

XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, CÓRDOBA, ARGENTINA, 2000

**EVALUACIÓN PRELIMINAR COMPARATIVA DE LA CALIDAD DE AGUA Y
SEDIMENTOS DE EMBALSES DESTINADOS AL ABASTECIMIENTO DE AGUA
POTABLE AL GRAN CÓRDOBA**

María I. Rodríguez^{1,2}, Ana Cossavella^{1,3}, Claudia Oroná¹, Susana del Olmo¹, Nancy Larrosa¹, Andrés Rodríguez¹, Marcelo Mariscal¹,
Marcelo Avena, Edgar Castelló¹, Fernando Miatello¹, Mariana Pagot¹, Gonzalo Moya¹, Gerardo Hilman¹, Raquel Bazán¹, Guillermo
Jaureguialzo¹, Nora Ormeño³, César Bertucci³, Marcela Martínez¹ y Jorge Helmbrecht^{1,2}.

¹Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, UNC: Av. Vélez Sarsfield 1601, Cdad. Univ. ,CP 5000, Córdoba, Argentina
E-MAIL: SIP@COM.UNCOR.EDU - TE.: (0351) 4333075

²Centro de Investigaciones de la Región Semiárida, INA, Ambrosio Olmos 1142, CP 5000, Córdoba, Argentina
TE.: (0351) 4682781

³Dirección Provincial de Agua y Saneamiento, Humberto 1º 607, CP 5000, Córdoba, Argentina
TE.: (0351) 4237018

RESUMEN

En regiones semiáridas como la provincia de Córdoba (Argentina), el agua es un recurso natural escaso, limitante del desarrollo e intimamente ligado a la calidad de vida de una sociedad y su ecosistema. La Ciudad Capital y su zona de influencia (Gran Córdoba) tienen como fuente principal de agua potable el embalse San Roque y como fuente complementaria el embalse Los Molinos. Hoy, ambos reservorios presentan claros signos de problemas derivados del estado de eutrofia, tales como escasa transparencia, presencia de anoxia hipolimnética y frecuentes eventos de floraciones algales, con el consiguiente deterioro de estos recursos. Con el objetivo de lograr un estudio integral y sistemático de la calidad del agua y los sedimentos de ambos embalses abordado en forma interinstitucional e interdisciplinario y generar una base de datos para la aplicación futura de modelos de eutroficación que contribuyan a la adecuada gestión, se realizaron en el año 1999 campañas de monitoreo de agua y sedimento. El presente trabajo resume los avances en los resultados preliminares comparativos de ambos embalses, conjuntamente con la utilización del programa PROFILE para el análisis y reducción de los datos correspondientes a las campañas de muestreo.

ABSTRACT

In semiarid regions, like Cordoba province (Argentina), water is a limited natural resource lightly related to the quality of life for society and the whole ecosystem. The grand Cordoba area have two main reservoirs as drinking water sources: San Roque and Los Molinos. Both of them present clear signals of eutrophication as low transparency, anoxic levels al hipolimnium and periodic bloom algae. The objective of the present inter-institutional and pluridisciplinary efforts is to continue an integral and systematic study, oriented to support a better water policy and management of both reservoirs. During 1999 various fields campaigns were carried out measuring water and sediments quality. The present paper resumes the preliminary results campaign both water bodies, and illustrates the methodology for the future eutrophication modeling with state of art tools.

modo comparativo, destacándose las diferencias más importantes en los siguientes aspectos: superficie de la cuenca de alimentación, superficie cota labio de vertedero, volumen cota labio de vertedero, longitud máxima, profundidad máxima y media y tiempo de residencia.

Tabla N° 1: Características del embalse Los Molinos I y San Roque
(*) Fuente: Dirección Provincial de Hidráulica – M.O.S.P. – Córdoba

Característica (*)	Embalse San Roque	Embalse Los Molinos I
Area de la Cuenca de alimentación	1750 Km ²	978 Km ²
Módulo erogado	10 m ³ /s(Serie 1945/82)	9,5 m ³ /s(Serie 1952/80)
Cota labio de vertedero	643,30 m.s.n.m.	665,00 m.s.n.m.
Cota embalse máximo	651,00 m.s.n.m.	769,00 s.n.m.
Superficie cota labio de vertedero	1501 Ha	2110 Ha
Superficie a nivel máximo	2478 Ha	2451 Ha
Volumen cota labio vertedero	201 Hm ³	307 Hm ³
Volumen cota embalse máximo	350 Hm ³	399 Hm ³
Longitud máxima (N-S)	8,40 Km	13,5 Km
Profundidad máxima normal	29,5 m	52,00 m
Profundidad media normal	6,43 m	14 m
Tiempo máximo de residencia	0,66 año	1,06 año

La creciente urbanización así como el desarrollo descontrolado de actividades agrícolas, el uso no adecuado del suelo, aceleran el proceso natural de eutroficación de los reservorios de agua, acortando así su vida útil, desde el punto de vista de su calidad, lo que afecta los usos del recurso.

