

XIX Congreso Nacional del Agua, Agosto 2002, Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina

## **EVALUACIÓN DE LA CARGA INTERNA DE FÓSFORO EN EL EMBALSE SAN ROQUE (CÓRDOBA) RELACIONADA A SU PROBLEMÁTICA DE EUTROFICACIÓN.**

**Granero M<sup>1</sup>, Bustamante MA<sup>1</sup>, Rodríguez MI<sup>1</sup>, Morillo S<sup>1</sup>, Ruiz M<sup>1</sup>, López F<sup>1</sup>, Busso F<sup>2</sup> y Bonfanti E<sup>2</sup>.**

1 Instituto Nacional del Agua. Centro de la Región Semi Árida. (CIRSA) Córdoba  
Av. Ambrosio Olmos 1142. (5000) Córdoba. Argentina. Tel: 54-351-4682781 Fax: 54-351-4682782  
e mail: mickygranero@hotmail.com  
2 Aguas Cordobesas S.A (AACC)

### **RESUMEN**

El embalse San Roque representa la fuente de provisión de agua potable para la segunda ciudad más numerosa del país, abasteciendo a más de un millón de personas (Córdoba Capital y alrededores). Los problemas relacionados a la calidad del recurso han ido aumentando con el paso del tiempo principalmente por factores antropogénicos que afectan tanto a la cuenca de drenaje como al cuerpo mismo de agua (deforestación, drenaje urbano y particularmente el volcamiento de líquidos cloacales). Actualmente, el embalse es receptor de elevadas concentraciones de nutrientes y consecuentemente, suceden floraciones algales. No sólo la biomasa de algas, sino también las diferentes especies que prosperan en el embalse producen serios inconvenientes en la cadena de tratamiento en las plantas potabilizadoras. A raíz de que el embalse se estratifica térmicamente durante el período estival, la termoclina impide la adecuada mezcla de la columna de agua promoviendo el rápido consumo de oxígeno disuelto en capas profundas llegando a valores nulos en pocos días. El volumen de hipolimnion anóxico genera el cambio de potencial redox en la superficie del sedimento. La repentina condición reductora del sapropelo induce la liberación de ciertos iones como el manganeso y el hierro, y de nutrientes como el fósforo. Catalizan este proceso iones bivalentes como el calcio y el magnesio que presentan fluctuaciones estacionales manifestando su relación al metabolismo regulador de la condición trófica del embalse. Al considerarse el P como agente limitante del desarrollo biológico en las aguas, es de relevancia estimar la carga de P contenido en los sedimentos ya que aumenta su biodisponibilidad por autorregulación durante los meses de verano. Dicha carga es suficiente para sustentar una gran biomasa y mantener la condición eutrófica del lago durante todo el año. El presente trabajo muestra los resultados de 44 campañas realizadas entre los años 1999 y 2001 dentro del marco de monitoreo sistemático que CIRSA y AACC llevan a cabo en el embalse. Determinaciones in situ de temperatura, pH y oxígeno disuelto fueron tomadas en el hipolimnion al tiempo que se extrajeron muestras tanto de agua como de sedimento, analizando iones y fracciones de P. Además se realizaron experimentos de laboratorio para estimar coeficientes de liberación de P por parte del sedimento. Los resultados manifiestan la magnitud de la carga interna de P del embalse San Roque y su relación con el metabolismo iónico, indispensables en el equilibrio químico de la interfase agua-sedimento.

