

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

ANALISIS DE LA COMPOSICION IONICA DE LAS AGUAS DEL EMBALSE SAN ROQUE, CORDOBA.

¹M.I. Rodríguez; ¹M. Granero; ¹M.A. Bustamante; ² M. Avena; ³ E. Bonfanti; ³ F. Busso, y ³ A. Girbal.

¹ Centro de la Región Semiárida (CIRSA), Instituto Nacional del Agua (INA)

Te: 4683015 - Ambrosio Olmos 1142, 5000, Córdoba – Te:0351-4683015

² Facultad de Cs Químicas, Universidad Nacional de Córdoba

³ Aguas Cordobesas S. A.

E-mail: minesrodrig@infovia.com.ar

RESUMEN

La problemática de la eutroficación en los embalses es un fenómeno complejo y como tal requiere un abordaje limnológico integral. El monitoreo continuo de las variables ambientales implicadas, sumado al seguimiento de la evolución trófica del cuerpo de agua es determinante para lograr una adecuada gestión del recurso.

La determinación de la salinidad, la proporción relativa de cada uno de los iones como así también su variación temporal y espacial pueden ser indicativos de procesos químicos que involucran el nivel trófico del embalse. Por otro lado, la composición iónica de las aguas superficiales es un reflejo de la geoquímica de la cuenca y puede brindar información sobre la presencia de fuentes de contaminación allí presentes.

El presente trabajo muestra los resultados del estudio de la composición iónica del Embalse San Roque obtenidos en base a las campañas de monitoreo realizadas durante los años 2000 y 2001 y su correlación con algunas otras variables físicoquímicas y biológicas descriptivas del sistema. Los iones estudiados fueron sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, cloruro y sulfato, componentes mayoritarios del sistema.

El análisis de los resultados obtenidos indica que las aguas del embalse son bicarbonatadas cálcico sódicas, composición generalmente estable a lo largo del año. La variación espacial de las concentraciones de éstos responde a las diferencias hidrológicas y morfométricas de las diferentes áreas monitoreadas en el embalse como así también a las características de las subcuencas de drenaje. Adicionalmente, las dinámicas observadas en las concentraciones de los iones en general, están controladas verticalmente por el régimen de estratificación térmica y temporalmente por el régimen de precipitaciones.

Palabras claves: eutroficación, salinidad.

INTRODUCCION

Usualmente, la salinidad total se define como la suma de los cationes calcio, magnesio, sodio y potasio más los aniones carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro. La proporción y el valor absoluto de cada uno de estos iones presentan interés ya que son indicadores de diversos aspectos relacionados con las condiciones limnológicas de las aguas. Así, la composición específica de la comunidad biológica, particularmente de las algas, está afectada por la composición iónica de las aguas (Wetzel, 1981). También, las concentraciones de los iones como el calcio o el sulfato pueden ser indicadoras de procesos que se desarrollan en la interfase agua-sedimento. El estudio de la dinámica química de esta interfase es de gran importancia debido a que los sedimentos pueden ser sumideros o una fuente interna de aporte de nutrientes, dependiendo de las condiciones físicoquímicas del sistema. Además, la concentración de algunos iones puede verse muy alterada por la presencia de focos contaminantes. En el caso del cloruro, altos valores en sus concentraciones son indicadoras del vertido de efluentes industriales, urbanos y rurales (Straskrava y Tundisi, 1999).

Actualmente, el Embalse San Roque junto con sus tributarios es objeto por parte del CIRSA, de un continuo monitoreo de variables físicoquímicas y biológicas con el propósito de caracterizar y llevar un seguimiento de la evolución de su régimen trófico. En el marco de este proyecto, se realiza una evaluación de las relaciones existentes entre algunos parámetros de calidad de agua y la composición iónica del embalse.

Los datos analizados corresponden al programa de monitoreo del embalse del año 2000 y 2001 y los objetivos fueron caracterizar al embalse con relación a su composición iónica, describir la variación en tiempo y espacio de la concentración de iones y parámetros asociados y relacionar los procesos de estratificación, mezcla y variaciones del nivel del embalse con la concentración de los iones.

