B y de fotosíntesis PAR

**Tabla 11.** Análisis de Varianza para la muestra inicial de materia orgánica promedio por muestreo de los cuatro días del Tacuary. Presentó diferencia significativa con ( $p < 0,05$ ), excluyendo el primer muestreo de San Cosme.

	Suma de cuadrados	Grado de libertad 1	Media cuadrática	F	Significación
<b>Inter-grupos</b>	2,090	3	0,697	106,815	0,000
<b>Intra-grupos</b>	0,072	11	0,007		
<b>Total</b>	2,161	14			



**Figura 19.** Intervalos de confianza al 95 % para la media de la materia orgánica por muestreo de varias profundidades de los cuatro muestreos realizados en el Tacuary.

en los siguientes aspectos principales:

- La radiación UV-B en unidades Watt/m<sup>2</sup>, medida con el sensor Solar Light provisto de cable para mediciones en profundidad, verificó muy poca penetración en el seno de la masa de agua. Decreció y se extinguió a los pocos centímetros de la superficie, presentando mucha dificultad en las lecturas por ser muy sensible aún a las pequeñas ondulaciones o crestas de olas producidas por el viento. No penetró la mayoría de las veces más de 30 cm.
- El ajuste de la curva del Ln de la radiación UV-B con la profundidad se efectuó con una función exponencial con  $R^2 = 0,9295$ . El intervalo de confianza del (95%), sugiere que estos valores se hallan dentro del intervalo de predicción.
- La radiación UV-B ha adquirido a los 5 cm

casi la 1/5 parte de su valor inicial de superficie, decayendo en una oportunidad desde 1,51 Watt m<sup>-2</sup> como primer valor por debajo de la superficie en el nivel 0 hasta 0,369 Watt m<sup>-2</sup> a los 5 cm

- Los valores de la radiación de fotosíntesis PAR en todos los casos dieron una muy buena correlación con la profundidad al ser ajustados siempre con una función exponencial, con  $R^2 = 0,98$  y  $R^2 = 0,99$  penetrando hasta los 9 y 10 m de profundidad
- En general las mediciones de radiación PAR alcanzaron mucha mayor profundidad hasta los 9 y 10 m. En el Tacuary existía el temor al enganche del sensor por la inmensa cantidad de raigones sumergidos
- La variación del valor del exponente en las curvas de ajuste logaritmo natural de la radiación PAR se correlaciona con cambios en el contenido de materia orgánica disuelta en las aguas. Las muestras de agua con contenido de materia orgánica proveniente de distintas profundidades, a las que se le aplicó el test ANOVA tomadas por muestreo presentaron diferencia significativa  $p < 0,05$ . Esto sugiere que el contenido de materia orgánica disuelta hace variar dicho coeficiente.
- Los valores de la radiación PAR medida hasta la profundidad de 4,50 m en ocho campañas no presentaron distribución normal con el estadístico Kolmogorov-Smirnov (KS)  $< 0,05$  y es no homocedástico con el estadístico de Levene,  $< 0,05$ . El test ANOVA arrojó diferencia significativa,  $p < 0,05$ .
- Los valores promedio de cada nivel de las ocho mediciones de la radiación PAR hasta la profundidad de 4,50 m presentan en su evolución una curva de tendencia al ajustar con una exponencial con  $R^2 = 0,9684$ .
- La curva de atenuación vertical de la luz, calculada con los valores de radiación incidente en superficie y los valores a las distintas profundidades, decayó exponencialmente con la profundidad obteniéndose el 1% de la radiación incidente en superficie generalmente a

partir de los 4 m. Fue posible de esta manera determinar el patrón de extinción de la luz a lo largo del perfil y conocer hasta qué profundidad la intensidad de luz es suficiente para sostener la actividad fotosintética, considerando ésta como el 1% de la radiación en la superficie.