Palabras claves: hipolimnion – anoxia – fósforo

## INTRODUCCION

La construcción del Embalse San Roque en una zona semi-árida donde el recurso hídrico es limitado, no sólo resulta de suma relevancia para la provisión de agua para potabilizar a una importante población como lo es Córdoba y sus alrededores, retención de las crecientes y del nivel de agua de los tributarios, la generación de energía hidroeléctrica, sino que adicionalmente lleva al desarrollo de asentamientos urbanos en la zona, traduciéndose en un marcado crecimiento de la actividad turística y en el aprovechamiento del cuerpo de agua como espejo de uso recreativo. Debido tanto a actividades en su cuenca de aporte como a la ausencia de una adecuada infraestructura de saneamiento de la ciudades de su perilago, el embalse San Roque se encuentra en un avanzado estado de eutrofización que compromete el uso del recurso para los fines originalmente diseñados (Granero, 2000). Tanto la carga externa de nutrientes proveniente de los tributarios como la carga aportada por los sedimentos, favorecen el sustento de una considerable biomasa la cual deriva en indeseables floraciones algales. Los eventos de floraciones son más frecuentes durante la época estival, pero en los últimos años los efectos desfavorables de la muerte masiva de fitoplancton se observan en cualquier época del año incluso durante la estación fría.

La radiación solar intensa promueve la estratificación de la columna de agua y en consecuencia, a la formación de una termoclina estable. Esta condición implica la resistencia al mezclado vertical de las capas superiores con las inferiores, ricas en concentración de nutrientes. El primer parámetro afectado en este proceso es el oxígeno disuelto (OD). Este disminuye a raíz del consumo realizado por macro y microorganismos. El descenso paulatino de OD genera una serie de situaciones que modifican la calidad del agua del hipolimnion, afectando adicionalmente las primeras capas del sedimento. Parámetros como el pH, el potencial redox y algunos iones como el manganeso, el hierro, el calcio y el magnesio, modifican su comportamiento poniendo se manifiesto su clara intervención en el metabolismo del nutriente que en el embalse limita el crecimiento del fitoplancton, el fósforo. El objetivo entonces del presente trabajo es establecer y explicar las relaciones entre las variables antes mencionadas y el mecanismo por el cual el fósforo del sedimento representa la mayor carga potencial en el embalse.

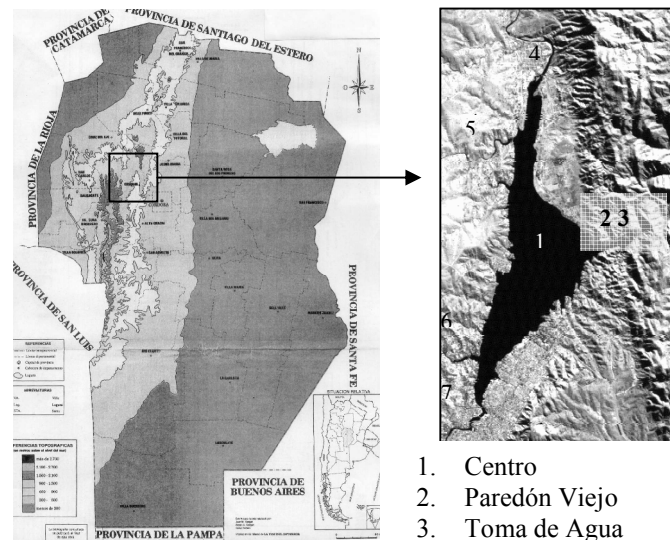
## AREA DE ESTUDIO

El Embalse San Roque (31° 22' S y 64° 27' O) se localiza en el Valle de Punilla a 600 m sobre el nivel del mar, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas en la Provincia de Córdoba. Es un cuerpo de agua de tipo artificial y fue erigido en 1888. A raíz de temores vinculados con la estabilidad de este primer muro, en 1944 se construyó la presa actual de Hormigón y tipo Gravedad, planta curva. El viejo paredón se dinamitó, sin éxito, por lo que hoy en día y en época de estiaje puede percibirse el coronamiento del antiguo cierre. A nivel de cota de vertedero, la superficie del espejo de agua es de 16 Km<sup>2</sup>, contiene un volumen de 190 Hm<sup>3</sup> y una profundidad media de 13 m. La cuenca de drenaje está formada por las subcuencas del Río San Antonio de 500 km<sup>2</sup>, el Río Cosquín de 820 km<sup>2</sup>, el Arroyo Las Mojarras de 85 km<sup>2</sup> y el Arroyo Los Chorrillos de 160 km<sup>2</sup>, siendo su único efluente el Río Suquía. Desde el punto de vista hidrológico, se observa a nivel anual una alternancia de años muy húmedos (con precipitaciones anuales superiores a 1000 mm) con otros secos que apenas superan los 400mm. La precipitación media anual resulta de 780 mm y el 85 % de las mismas se producen en verano. La humedad relativa media es del 65%. Bajo el dominio de un clima templado, la temperatura media anual es de 14°C y los vientos predominantes son del cuadrante sur y norte, pero están sujetos a las variaciones propias de la morfología del relieve. Desde un punto de vista geológico, la cuenca está constituida por un basamento cristalino antiguo