Los antecedentes existentes indican que ambos embalses se encuentran en estado eutrófico (3),(6) y (7).

Las principales fuentes externas de nutrientes en la cuenca del embalse San Roque son las descargas de efluentes domésticos sin el adecuado tratamiento, provenientes de la cuenca de alimentación, que posee una alta concentración urbana estable, superior a los 100.000 habitantes la que se ve triplicada en épocas turísticas; el aporte por escorrentía agrícola, forestal y urbana contribuyen en menor medida al aporte de nutrientes; mientras que en la cuenca del embalse Los Molinos I se destacan las actividades agrícolas, forestales y ganaderas, el empleo de agroquímicos en el perillago y su cuenca de aporte, la presencia de balsas en el cuerpo de agua, infraestructura para el turismo restringida al perillago como campings y clubes, destacándose la baja densidad poblacional en la cuenca, con valores que no superan los miles de habitantes.

OBJETIVOS

El presente trabajo presenta características comparativas de ambos embalses y algunos de los resultados preliminares y comparativos de las campañas de monitoreo realizadas en las estaciones de primavera-verano del 99~00, con la aplicación del programa PROFILE (9) para el análisis y reducción de datos físico-químicos y biológicos de calidad de agua y sedimentos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron a la fecha cuatro campañas de monitoreo en ambos embalses correspondientes a primavera, verano y otoño 1999/2000, previéndose continuar con el muestro estacional de invierno.

La selección de los lugares y la frecuencia de muestreo dependen de las propiedades morfológicas e hidrodinámicas de la masa de agua (5).

Para un monitoreo con objetivos múltiples lo razonable es distribuir estaciones en todas las áreas representativas del embalse sugiriéndose un mínimo de tres: una en la parte superior, otra en el medio y una tercera cerca de la presa (9).

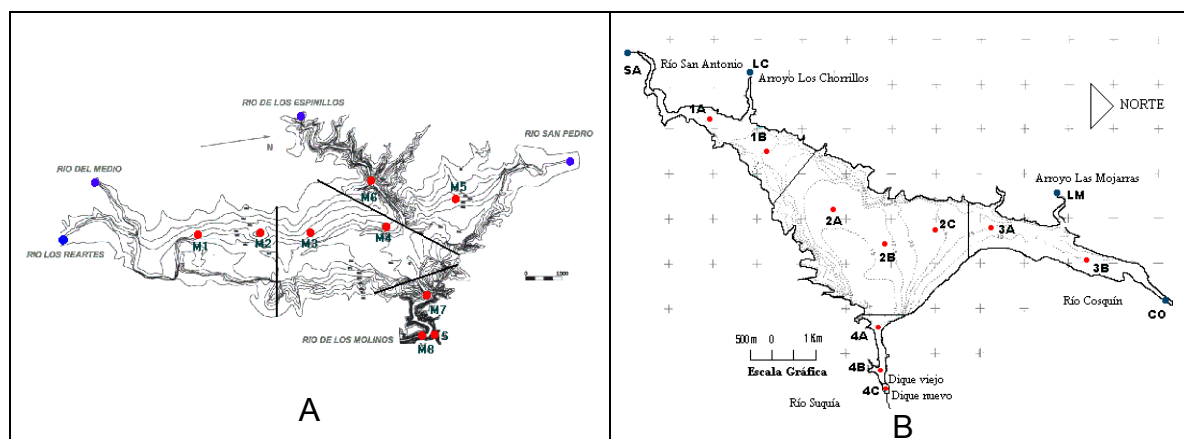


Fig. N° 2 : Localización de las estaciones de monitoreo en los Embalses Los Molinos (A) y San Roque (B).

En ambos embalses se fijaron estaciones en las desembocaduras de ríos, puntos intermedios, centro, garganta, paredón y área de toma (Figura N° 2).

En cada estación se midieron *in situ* coordenadas de ubicación geográficas, la transparencia del disco de Secchi y en el perfil: pH, temperatura, O₂ disuelto, turbiedad y conductividad y se extrajeron muestras para las siguientes determinaciones: alcalinidad, cloruros, Pt, PRS, N-NO₃, N-NO₂, N-NH₄, clorofila a, Si, Fe, Al, Mn, Ca, bacterias coliformes totales, fecales y heterótrofas, en superficie, fondo y a profundidad intermedia para nutrientes en caso de observarse estratificación. Las muestras para fitoplancton fueron extraídas en superficie y perfil en zona fótica.

En las desembocaduras de ríos, centro y garganta de ambos embalses se obtuvieron muestras de sedimentos en los que se realizaron determinaciones bacteriológicas y actualmente se analizan además, Pt, fracción de P débilmente adsorbido, fracción de P unida al Al, Fe y Ca; nutrientes de N, Al, Fe, Ca, Mn y COT.