MATERIAL Y METODOLOGIA

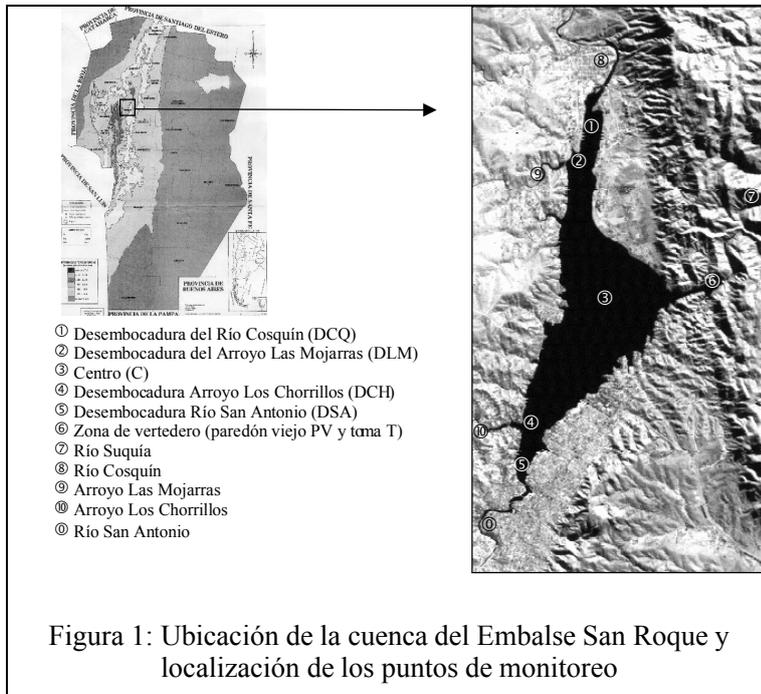
El Embalse San Roque se ubica en el Valle de Punilla a 600 msnm, entre las Sierras Grandes y las Sierras Chicas de la Provincia de Córdoba (Figura 1). La cuenca de drenaje está formada por las subcuencas del Río San Antonio de 500 km², Río Cosquín de 820 km², Arroyo Las Mojarras de 85 km² y Arroyo Los Chorrillos de 160 km², siendo el Río Suquía el único emisario del reservorio. El embalse tiene como objeto el control de inundaciones, la provisión de energía hidroeléctrica, abastecimiento de agua a la Ciudad de Córdoba (con aproximadamente 1.500.000 habitantes) creando un ámbito para el desarrollo de múltiples actividades recreativas.

El clima de la región influye en la productividad del sistema acuático, al afectar y determinar cambios estacionales y anuales a nivel hidrológico. Desde este punto de vista, se observa una alternancia de años muy húmedos (precipitaciones anuales superiores a 1000 mm) con otros secos que apenas superan los 400 mm. La precipitación media anual es de 780 mm y la humedad media del 65%. Las mayores precipitaciones se producen en verano influyendo significativamente en la entrada de nutrientes al embalse durante esa estación junto con el aumento de los caudales de los tributarios. El

área se halla bajo el dominio de un clima templado con una temperatura media anual de 14° C. Los vientos predominantes son del cuadrante sur y norte, pero están sujetos a las variaciones propias de la morfología del relieve.

Teniendo en cuenta tanto los factores relacionados con la cuenca descriptos anteriormente y con las características hidromorfológicas del cuerpo de agua se establecieron estaciones de muestreo en el centro del embalse (C), en cercanías al antiguo dique (PV), en el área de la toma de agua (TAC), en las desembocaduras de los tributarios San Antonio (DSA), Cosquín (DCQ), Las Mojarras (DLM) y Los Chorrillos (DCH) (Figura 1). La frecuencia de muestreo en el año 2000 fue semanal durante el verano y de quincenal a mensual en el resto del año. En el año 2001 la frecuencia fue mensual.

En los puntos de muestreo se realizaron mediciones in situ cada un metro de las concentraciones de oxígeno disuelto, pH, temperatura y conductividad del agua con una sonda multiparamétrica (Horiba U-23). Las muestras de aguas se tomaron a nivel subsuperficial (0,20m), en zona fótica y a un metro del fondo, con una botella de tipo Van Dorn para la determinación posterior de iones. La transparencia se midió con disco de Secchi.



Analíticamente en laboratorio se midieron los iones sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}) por cromatografía iónica, manganeso (Mn) y hierro (Fe) por absorción atómica y clorofila *a* por espectrofotometría. Las formas iónicas del carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) se reemplazaron por el título alcalimétrico completo (GEMS, 1992) y se consideró en su totalidad como bicarbonato ya que a valores de pH entre 7 y 9 predomina este ión; proporciones de carbonato de aproximadamente el 1% corresponden a valores de pH 8.2 (Wetzel, 1981).

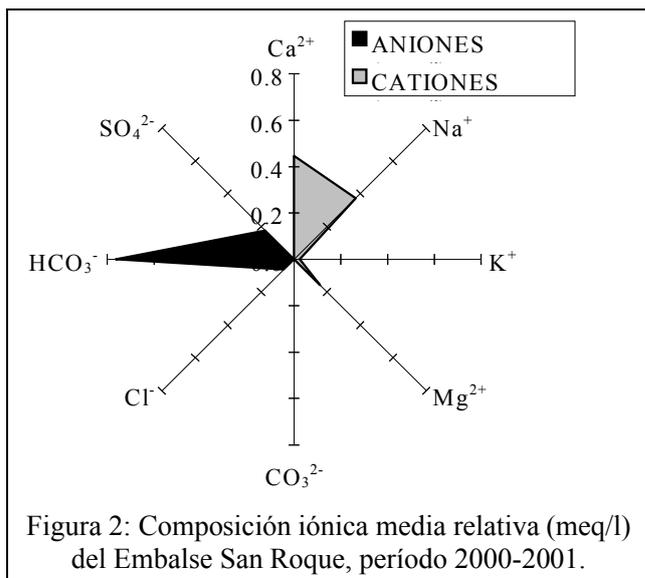
Desde el punto de vista de su composición iónica, se caracterizó el embalse a través del cálculo y representación gráfica de la composición

media relativa en meq/l y la aplicación de los diagramas de Gibbs (1970). Estos, están basados en las gráficas de dispersión del total de sales disueltas vs la proporción $(\text{Na Cl})/(\text{Ca HCO}_3)$ y de cuerpos de agua de distintas regiones del mundo y sugieren cuáles son los procesos que dominan en cada uno de ellos (río, lago, mar u océano) ya sean las precipitaciones atmosféricas, la composición de las rocas dominantes en la cuenca o el proceso de evaporación-cristalización.