- Se comprobó mayor uniformidad en la disminución de los % de la luz por cada nivel en las aguas de San Cosme, alcanzando todas las veces el 1% del valor inicial a los 4 m; no obstante, en el Tacuary se superó dicha profundidad en una oportunidad.
- Es notoria la gran dispersión de los valores de la materia orgánica recabados en las cinco oportunidades en que se midió esta variable. El estadístico aplicado ANOVA reveló diferencia significativa por campaña, con  $p < 0,05$ ; aunque en los niveles no arrojó diferencia estadística hasta los 3 m.

## BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters, 21st Edition. Centennial Edition. APHA, American Water Works Association, Water Environmental Federation, Washington, DC.
- CECERI L.S., GREENBERG A.E., EATON A.D. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, Baltimore. <http://www.turevista.uat.edu.mx/ANO%206%20NUMERO%2023/laguna-ref.htm>
- BAIRD, C. Química Ambiental. Editorial Reverte, 2ª Edición. 2001. ISBN: 84-291-7902-X
- CALVERT, J.G.; PITTS, J.N.; J. WILEY. 1966. Photochemistry.
- COLE, G. A. Manual de Limnología, Hemisferio Sur, 3ª Edición. 1988.
- FIGUERELO, J.E., DÁVILA, M.M. 2004. Química Física del Ambiente y de los Procesos Ambientales. Editorial Reverte. España.
- IDEAM. <http://jrubiano.pbworks.com/f/>

- RADIACION SOLAR-IDEAM. pdf
- MONTGOMERY, D. 2005. Diseño y Análisis de Experimentos. México: Editorial Limusa. Capítulo. 3, p. 76-83: Experimentos con un solo factor: el análisis de varianza.
- PEREZ, C. L. 2004. Técnicas de Análisis Multivariante de Datos. Ediciones Pearson Prentice Hall. Madrid. Capítulo. 2, p. 55-65: Primeros pasos en el análisis multivariante. Análisis exploratorio de datos.
- RECHE, I., 2003. Sensibilidad de los ecosistemas acuáticos a la radiación ultravioleta: el papel de la materia orgánica disuelta. En: Ecosistemas, Año XII, N° 1, 2003. revistaecosistema@ua.es; <http://redalyc.uaemex.mx>
- RECHE, I.; PACE, M. L. 2002. Linking dynamic of dissolved organic carbon in forested lake with environmental factors. Biogeochemistry 61: 21-36. En: Ecosistemas. Año XII, N° 1, 2003, Enero-Abril. revistaecosistema@ua.es; <http://redalyc.uaemex.mx>
- RECHE, I.; PACE, M. L.; COLE, J.J., 1998. Interactions of photobleaching and inorganic nutrients in determining bacterial growth on colored dissolved organic carbon. Microbial Ecology 36: 270-280. En: Ecosistemas. Año XII, N° 1, 2003, Enero-Abril revistaecosistema@ua.es; <http://redalyc.uaemex.mx>
- Sensibilidad de los ecosistemas acuáticos a la radiación ultravioleta: el papel de la materia orgánica disuelta Ecosistemas, Año XII, N° 1/ 2003, Enero-Abril). En: Asociación Española de Ecología Terrestre. revistaecosistema@ua.es; <http://redalyc.uaemex.mx>.
- RIGHINI, R.; GROSSI G. 2004. Análisis de la Correlación Entre la Radiación Fotosintéticamente Activa y la Radiación Global Total en San Miguel Provincia de Buenos Aires. En: Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente, ASADES, 9: 2005.
- WETZEL, R.G. 1981. Limnología. Ediciones Omega, Barcelona, 679 p.
- ZAGARESE, H.; CRAVERO, W.; VILLAFANE, V.; HELBLING, W. 1998. Radiación Ultra Violeta y Sistemas Acuáticos. Ciencia Hoy. Volumen 8: N° 45
- ZAGAREZE, H. 1990. Radiación Ultravioleta y Ozono Estratosférico. En: Ciencia HOY, 9: 40-48, 1990.