Se realizó muestreo y aforo de los tributarios principales de cada embalse. La metodología utilizada fue similar a la aplicada para las muestras extraídas en el embalse (1).

La evaluación de los datos que se obtuvieron en las distintas campañas se realizó con una Serie de Procedimientos y Técnicas Simplificadas para la Evaluación y Predicción de la Eutroficación (9) que facilitan el análisis, resumen de datos y la implementación de modelos de procesos de eutroficación simplificados. Consta de tres módulos: FLUX, PROFILE y BATHTUB.

DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

En el presente trabajo se aplicó el programa PROFILE para el almacenamiento y análisis de datos parciales correspondientes a las primeras tres campañas en cada embalse y se obtuvieron los siguientes parámetros para las variables estudiadas: media, mediana, CV y CV(media), por estación, segmento y total del embalse (condiciones medias), en perfil y ponderados en función de su distribución horizontal. En la tabla N° 2 se sintetiza la

información de los parámetros evaluados correspondientes a la capa de mezcla hasta los 3 metros de profundidad. Del análisis comparativo surgen los siguientes aspectos destacables en las variables indicadas en la Tabla N° 2: la transparencia (Figuras N° 4A y 4B) mostró similitud en los valores mínimos y mediana en ambos embalses, mientras que fue superior el valor máximo alcanzado en el embalse Los Molinos, mostrando los datos obtenidos para este reservorio una mayor homogeneidad que para el embalse San Roque. Similar comportamiento se registró con la clorofila a (Figuras N° 5E y 5F) en el valor mediana, no así con los valores extremos, registrándose una alta variabilidad en los valores reportados para el embalse Los Molinos, alcanzando un valor máximo de 635,5 $\mu\text{g/l}$ en el mes de diciembre.

Tabla N° 2: Características comparativas de calidad (SR : embalse San Roque, LM : embalse Los Molinos I)

Parámetro	Alcalinidad (mg/l)		Oxígeno Disuel. (mg/l)		Temperatura (°C)		Transparencia (m)		Clorofila a ($\mu\text{g/l}$)		N-NO ₃ ($\mu\text{g/l}$)		Pt (P-PO ₄) ($\mu\text{g/l}$)	
	SR	LM	SR	LM	SR	LM	SR	LM	SR	LM	SR	LM	SR	LM
Mediana	66.5	43.1	12.3	12.4	22.7	22.2	0.9	1.0	57	58.4	129.3	438.8	54.3	165.5
Mínimo	54	39.5	7.8	5.9	20.4	16.4	0.5	0.4	17.6	3.9	130	300	25	13
Máximo	90	56	20	20	28.0	22.8	1.8	2.5	209.3	635.5	766	764	280	330
CV	0.213	0.168	0.274	0.255	0.095	0.119	0.103	0.033	0.354	0.608	0.562	0.447	0.560	0.745
CV (Med)	0.123	0.097	0.158	0.147	0.055	0.069	0.060	0.019	0.204	0.351	0.325	0.316	0.323	0.430

La concentración de fósforo total (Figura N° 3E y 3F) y de N-NO₃ fueron superiores en el embalse Los Molinos en el período de estudio, con mediana de 165.5 $\mu\text{g/l}$ de Pt y 438.8 $\mu\text{g/l}$ de N-NO₃ y de 54.3 $\mu\text{g/l}$ (Pt) y 129.3 $\mu\text{g/l}$ de N-NO₃ para el San Roque. En relación al posible nutriente limitante del crecimiento de algas, Ryding y Rast (5), sugieren una proporción de 7-8 N:1P, para su definición, sin embargo una proporción calculada para una masa de agua con cantidades excesivas de P y N, tendrá muy poca significación para identificar objetivos apropiados para el control de nutrientes, de allí la importancia de considerar sus valores de concentraciones absolutos.

Los niveles de oxígeno disuelto obtenidos en superficie alcanzaron valores cercanos al 200% de saturación, observándose una disminución de estos valores en profundidad, llegando a la anoxia en estaciones más profundas. Esta distribución vertical puede ser explicada por el hecho que la actividad fotosintética está restringida a una delgada capa superficial eufótica y por la acción del viento en superficie. El mismo perfil muestra la temperatura, con termoclinas superficiales inestables y estratificación térmica lábil, especialmente en el embalse Los Molinos. La Figuras N° 3A, 3B, 3C y 3D muestran los perfiles obtenidos en la estación garganta para ambos embalses en donde se puede visualizar lo expuesto.

En el embalse Los Molinos se observó en febrero un marcado incremento en la cantidad de Pt en el hipolimnion inferior (Figuras 3E y 3F). Esta situación ocurre normalmente durante las últimas fases de la estratificación térmica y este aumento también se observó en la forma de PRS, cerca de los sedimentos, en las estaciones más profundas, centro y garganta.