También se describe el comportamiento espacial (en el perfil y a lo largo del embalse) y temporal de los componentes iónicos. Se realiza un análisis de correlación entre sus concentraciones y principales parámetros biológicos y de regresión lineal de la variación del nivel del embalse vs la concentración de los diferentes iones.

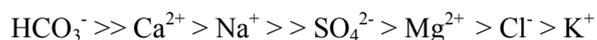
ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Descripción de la composición iónica de las aguas del embalse y su variación espacial y temporal



La Figura 2 muestra la composición iónica media relativa de las aguas superficiales del centro del lago. Esta composición fue coincidente a la señalada por Bonetto et al (1976).

El embalse presentó un tipo de agua bicarbonatado cálcico sódico siendo el orden de concentración media de las especies el siguiente (meq/l):



La Figura 3 muestra la variación temporal de la composición iónica en la estación del centro a nivel de superficie. A lo largo del período de estudio, la composición no presentó

variaciones en su orden excepto en octubre de ambos años en que se detectó un cambio donde el ión sodio desplaza al calcio en sus concentraciones relativas y se incrementan los porcentajes relativos del ión sulfato.

Las concentraciones de magnesio, potasio y cloruro presentaron una escasa fluctuación temporal, mientras que el calcio, bicarbonato, sodio y sulfato mostraron una mayor variación.

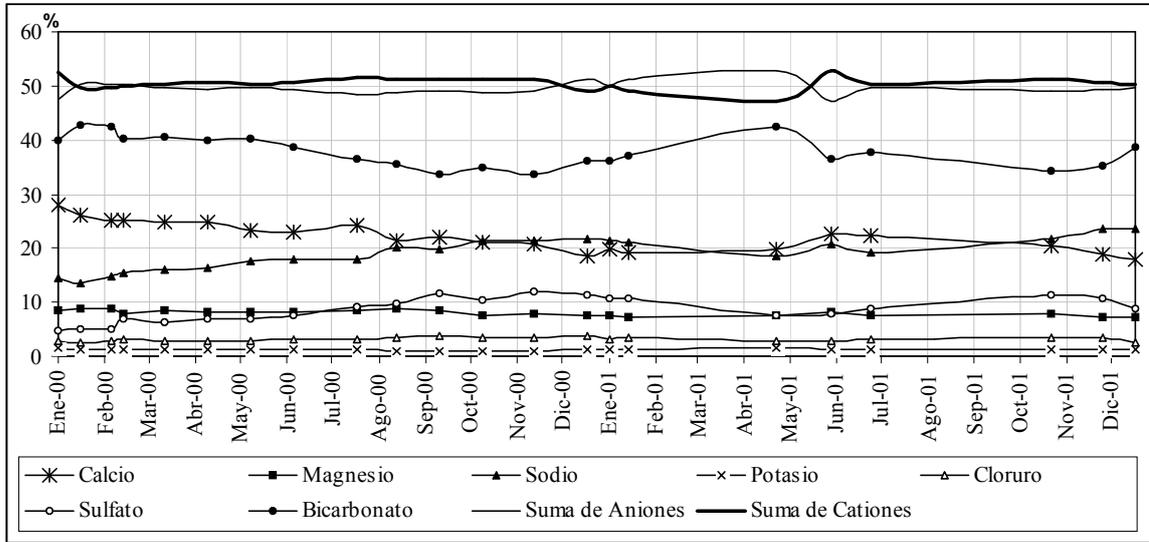
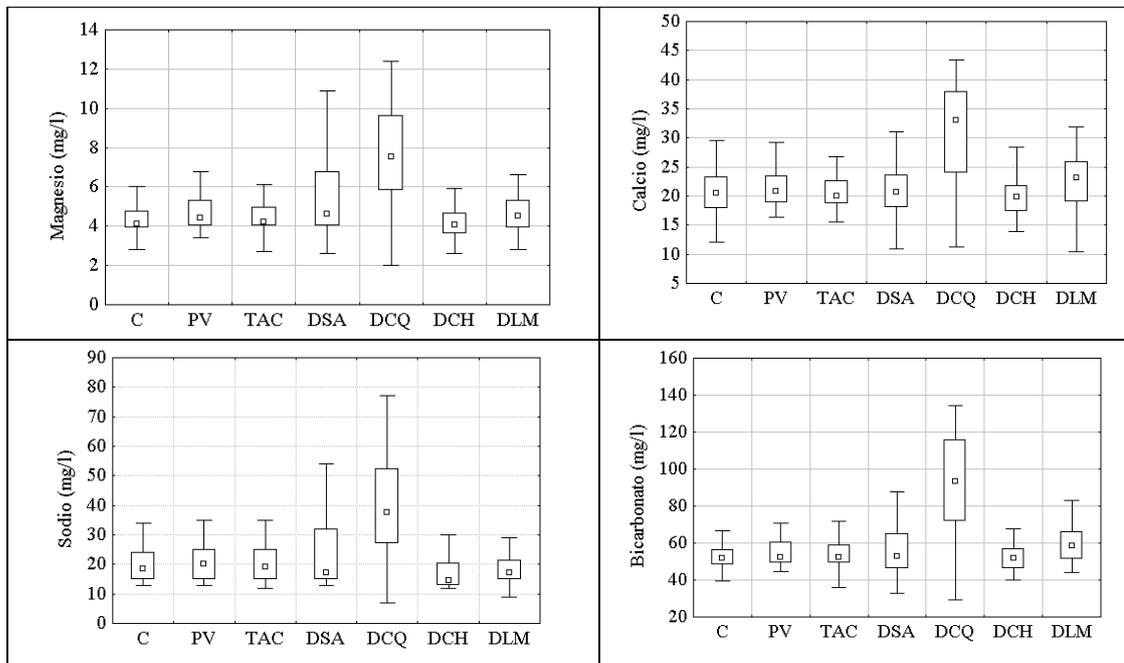