metamórfico-plutónico. Las rocas ígneas que lo componen están representadas por una intrusión granítica regional y las metamórficas por un complejo en el que la roca netamente dominante es un gneis (Barbeito, 1997).

## METODOLOGÍA

El plan de monitoreo consistió en campañas de mediciones *in situ* con toma de muestras tanto de agua como de sedimentos. Se seleccionaron tres estaciones dentro del embalse en base a la morfología y la hidrodinámica del cuerpo de agua. Denominadas Centro, Paredón Viejo y Toma de Agua (1, 3 y 2 respectivamente en figura 1), estas estaciones se ubican en zonas profundas y a su vez son las más afectadas por las corrientes internas propias del embalse. La estación Centro fue seleccionada por su representatividad del reservorio. El Paredón Viejo actúa como vertedero sumergido reteniendo sedimentos y esto constituye una característica hidráulica de importancia. Esta estructura impide la adecuada renovación de las aguas, en el punto donde se encuentra la estación de la Toma de Agua que abastece a las plantas potabilizadoras de la ciudad de Córdoba.



Tributarios: 4. Río Cosquín, 5. Arroyo Las Mojarras,  
6. Arroyo Los Chorrillos, 7. Río San Antonio

Figura 1. Localización de Estaciones de monitoreo y Tributarios

Las campañas de muestreo de agua del hipolimnion se realizaron con una frecuencia semanal desde fines de 1999 hasta Marzo de 2000. Luego los monitoreos se efectuaron cada quince días hasta fines del año 2000. Durante el 2001 la periodicidad de campañas se realizó mensualmente. Las muestras de agua se extrajeron con un muestreador tipo Van Dorn y los sedimentos se tomaron una vez al mes durante todo el período de estudio con draga tipo Eckman. Los parámetros medidos *in situ* en la columna de agua fueron determinados con sondas multiparamétricas marca Horiba, modelos U-10 y U-23, registrándose valores de temperatura ( $T$  en  $^{\circ}\text{C}$ ), pH (unidades de pH), oxígeno disuelto (OD en  $\text{mg L}^{-1}$ ) y potencial redox (ORP en mv). En laboratorio se determinaron las siguientes variables en agua siguiendo la metodología propuesta por APHA (1992): fósforo total ( $\text{PT}_w$  en  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por el método de digestión, fósforo reactivo soluble ( $\text{PRS}_w$  en  $\mu\text{g L}^{-1}$ ) por el método del ácido ascórbico, hierro total ( $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ) y manganeso ( $\text{Mn}^{2+}$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ) por absorción atómica de llama, calcio ( $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$  en  $\text{mg L}^{-1}$ ) por cromatografía iónica. En

sedimentos se determinó el contenido de fósforo total ( $PT_s$  en  $\mu g\ g^{-1}$ ) por el método de ignición e hidrólisis y posterior determinación con ácido ascórbico. Los experimentos para la determinación de los coeficientes de liberación se realizaron según la metodología propuesta por Nagy (1987).

## RESULTADOS

El embalse sobrelleva una estratificación térmica anual que se inicia a mediados de la primavera, se extiende durante el período estival y culmina apenas empezado el otoño. Durante el resto del año, la columna de agua permanece mezclada. Más específicamente en el hipolimnion, la figura 2 muestra la variación estacional de la T, pH y OD en dicho estrato durante los tres años de estudio, en las tres estaciones monitoreadas. Nótese la relación entre los parámetros, cuando la temperatura del hipolimnion aumenta, el pH tiende a disminuir, creando el ambiente propicio para la liberación de elementos químicos desde el sedimento. A su vez, el OD también disminuye, llegando a