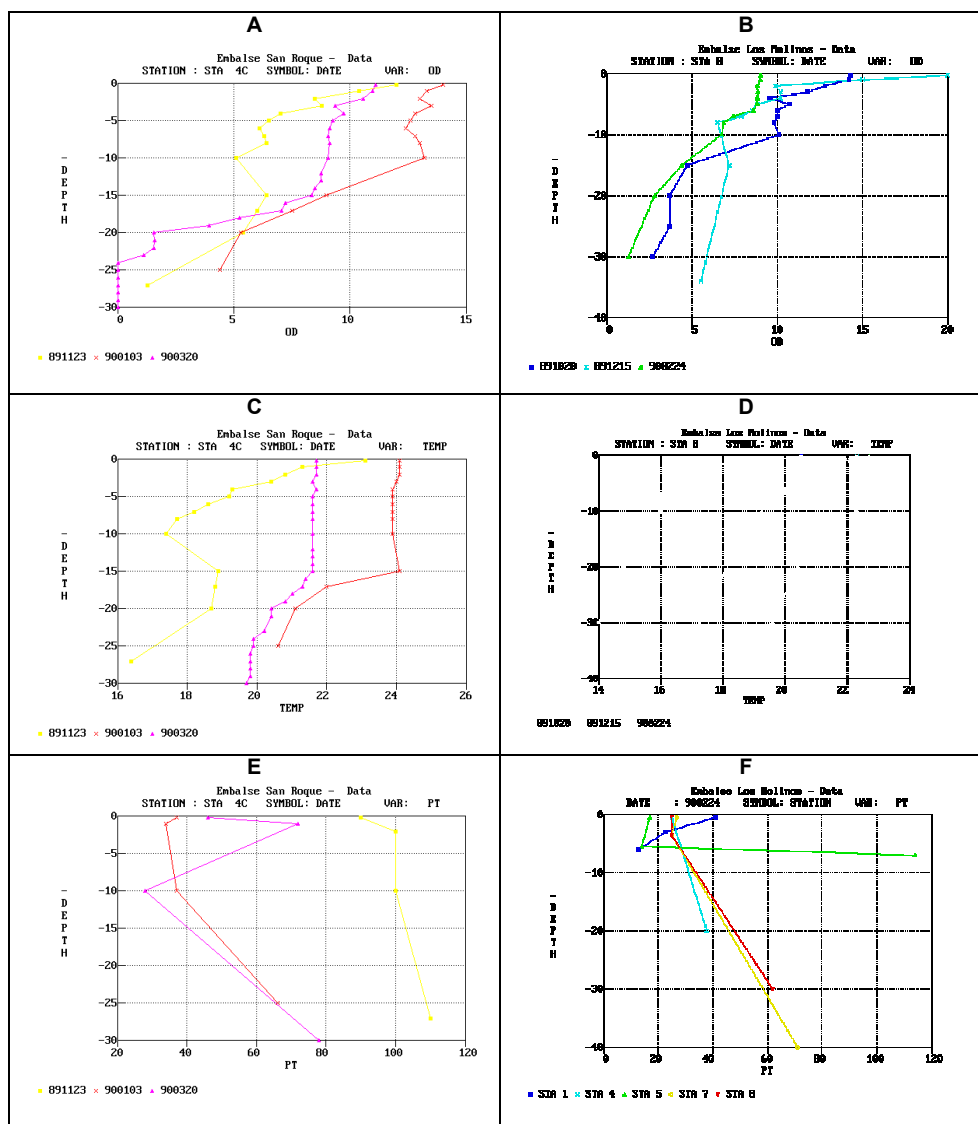


Fig. N° 3: Perfiles de oxígeno disuelto, temperatura y fósforo total de la estación garganta para ambos embalses *por falencias del software para todas las graficas los años 89 y 90 corresponden a los años 99 y 00 respectivamente.

En los gráficos “box plot” de la Figura N° 4 se resumen las variaciones espaciales de la transparencia para ambos embalse, permitiendo visualizar rápidamente el centro, la variabilidad y el rango total de distribución de los valores de este parámetro en cada estación en el período octubre-diciembre.

Las estaciones en el embalse Los Molinos correspondientes a la confluencia de los ríos Del Medio y Los Reartes, desembocadura del río San Pedro, la estación centro y estación correspondiente a la presa, son las que mayor variabilidad en los valores de transparencia han presentado, observándose en esta última un valor mínimo de 0,4 y un máximo de 2,5, mientras que en el embalse San Roque, el centro y la garganta fueron más variables y los valores mínimos se registraron para las desembocaduras de ambos tributarios (San Antonio y Cosquín). Al respecto, cabe aclarar que tanto los análisis teóricos como un gran número de observaciones empíricas han demostrado que la reducción en la transmisión de la luz en relación con las medidas de transparencia de Secchi está bastante relacionada con un incremento de la dispersión debida a la materia particulada

en suspensión. Esto se verifica sobre todo en cuerpos de agua muy productivos y ha sido utilizado de manera muy generalizada para estimar la densidad aproximada de las poblaciones de fitoplancton. Thorton y Rast (8) plantean un paradigma para embalses de regiones semiáridas basado en las diferencias significativas existentes de éstos con los de las regiones templadas del norte. Las diferencias identificadas tienen implicancias en la evaluación de la eutroficación y gestión, puesto que los valores de eutroficación, pueden tener en términos de actividades de restauración, costos altísimos considerando los valores deseables para regiones templadas (ej: 50 µg/l de Pt y 14 µg/l de clorofila a). Para embalses de regiones semiáridas, la baja transparencia de Secchi, con valores característicos por debajo de 1.2 m, se relacionan con altas concentraciones de materia en suspensión resultado de la erosión de las extensas cuencas.