Figura 3: Variación temporal de la composición iónica en la estación del centro del Embalse San Roque.

La variación espacial de la concentración de iones es mostrada en la Figura 4 a través de los diagramas estadísticos donde se indican valores mínimos, máximos, medianas y la probabilidades del 25-75 %. Se observó que las desembocaduras de los principales ríos San Antonio y Cosquín, se caracterizaron por tener una mayor variabilidad en la concentración de iones comparadas con las estaciones del centro, garganta y tributarios menores. Se destaca el comportamiento detectado en la desembocadura del Río Cosquín que presenta los máximos valores medios de concentración para todos los iones como así también los mayores coeficientes de variación para cada uno de ellos.



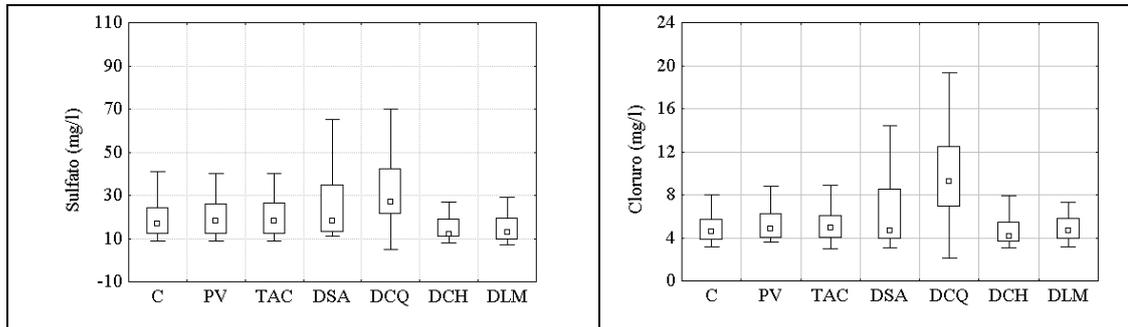
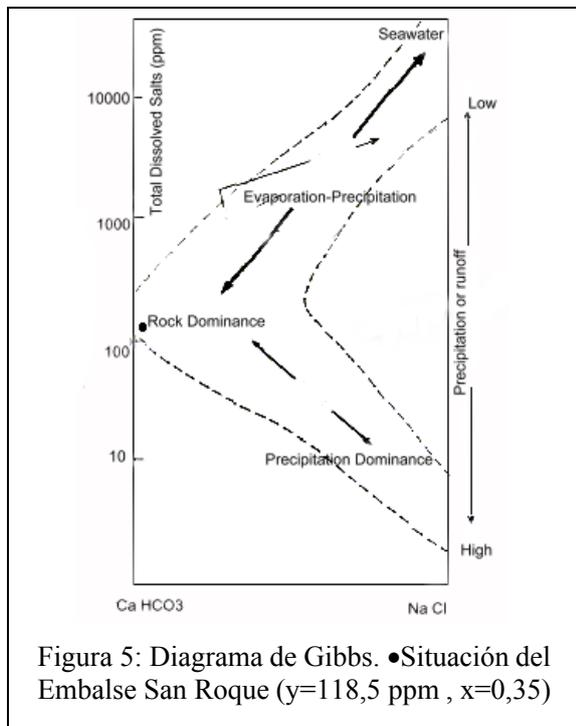


Figura 4 Variación espacial en la concentración de los diferentes iones en el Embalse San Roque.