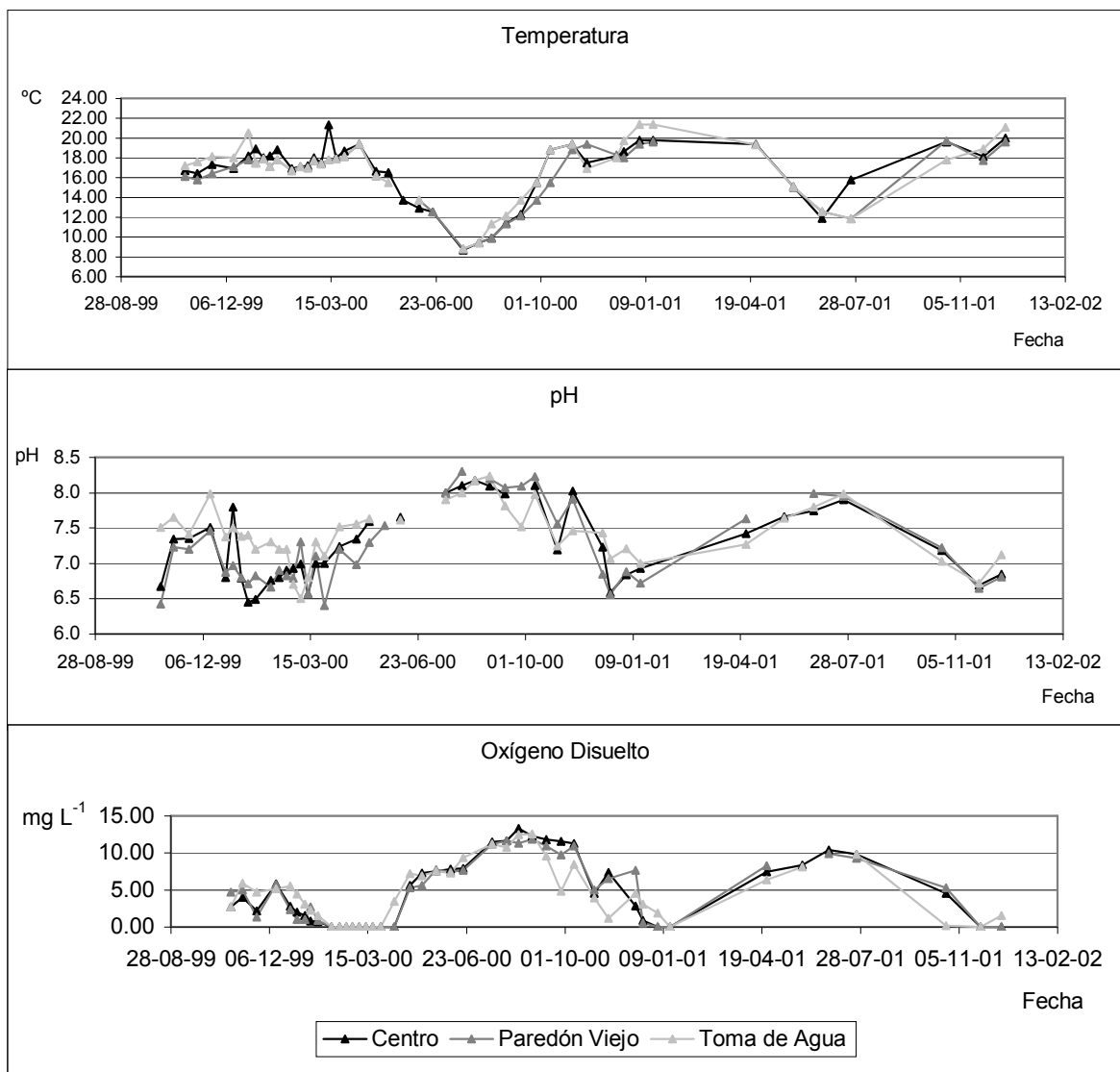
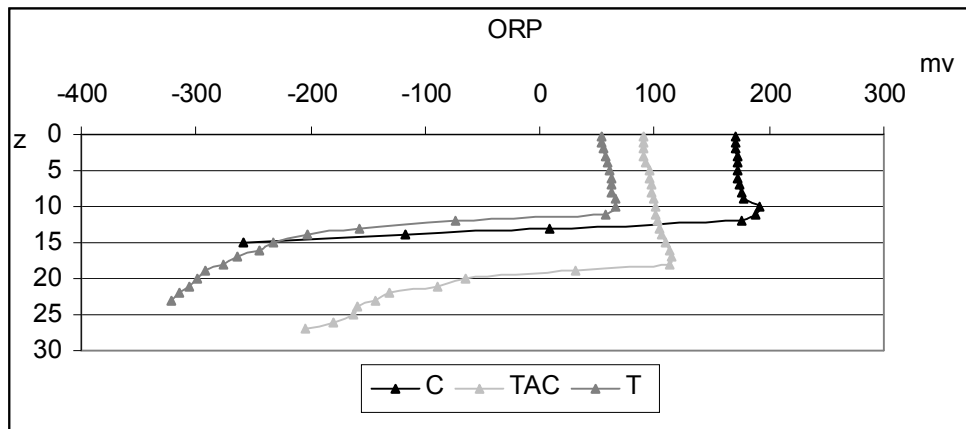