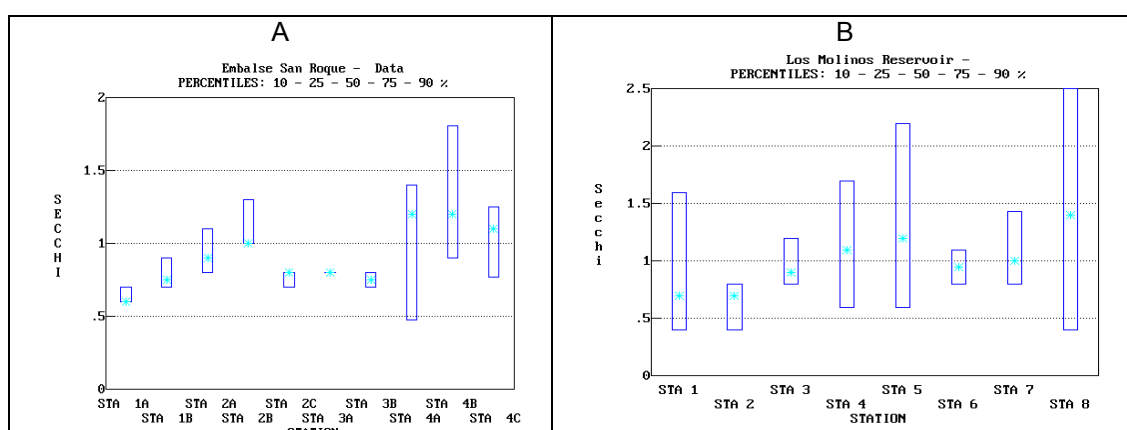


Fig. N° 4: Variación espacial de la transparencia para ambos embalses

El análisis de la variación temporal de la concentración de Pt en la capa superior hasta los 3 metros, indica una disminución en su concentración en la última campaña en todos los segmentos del embalse Los Molinos I y un comportamiento similar para las estaciones correspondientes a los segmentos más profundos, en los cuales se observó un pico en la concentración de Pt en la segunda campaña de muestreo. En el embalse San Roque, se observaron los mismos patrones de variación temporal para las tres campañas en todos los segmentos con una caída de concentración para la segunda fecha (Figuras N° 5A y 5B).

La conductividad (Figuras N° 5C y 5D) en el embalse Los Molinos I, también disminuyó como consecuencia de la dilución provocada por el aporte de las lluvias, mientras que en el embalse San Roque los mayores valores se registraron en la segunda campaña.

Las concentraciones de clorofila a (Figuras N° 5E y 5F) en el embalse San Roque fueron máximas en el segmento de desembocadura del Río San Antonio y garganta, con valores más estables para el centro y desembocadura del río Cosquín.