Influencia de la cuenca en la composición iónica de las aguas del embalse

La salinidad resultante del embalse puede ser analizada a través del modelo de Gibbs que establece cuáles son los procesos que la controlan en función de la concentración de los principales iones (Figura 5). Los datos correspondientes al Embalse San Roque lo ubican en el sector "rock dominance" donde las aguas ricas en bicarbonato de calcio son indicativas de una alta dependencia de la hidroquímica del cuerpo de agua respecto a la geoquímica y de los procesos de meteorización química que se dan en la cuenca.



Según estudios realizados en el área (Barbeito y Ambrosino, 1999) las rocas que componen la cuenca de aporte son esencialmente un 49% ígneas cristalinas (granito), un 34% metamórficas y un 16% (gneis y cubiertas limo-loésicas). El proceso morfodinámico más extendido es el de meteorización mecánica mientras que los procesos de meteorización química, se producen de modo más significativo en áreas donde el relieve disminuye posibilitando un mayor contenido de humedad (vertientes orientales de los ríos), o bien el material es más susceptible a este proceso (vertiente occidental de las Sierras Chicas al Río Cosquín y embalse). Los carbonatos (alcalinidad) presentes en el agua del embalse provienen principalmente de la disolución de minerales carbonáticos (calcita, dolomita, etc) y silicatos presentes en rocas y suelos de la cuenca. Los ríos que atraviesan áreas con rocas cristalinas relativamente insolubles aportan al lago bicarbonato como ión principal que deriva ya sea de la atmósfera o del aire del suelo (Gaiero, 1995). La meteorización de los silicatos proveen al embalse de grandes cantidades de sodio y en menor grado potasio. El potasio en la cuenca puede ser tan abundante como el sodio, pero éste es más común en el agua de los ríos y del lago. Esto se debe a que el potasio es retenido más fuertemente que el sodio en sitios de intercambio catiónico (Gaiero, 1995). La subcuenca del Río San Francisco, afluente del Río Cosquín, se caracteriza por pendientes suaves, importante actividad antrópica y diversidad litológica con presencia de rocas sedimentarias. Esta cubierta sedimentaria determina concentraciones de sólidos disueltos extremadamente altas, en comparación con la de los otros ríos de la cuenca (Gaiero, 1995). Estas características particulares de la

cuenca son reflejadas en las condiciones imperantes en el área de la desembocadura del Río Cosquín, que presenta conductividades notablemente superiores a las del resto del lago.

Influencia del volumen del embalse y del patrón de estratificación en la dinámica de la concentración de iones

A través de un análisis de regresión del nivel del embalse vs la concentración de los diferentes iones, se observó que ésta se ve influenciada por el efecto de dilución. Este fenómeno se refleja en los valores de la conductividad (Figura 6) que es altamente representativa de la salinidad de las aguas.

La dependencia de la concentración respecto del aumento de volumen embalsado no es igual para todos los iones. El sodio se muestra como el ión más dependiente de dicho efecto ($R^2=0,71$), seguido por el magnesio ($R^2=0,69$), cloruro ($R^2=0,67$), bicarbonato ($R^2=0,65$), sulfato ($R^2=0,63$) y en menor medida el calcio ($R^2=0,57$) y el potasio ($R^2=0,37$).

El calcio es uno de los iones que presenta mayor variabilidad temporal y reviste un interés particular ya que su concentración en el embalse está gobernada también por procesos químicos propios del metabolismo del embalse. En el caso de lagos productivos, la disminución de calcio y carbono inorgánico superficial puede producirse por precipitación en forma de CaCO_3 , este proceso se relaciona con el incremento de la fotosíntesis (descalcificación epilimné-tica). Se ha sugerido que una elevación de 0,5 unidades en el pH, puede producir en el epilimnio una pérdida de 10 mg/l o más de calcio (Margalef, 1983). En el Embalse San Roque se observó que cuando el nivel de pH y clorofila *a* aumentaron el calcio superficial disminuyó, sin embargo esta relación no se mantiene para todos los casos con altos niveles de clorofila *a* (Figura 7).