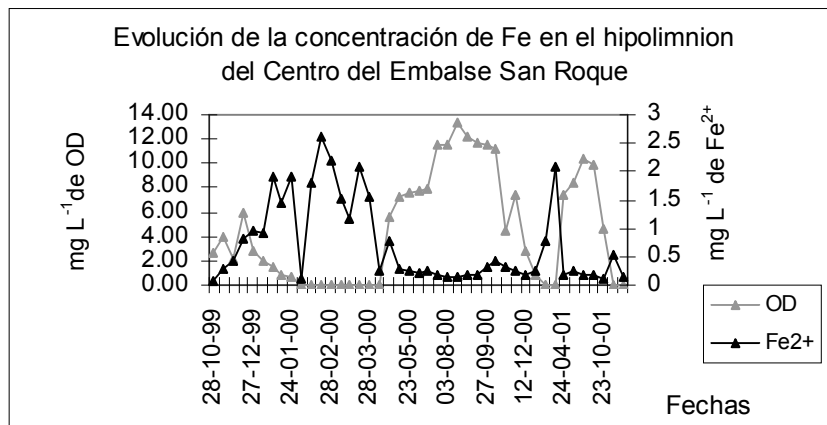
Figura 2. Variación estacional de T, pH y OD en el Embalse San Roque

valores nulos, originando volúmenes anóxicos que inducen el cambio de potencial redox (Figura 3), que también condiciona la dinámica en la interfase agua-sedimento. Estas tendencias se ponen de manifiesto en las tres estaciones, durante el período estudiado. La temperatura en todas las estaciones presenta un comportamiento similar durante 1999 y 2000. Sin embargo, se manifiestan

valores mayores durante el invierno de 2001, debido a las altas temperaturas atmosféricas registradas durante la estación fría.



La variación de ORP responde directamente a la falta de oxígeno, convirtiéndose en carácter reductor ante valores nulos de OD. Es por esta razón que los enlaces químicos de ciertos compuestos del sedimento se ven afectados, tornándose inestables y precediendo su liberación. Responden a este comportamiento iones como el  $Mn^{2+}$  y el  $Fe^{2+}$  cuya dinámica se demuestra en la figura 4. Debido a que las tres estaciones muestran una conducta similar, se presenta sólo la de la estación del centro, como representativa del embalse en general.