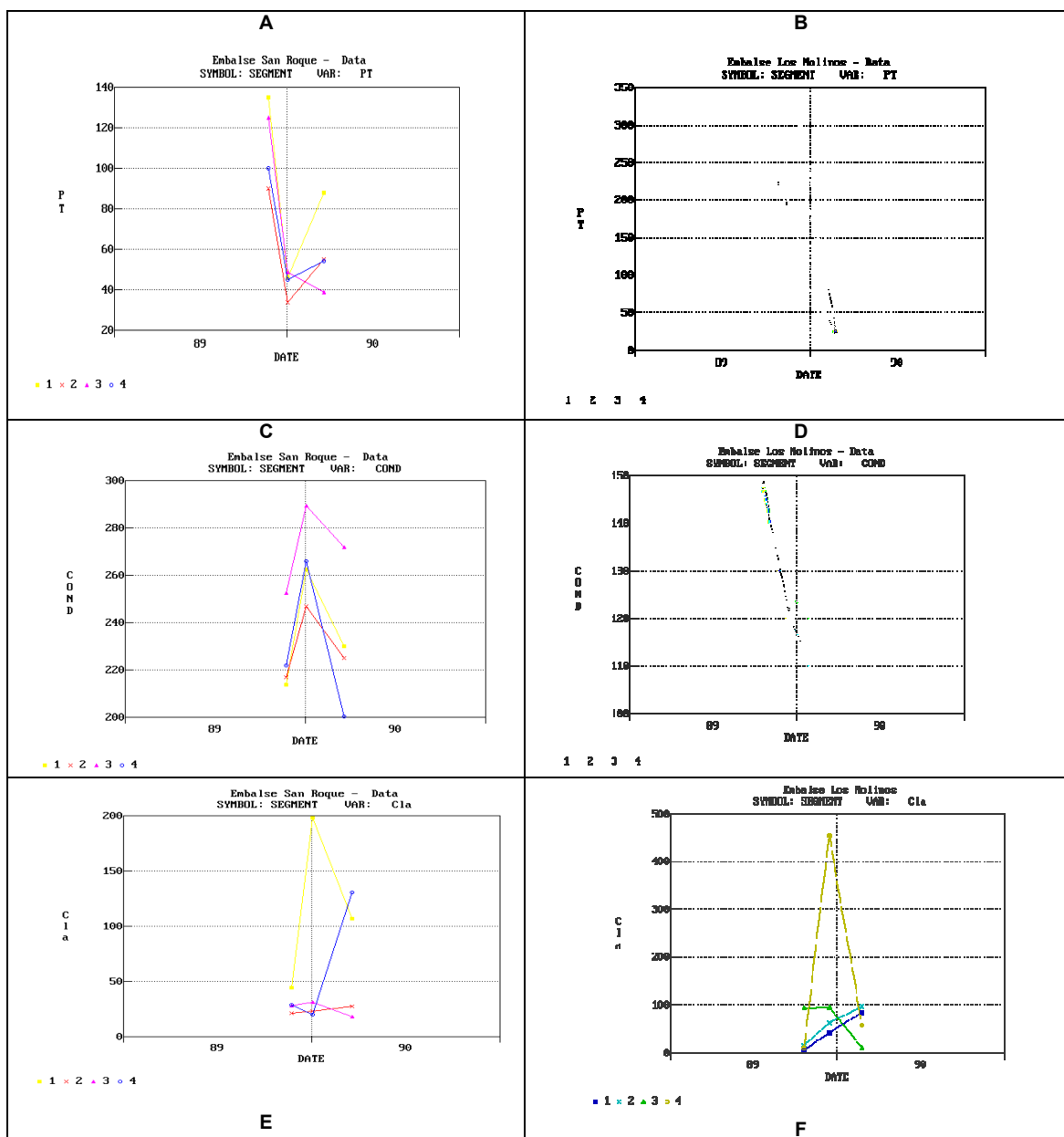


Fig. N° 5: Variación temporal del fósforo total, conductividad y clorofila a para ambos embalses *por falencias del software para todas las graficas los años 89 y 90 corresponden a los años 99 y 00 respectivamente.

SEDIMENTOS, CATIONES Y ANIONES

Las implicancias que tiene el análisis de sedimentos son muy importantes. Cuando los sedimentos están saturados en fosfatos, su liberación puede ser significativa y el retraso de la respuesta a una medida de control basada en la reducción de cargas externas de fósforo (debido a la adsorción y la unión química del fosfato a los sedimentos) puede abarcar un período de varios años, indicando que se deben sumar otras medidas de control (5).

Si bien aún no se dispone de los resultados de análisis de sedimentos extraídos, el color oscuro tanto en el centro como en la garganta del embalse San Roque, serían un indicio de las condiciones eutróficas del embalse. Esto se sustenta en que cuando el oxígeno es

insuficiente para oxidar la materia orgánica acumulada, ésta permanece en forma reducida en el sedimento que toma color negro (4).

Los valores de aniones y cationes para ambos embalses son coincidentes con los reportados por (2), para las mismas épocas de muestreo (Figura N° 6).

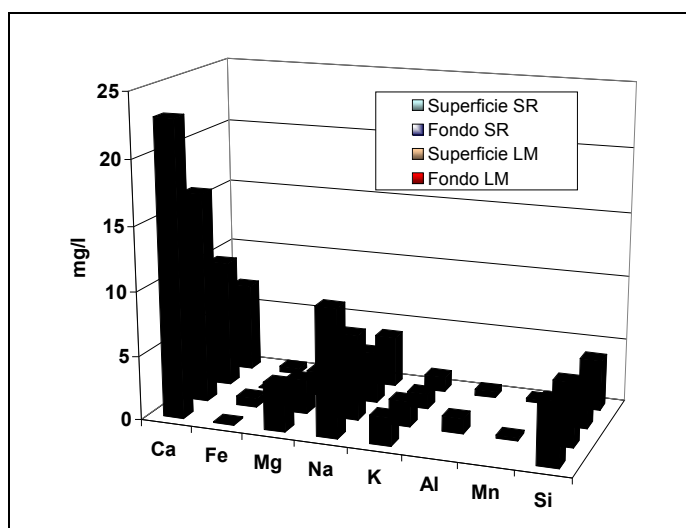


Fig. N° 6: Concentración de cationes en ambos embalses en superficie y fondo.