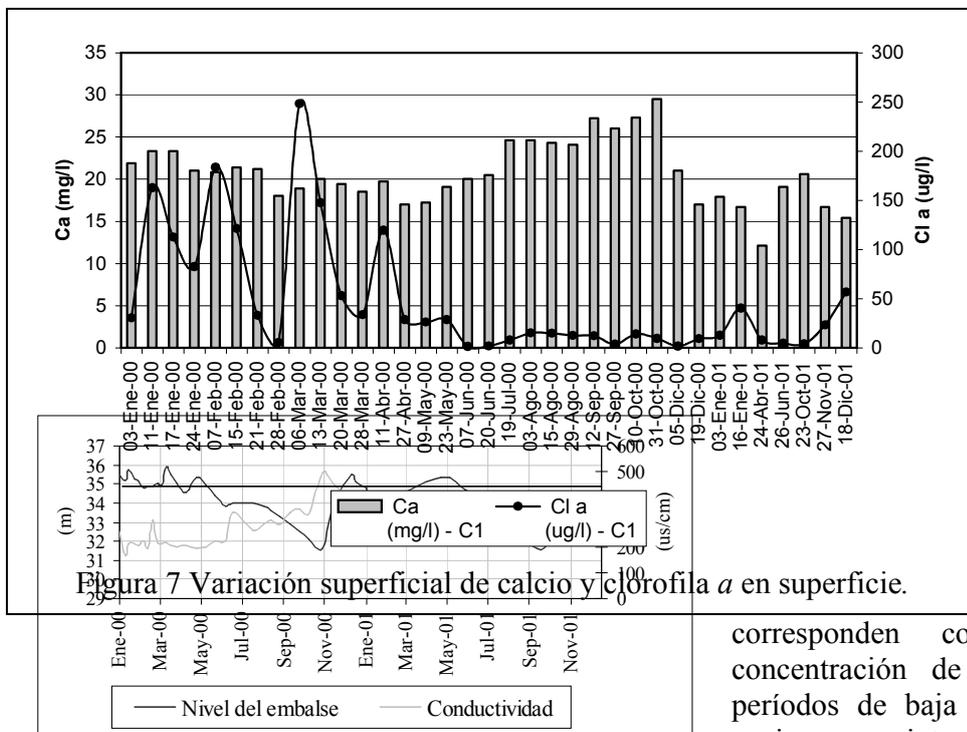


Figura 7: Variación superficial de calcio y clorofila *a* en superficie.

La dinámica estacional del ión calcio en profundidad presentó mayores variaciones que a nivel superficial. Las concentraciones en el fondo, se mantuvieron en general menores a las de superficie durante el período de estratificación estival y luego en el período de mezcla igualaron a las de superficie (Rodríguez, et al, 2001). En la Figura 8 se observa que en general las variaciones de calcio en el fondo se

corresponden con variaciones en la concentración de oxígeno y el pH. Los períodos de baja concentración de oxígeno sugieren una intensa actividad microbiana, la que a su vez produce una disminución en el

pH y un aumento en calcio. El calcio que solubiliza puede ser proveniente de superficie o de sedimento. Este fenómeno ha sido observado en lagos eutróficos (Lazzarettiulmer y Hanselmann, 1999).

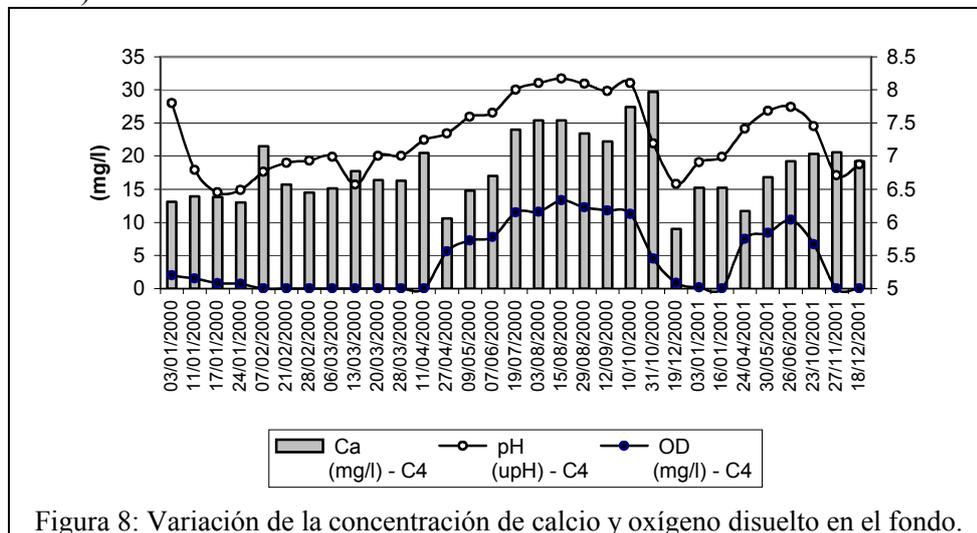


Figura 8: Variación de la concentración de calcio y oxígeno disuelto en el fondo.

El magnesio es un micronutriente y un componente de la clorofila. Los compuestos del magnesio son más solubles que los de calcio y en la mayoría de los casos el hidróxido y el carbonato de magnesio precipitan en forma significativa sólo a pH muy elevado (>10) (Wetzel, 1981) esto explica que sus concentraciones en el embalse sean relativamente conservativas con una menor dependencia del pH y más dependiente que el Ca del efecto de dilución.

El sodio en lagos y embalses usualmente no presenta una alta variabilidad, sin embargo, un enriquecimiento del agua con gran cantidad de sodio y fósforo - que puede ser debida a los vertidos domésticos - puede alterar su concentración. En el embalse, el aumento de su proporción relativa como catión durante el verano puede relacionarse con el mayor aporte de caudales desde la cuenca y a una paralela disminución de las proporciones de calcio a nivel superficial. El sodio es un ión que reviste interés debido a su posible influencia en el fitoplancton. La existencia de requerimientos absolutos de sodio y de potasio, se ha demostrado sólo en algunas pocas plantas. En algunas especies de cianofíceas, los requerimientos de sodio son particularmente elevados (Wetzel, 1981).