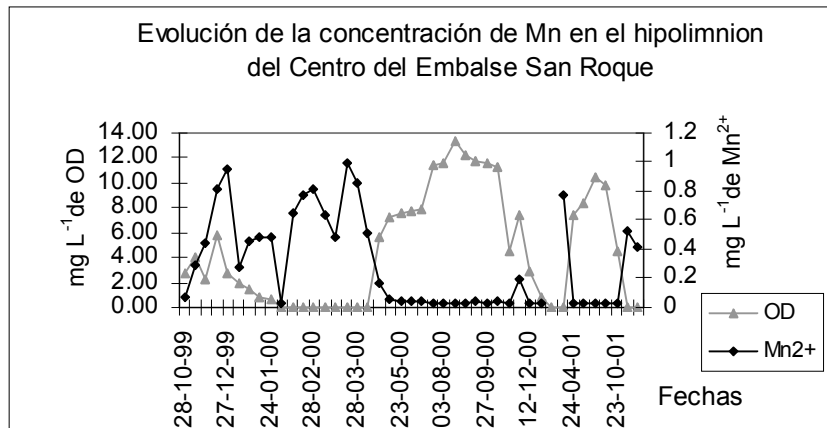


Figura 4. Variación temporal de  $Fe^{2+}$  y  $Mn^{2+}$  en el Embalse San Roque

Las fluctuaciones de los iones  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en las tres estaciones durante el año 2000 fueron dentro del rango de 7.5 a 24.6  $mg L^{-1}$  de  $Ca^{2+}$  y de 1.2 a 6.9  $mg L^{-1}$  de  $Mg^{2+}$ , como lo muestra la figura 5, notándose un incremento paulatino del  $Mg^{2+}$  a medida que avanza el proceso de estratificación, es decir, que el agua contiene más sales de  $Mg^{2+}$  disueltas a medida que aumenta la temperatura.

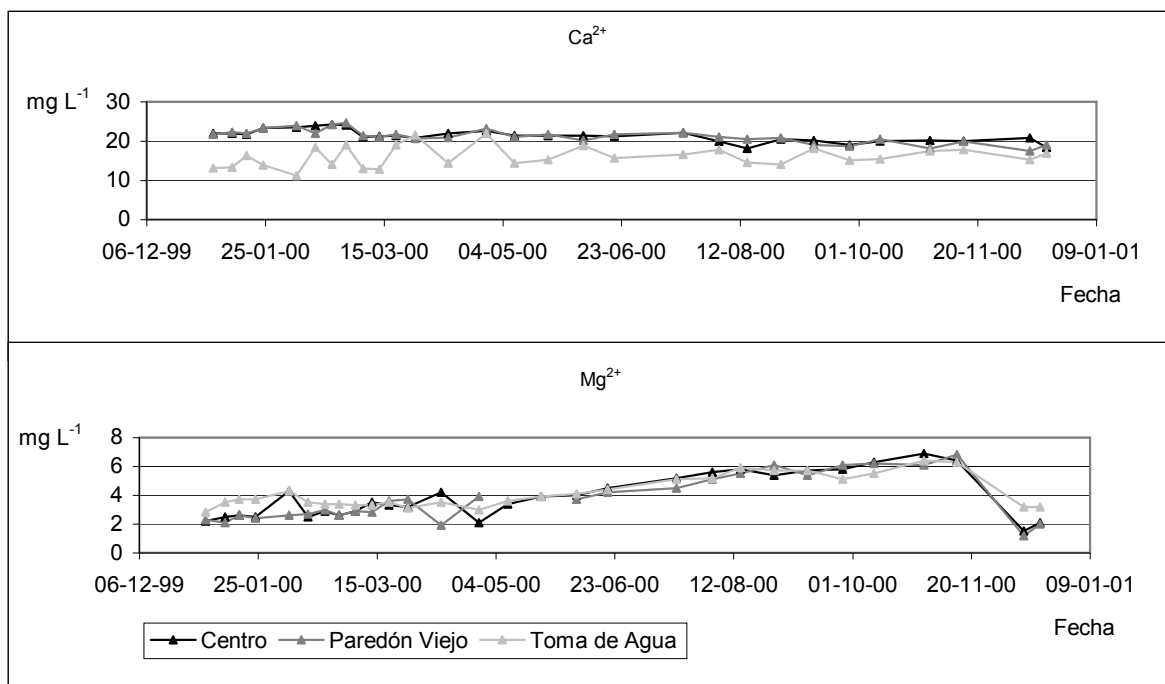


Figura 5. Variación estacional de iones  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  en el Embalse San Roque