FITOPLANCTON Y CLOROFILA a

En ambos embalses se detectaron floraciones del dinoflagelado *Ceratium sp.* El rápido incremento en su número puede provenir de las fases enquistadas que se acumulan en gran cantidad en el fondo, y su presencia en mayor cantidad en las áreas de desembocaduras podría tener relación con la carga de nutrientes aportadas por dichos afluentes. En el embalse Los Molinos este evento se produjo en diferentes áreas. Inicialmente se manifestó en la desembocadura del río San Pedro y centro. En la segunda campaña se presentaron en el centro, desembocadura del río San Pedro y garganta, acompañado de altos valores de clorofila a (Figura N° 7A) y en la última campaña su presencia fue dominante en la desembocadura del río Los Reartes y del Medio, centro y garganta. *Ceratium sp* se presentó asociado a las crisófitas *Melosira sp*, *Cymbella sp*, *Navícula sp*, y la clorófitas *Monoraphydium sp*. En la última campaña *Ceratium sp* apareció acompañado por la cianófitas *Anabaena spiroides* en la desembocadura del río San Pedro y el centro del cuerpo de agua.

En el embalse San Roque, en Noviembre ,la comunidad fitoplanctónica mostró una distribución homogénea en toda su extensión, con la presencia dominante de *Ceratium sp* asociada a clorófitas, principalmente *Monoraphydium sp* y en muy bajo número *Staurastrum sp*, *Coelastrum sp* y *Pediastrum sp*. La crisófitas *Melosira sp* también estuvo presente. En Enero, *Ceratium sp* continúa siendo dominante, principalmente en la desembocadura del río San Antonio, en esta campaña se detectó la presencia de las cianófitas *Mycrocistis aeruginosa* y *Anabaena spiroides*, las crisófitas *Melosira sp* y en muy poco número *Cyclotella sp.*, las clorófitas *Staurastrum sp*, *Pediastrum sp*, y *Coelastrum sp*. En la última campaña el mayor porcentaje de org/l se observa en la entrada del río San Antonio y en la garganta siendo *Ceratium* dominante asociada a crisófitas y clorófitas con pocas especies (Figura N° 7B).

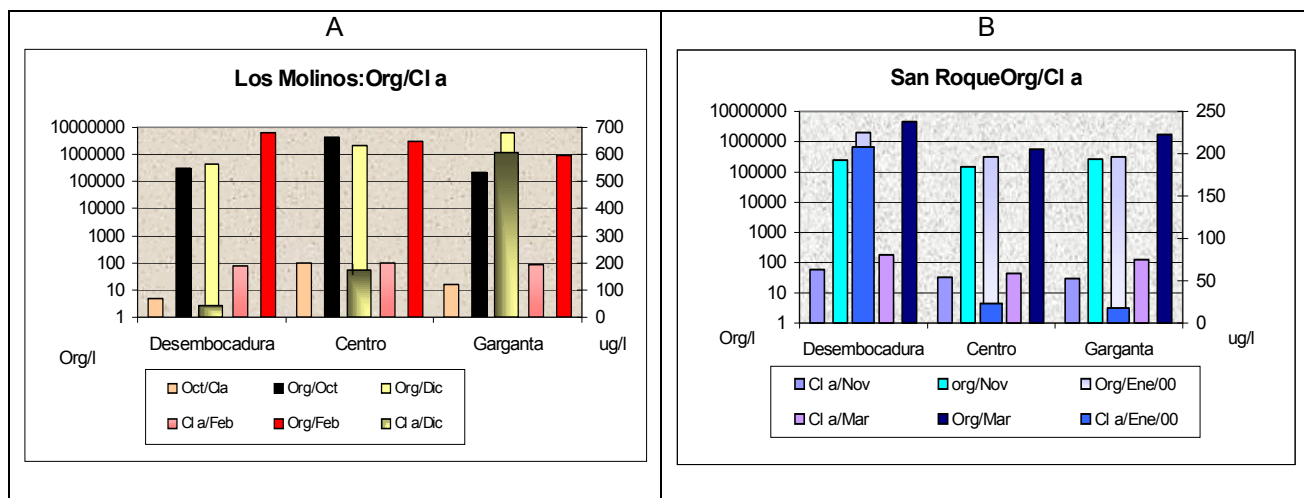


Fig. N° 7: Concentración fitoplanctónica y de clorofila a en ambos embalses

BACTERIAS COLIFORMES TOTALES Y FECALES

Realizando una comparación de los dos embalses analizados, en lo que respecta a la carga de bacterias coliformes totales y fecales, tanto en agua como en sedimentos, se desprende que el embalse San Roque presenta una contaminación permanente, siendo la zona de mayor nivel la desembocadura del río San Antonio (Figura N° 8). El embalse Los Molinos muestra contaminación luego del período de lluvias y con valores muy inferiores con respecto a los del embalse San Roque. La confluencia de los ríos Los Reartes y Del Medio, y del río Los Espinillos, fueron las zonas de mayor aporte de bacterias coliformes, coincidiendo con el área de pastoreo.