La concentración del ión potasio en el Embalse San Roque, presentó una escasa variación temporoespacial y estuvo afectado en menor medida por el efecto de dilución. En lagos muy productivos se ha observado en el epilimnio una reducción moderada de potasio, probablemente relacionada con su uso por parte de grandes poblaciones de algas y por su sedimentación en el hipolimnio.

La utilización metabólica del cloruro no provoca variaciones significativas en la distribución espacial y temporal de sus concentraciones en el lago. Estas pueden verse muy alteradas por la presencia de focos contaminantes (los valores normales se hallan entre 2 y 10 mg/l). Las concentraciones en el lago estuvieron dentro del rango de valores normales, salvo en el área de desembocaduras del Río Cosquín, donde se registró un máximo de 19 mg/l y del Río San Antonio con un valor máximo de 14 mg/l. Altos valores de cloruro en general son indicadores de efluentes industriales, urbanos y rurales y en regiones áridas y semiáridas las concentraciones suelen ser mayores y pueden variar a lo largo del año (Straskrava y Tundisi, 1999).

El sulfato es la forma predominante del azufre en el agua y básicamente se asimila bajo esta forma. La descomposición de la materia orgánica provoca la liberación del azufre principalmente como ácido sulfhídrico que en condiciones aeróbicas se oxida con bastante rapidez.

El sulfato es la forma predominante del azufre en el agua y básicamente se asimila bajo esta forma. La descomposición de la materia orgánica provoca la liberación del azufre principalmente como ácido sulfhídrico que en condiciones aeróbicas se oxida con bastante rapidez.

Por esta razón, usualmente en períodos de circulación del embalse, no existe ácido sulfhídrico y la concentración de sulfatos varía poco con la profundidad, como se observó en el perfil de las aguas del embalse.

Pero, bajo condiciones de anoxia, las concentraciones de sulfato en el fondo del embalse disminuyeron (Figura 9). Este cambio puede asociarse con el proceso de reducción de sulfato a ácido sulfhídrico. La actividad bacteriana es en gran parte la responsable de la reducción ya que existen ciertas especies alojadas en los sedimentos que utilizan el sulfato como fuente de oxígeno bajo las condiciones anóxicas de fondo. Parte del ácido sulfhídrico formado puede reaccionar con el ión Fe^{2+} liberado desde los sedimentos formando sulfuro de hierro (FeS) insoluble. Este aspecto es importante ya que si éste precipita en abundancia, parte del fósforo acumulado en el hipolimnion puede permanecer en solución aún bajo condiciones de circulación.

	COTA	SECCHI	PH	COND.	TEMP.	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl a
COTA	1.000	-0.021	0.242	-0.552	0.612	-0.487	-0.572	-0.679	-0.713	-0.688	-0.326	-0.497	0.271
CONDUCTIVIDAD	-0.552	0.080	-0.092	1.000	-0.291	0.736	0.832	0.870	0.823	0.874	0.691	0.782	-0.504
Cl a	0.271	-0.215	0.376	-0.504	0.368	-0.238	-0.337	-0.358	-0.380	-0.398	-0.249	-0.324	1.000
DINOFITAS	0.414	-0.159	0.372	-0.663	0.472	-0.422	-0.541	-0.587	-0.637	-0.639	-0.431	-0.501	0.767

Tabla 1: Correlaciones entre parámetros biológicos, variables físicas y concentración de iones. Coef. r de Spearman $P < 0.005$.

El análisis de correlación (Tabla 1) entre las principales variables físicas, concentración de iones y parámetros biológicos asocia de modo positivo los valores de clorofila *a* con el pH (incrementado por efecto de la fotosíntesis) y la temperatura, siendo afectada de modo negativa la transparencia por la presencia de algas. El aumento de temperaturas y del nivel del embalse se correlaciona positivamente con la presencia del dinoflagelado *Ceratium hirundinella*, alga cuyos eventos de floraciones han provocado inconvenientes en el proceso de potabilización (Ruibal et al, 1999). No pudo detectarse una influencia importante de los componentes iónicos sobre la dinámica de

algas, siendo sus concentraciones correlacionadas negativamente con el nivel del embalse.