Todos los parámetros mencionados anteriormente integran el grupo de factores influyentes en la liberación desde los sedimentos del nutriente limitante del embalse San Roque, el P. La estimación de la carga interna de P es de vital importancia debido a la magnitud que constituye el aporte de P desde los sedimentos durante la época estival que contribuiría con el sustento de la abundante biomasa observada durante el resto del año. Existen muchas variables físicas (como la morfología del relieve), químicas (como constantes de precipitación) y biológicas (como la presencia de algas y bacterias que intervienen en los procesos) que hacen que el cálculo de este porcentaje de P no sea tan sencillo de estimar. Existen varios métodos para la estimación de la carga interna de P. Entre ellos la utilizada por Juracek (1998) que sostiene que la masa total de P de los sedimentos (P total

en peso de sedimento seco) es aproximadamente igual a la masa de sedimento por la concentración media de P en el sedimento; otra forma consiste en utilizar los datos suficientemente representativos para determinar coeficientes de liberación; es válido también utilizar un simple cálculo de balance de masa para estimar el coeficiente total de liberación o aplicar herramientas estadísticas (Kao, 1998). La metodología seleccionada en este estudio es la utilizada por Jorgensen (1980) que propone utilizar los coeficientes de liberación del P intercambiable (medido como PRS en el agua intersticial) que se encuentra localizado en los primeros 5 cm de la columna del sedimento. La figura 6 muestra los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio en donde se ve la clara influencia del pH, la T y el OD en la resorción de P. Cuando el OD tiende a valores nulos, los coeficientes aumentan condicionados también por la temperatura, al aumentar la energía calórica, se produce mayor liberación. Esto equivale a un coeficiente máximo de 1.33 mg PRS/ m<sup>2</sup>/día a una temperatura de 18 grados y valor de OD de cero, con pH entre 6 y 7, condiciones que frecuentemente se observan en el hipolimnion del Embalse San Roque cada verano. La figura 7 manifiesta los valores medios de PT medidos en los sedimentos de las tres estaciones. Las estaciones del centro y paredón viejo, manifiestan mayor cantidad de PT comparada a la de la toma de agua, estación protegida de las corrientes internas propias del embalse por la estructura sumergida del paredón viejo.

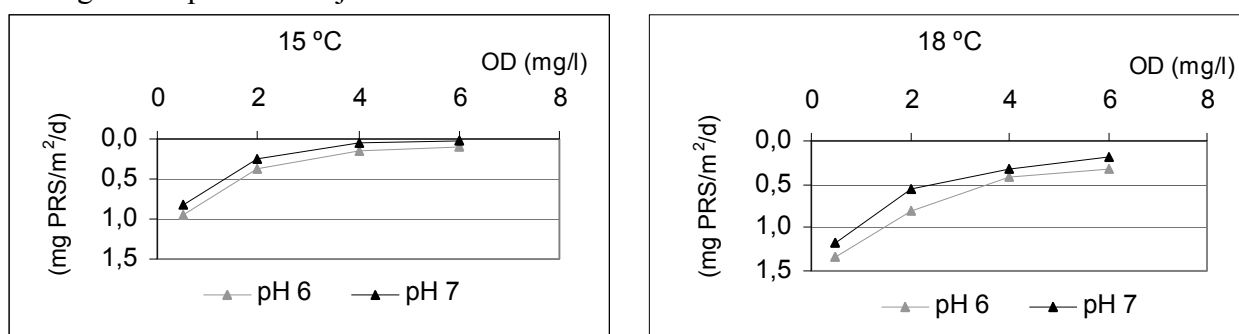


Figura 6. Coeficientes de liberación de P intercambiable en el laboratorio

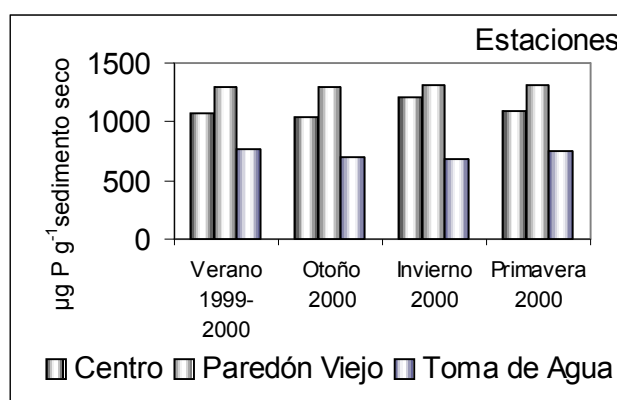


Figura 7. Variación estacional del contenido de P en los sedimentos del Embalse San Roque