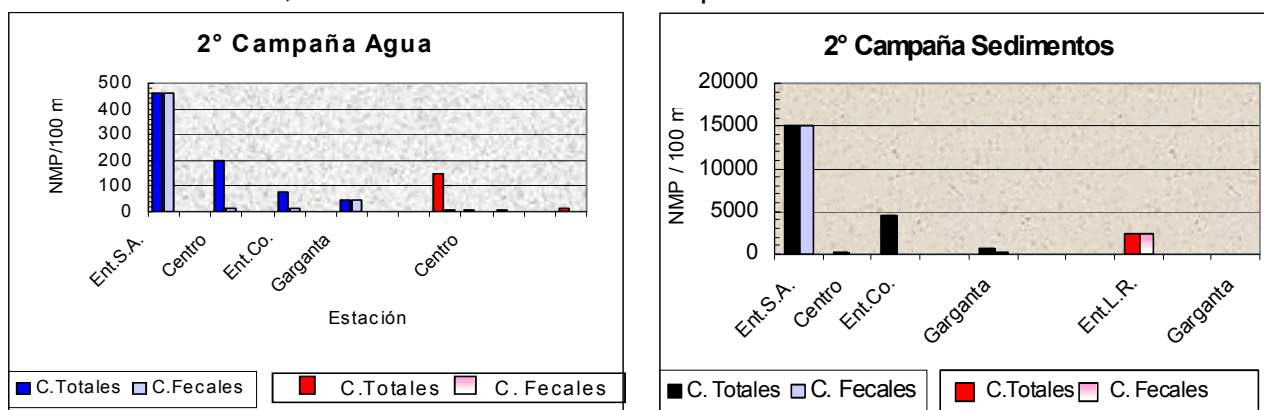


Fig. N° 8: Concentración bacteriológica en agua y sedimentos en Embalse San Roque y Los Molinos.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En ambos embalses se observaron características que afirman sus condiciones eutróficas. Es notable la sobresaturación de oxígeno en superficie como resultado de la acción fotosintética, anoxia hipolimnética, altas concentraciones de nutrientes, clorofila a, baja transparencia y una marcada disminución en la diversidad fitoplanctónica.

El crecimiento excesivo de algas dinoflageladas del género *Ceratium sp.*, tuvo una distribución no homogénea en los dos cuerpos de agua con un aumento de la turbidez en

los sectores de mayor densidad con el consecuente deterioro de ambos recursos.

La mayor concentración de bacterias coliformes reportadas en el embalse San Roque se condice con las características de sus fuentes contaminantes, siendo el aporte de efluentes cloacales de mayor magnitud en comparación al embalse Los Molinos.

Ambos estudios se encuentran en ejecución a los fines de aplicar el modelo de eutrofización BATHTUB y mejorar el conocimiento de ambos embalses para establecer relaciones entre las variables físico-químicas, y biológicas, tanto en agua como en sedimento.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la DiPAS, Lab. de Hidráulica y Depto de Química Industrial y Aplicada de la F.C.E.F. y N. de la U.N.C., CIRSA (INA), Fac. de Cs Químicas, CEPROCOR, Dirección Provincial de Minería, Lab. de Edafología de F.C.A. de la U.N.C., (Club Aeropuerto, Club Bahía Thonon y Cuerpo Especial de Policías de Villa Carlos Paz, por la valiosa colaboración brindada.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) APHA, AWWA, WEF (1995): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18 th edition, Washington, D.C.
- (2) Bonetto, A.A. *et al.* (1976) *Caracteres Limnológicos de Algunos Lagos Eutróficos de Embalse de la Región Central de la Argentina*, Ecosur 3 (5) 47:120.
- (3) Cossavella, *et. al* (2000): *Monitoreo y análisis preliminar de la calidad del agua del Embalse Los Molinos I*, XVIII Congr. Nac. del Agua
- (4) Margalef, R., (1983): *Limnología*- Ediciones Omega, S. A., Barcelona.
- (5) Ryding y Rast (1992): *El control de la eutrofización en lagos y pantanos*, Ediciones Pirámide S.A., Madrid.
- (6) Rodríguez, *et. al* (2000): *Estudios preliminares de la calidad de agua y sedimentos del embalse San Roque relacionados al proceso de eutrofización*, XVIII Congr. Nac. del Agua.
- (7) Ruibal *et al* (2000): *Monitoreo ambiental y caracterización limnológica de un cuerpo de agua eutroficado: Lago San Roque (Cba)*, XVIII Congr. Nac. del Agua.
- (8) Straskraba, M.; Tundisi, J.G.; Duncan, A. (1993) *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands 290pp.
- (9) Walker, W. (1996): *Simplified Procedures for Eutrophication Assessment and Prediction: User Manual*, U. S. Army Corps of Engineers, Washington.