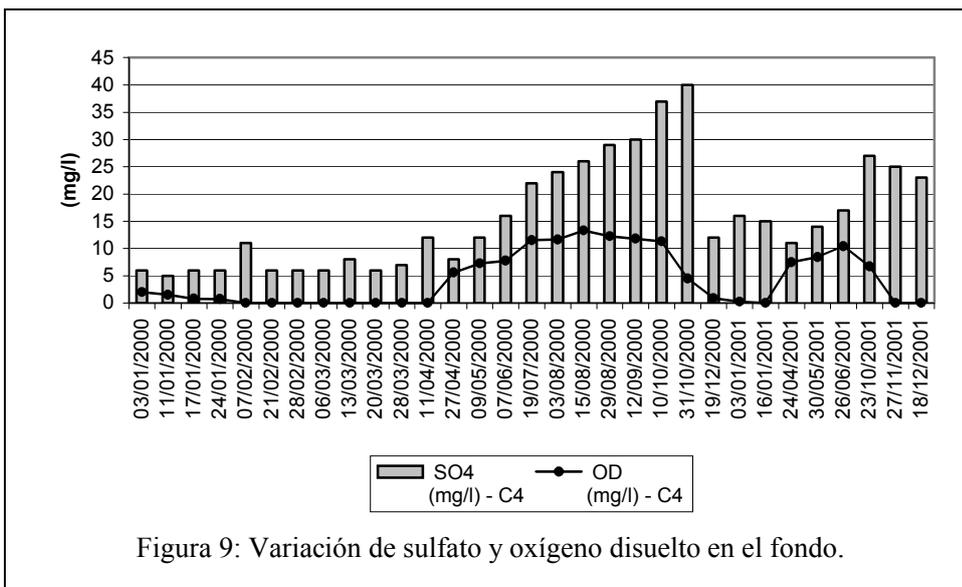


Figura 9: Variación de sulfato y oxígeno disuelto en el fondo.

CONCLUSIONES

El tipo de agua del embalse San Roque desde el punto de vista de su composición iónica es bicarbonatado cálcico sódico y está determinado por las

características geoquímicas de la cuenca y el metabolismo del lago. Los gradientes en la concentración de los distintos iones observados espacialmente en el embalse responden también a las diferencias hidromorfológicas del sitio de ubicación de cada una de las estaciones sobre el embalse.

Las características particulares de la subcuenca del Río Cosquín y sus afluentes, tal como la presencia de abundante material sedimentario, son reflejadas en las condiciones del agua de la desembocadura con valores máximos de conductividad y concentración de todos los iones.

Las diferencias entre las concentraciones superficiales y de fondo, en general para todos los iones, están controladas verticalmente por el régimen de estratificación térmica y temporalmente por el régimen de lluvias. El aumento del nivel del embalse provoca que en general las concentraciones en la época de lluvias disminuyan. Las concentraciones en la columna de agua durante el período de lluvia son uniformes y durante la estratificación, son menores en el fondo, con variantes que responden a las particularidades de cada ión.

Las variaciones de nivel de calcio en superficie no presentaron un patrón de asociación muy definido con el pH y el desarrollo de algas, sin embargo el menor efecto de dilución detectado para este ión es indicativo de que su concentración en el lago está sujeta a procesos químicos de precipitación y disolución. Las concentraciones del ión sulfato durante el verano y otoño disminuyen significativamente en el fondo como resultado de su reducción a ácido sulfhídrico reflejando las características de estratificación y anoxia.

BIBLIOGRAFIA

-Bonetto A.A.; Di Persia, D.H.; Maglianesi, R. y Corigliano, M.C. (1976) “*Caracteres limnológicos de algunos lagos eutróficos de embalse de la Región Central Argentina*” *Ecosur*, 3 (5): 47-120.

-Barbeito O, y Ambrosino, S. (1999) *Prevención de daños por crecientes en áreas serranas, Caracterización de áreas de riesgo, Incidencia de las características geológicas y geomorfológicas en la tendencia a crecientes repentinas*, Informe parcial CONICOR, Córdoba, 26 pág.

-Gaiero, D.M. (1995) *Dinámica hidrogeoquímica de un sistema alterado, el Río Suquia, Córdoba*, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 207 p.

-Gibbs, R.J. (1970) *Mechanisms controlling world water chemistry*, *Science*, 170: 1088-1090.

-GEMS (1992) *Guía Operativa GEMS/Agua*, 3º Ed. GEMS/W.94.1.

-Lazzarriulmer, M.A. and Hanselman, K.W. (1999) *Seasonal variation of the microbially regulated buffering capacity at sediment water interfaces in freshwater Lake Aquat Sci* 61 (1):59-74.

-Margalef, R. (1983) *Limnología*, Ed. Omega, España.

-Rodríguez, M. I.; Granero, M.; Bustamante, M. A.; Avena, M; Bonfanti, E.; Busso, F. y Girbal, A. (2001) “*Composición iónica del Embalse San Roque (Cba, Argentina) y su relación con el proceso de eutroficación*” *Sem. Int. de Gestión Amb. e Hidroelec.*, Complejo Hidroeléctrico Salto Grande, Entre Ríos

-Ruibal, A.L.; Bustamante, A.; Granero, M.; López, F.; Girbal, A.; Lammel, E.; Simonin, M.E. y Busso, F. (1999) “*Estudio de la evolución de la calidad de agua del Embalse San Roque (Córdoba) asociado al desarrollo de floraciones de Ceratium*” *Cong. Arg. de Grandes Presas y Aprovech. Hidroeléct.*, San Martín de los Andes, Arg.

-Ryding, S.O. y Rast, W. (1992) *El Control de la Eutrofización en Lagos y Pantanos*, Ediciones Pirámide, España.

-Straskraba, M.; Tundisi, J.G. (1999) *Reservoir Water Quality Management*, ILEC, Japan.

-Wetzel, R. (1981) *Limnología*, Ed. Omega, España.