La estación de la toma de agua registra un contenido de P medio anual de 722 µg P g<sup>-1</sup> de sedimento seco, en tanto que en el centro y el paredón viejo se midieron manifiestan 1076 y 1342 µg P g<sup>-1</sup> de sedimento seco respectivamente.

## CONCLUSIONES

El embalse San Roque presenta un estado eutrófico desde hace varios años debido a la elevada carga de nutrientes que recibe tanto de origen externo (desde la cuenca y a través de sus tributarios) como de origen interno (sedimentos).

Debido a su régimen monomíctico el cual se manifiesta con un período de estratificación al año, el hipolimnion se vuelve anóxico. Como consecuencia de este fenómeno, variables como el pH y el potencial redox disminuyen significativamente.

Iones como el  $Mn^{2+}$  y el  $Fe^{2+}$  y en menor grado, el  $Ca^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  se liberan desde el sedimento cumpliendo un papel fundamental en la liberación de PRS, indispensable para sustentar la vida del fitoplancton.

Los coeficientes de liberación P estimados alcanzan hasta 1.33 mg PRS/ m<sup>2</sup>/día, lo que demuestran un elevada actividad en el sapropelo durante el verano.

## BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA, WPCF** (1992). *Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residuales*. Ediciones Diaz de Santos, Madrid España
- Barbeito, O. & Ambrosino, S.** (1997). "Estudio: Aspectos hidrogeomorfológicos de base para la evaluación de la amenaza por inundaciones repentinas en Cuenca Alta del Río Suquia". Proyecto CONICOR: Prevención de daños por crecientes en Áreas Serranas.
- Granero M, Bustamante M.A, López F, Ruibal AL, Berra C** (2000). "Impacto del Antiguo Muro del Embalse San Roque (Córdoba, Argentina) en la Calidad del Agua en la Toma" Presentado y expuesto en el Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 22 al 27 de Octubre de 2000, Córdoba, Argentina
- Jacoby L.M, Lynch D.D, Welch E.B and Perkins M.A** (1999) *Phosphorus Loading in a Shallow Eutrophic Lake*. Water Resources Vol 16, pp.911- 919, Inglaterra
- Jorgensen S. E** (1980) *Lake Management* vol 14, Pergamon Press, Denmark
- Juracek, K.E** (1998) "Analysis of Lake-Bottom Sediment to Estimate Historical Nonpoint-source" Phosphorus Load Journal of the American Water Resources Association, Vol. 34, N°6, p 1449-1463, USA
- Kao, JJ.** (1998) "Dynamical Spatial Modeling approach for estimation of internal phosphorus load", Water research, Vol 32, N 1, pp 47-56, Gran Bretania
- Nagy P.** (1987) "The Role of sediments as a source of phosphorus: laboratory experiments". En publicación de Water Quality Monitoring: Lake Burley Griffin and Lake Ginninderra. Volumen 1: 61-74
- Pedrozo F.L, Bonetto C. A, Ramos A, Minzoni F.Ecosur** (1986) "Fijación de Fósforo en sedimentos de fondo de los ríos Paraná, Paraguay y Bermejo.", Pag 56-68, Argentina
- Robertson D.**(1997) "Regionalized Loads of Sediment and phosphorus to Lakes Michigan and Superior, high flow and long term average" Journal of Great Lakes 23: 416-439, USA
- Straskraba M.&Tundisi J.G** (1999) *Guidelines of Lake Management.*, ILEC-UNEP editors Vol.9 ,ILEC-UNEP, Otsu, Japón
- Wetzel, R.** (1981) *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona, 679 pp.