

EVALUACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE DOS LAGUNAS PAMPEANAS (ARGENTINA)

VANESA Y. BOHN¹, MARÍA C. PICCOLO^{1,2}, PAULA D. PRATOLONGO^{2,3}
Y GERARDO M.E. PERILLO^{2,4}

RESUMEN

El principal objetivo de este estudio fue evaluar el estado trófico, describir la concentración de nutrientes y algunas variables ambientales en las lagunas Unamuno y Calderón (provincia de Buenos Aires, Argentina) durante tres y dos años, respectivamente. Las concentraciones de nitratos, nitritos, fosfatos, silicatos, materia orgánica particulada y clorofila «a» fueron determinadas en laboratorio a partir de muestras de agua superficial. Los parámetros físicos fueron medidos in situ y los morfométricos fueron estimados a partir de imágenes satelitales. La calidad del agua de las lagunas fue determinada a partir de su estado trófico. Este último, fue estimado de acuerdo al índice de Carlson sobre la base de valores de clorofila «a».

A lo largo del periodo estudiado, se caracterizó a las lagunas Unamuno y Calderón como oligohalina y mesohalina, respectivamente. Las concentraciones de fosfatos fueron altas en ambas lagunas, en comparación con los valores hallados en otras lagunas pampeanas. Las concentraciones de amonio y nitrato fueron predominantes en relación a los nitritos. De acuerdo a su estado trófico, la calidad de agua de ninguna de las dos lagunas es aceptable para producción de agua potable y natación.

Palabras clave: Distribución temporal de nutrientes, imágenes satelitales, calidad del agua.

SUMMARY

The main purpose of this study was the trophic state evaluation and the nutrients description in two shallow template lakes: Unamuno and Calderón (Buenos Aires province, Argentina) during three and two years, respectively. Nitrate, Nitrite, Phosphate, Silica, organic particulate matter and chlorophyll-a concentrations from surface water samples were obtained in laboratory. Physical parameters were measured in situ. Morphometric data were obtained from satellite data processing.

¹ Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur (UNS) 12 de octubre y San Juan. 4º Piso. (8000) Bahía Blanca, Argentina. Autor para correspondencia: vanesa.bohn@uns.edu.ar; vbohn@criba.edu.ar.

² CONICET - Instituto Argentino de Oceanografía (IADO). CC 804 B8000FWB Bahía Blanca. Argentina.

³ Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia, UNS. San Juan 670. 2º Piso. (8000) Bahía Blanca, Argentina.

⁴ Departamento de Geología, UNS. San Juan 670. 1º. Piso. (8000) Bahía Blanca, Argentina.

Water quality of shallow lakes was determined based on their trophic state. The aforementioned, was estimated according to the Carlson Index on chlorophyll-a values. Unamuno and Calderón shallow lakes were characterized as oligohaline and mesohaline water bodies, respectively.

Phosphate concentrations were relatively high in both lakes when compared with mean values in Pampean shallow lakes. The ammonium and nitrate concentrations were prevalent among the nitrogen components. According to the trophic state, the shallow lake water quality is neither acceptable for drinking water production nor for swimming purposes.

Key words: Temporal nutrients distribution, satellite data, water quality.

INTRODUCCIÓN

El concepto de estado trófico ha sido desarrollado extensivamente para lagos y principalmente relacionado con la calidad de las aguas. El estado trófico se relaciona con la biomasa algal, el contenido de nutrientes y la transparencia del agua (DODDS 2007). Los procesos de eutrofización son particularmente complejos en lagos someros debido a la interacción agua-tierra, aire-agua y agua-sedimentos (QUINN & SELLINGER 2007).

Los lagos y pantanos pueden clasificarse en términos generales en oligotróficos (del griego «poco alimento») o eutróficos (del griego «bien alimentado»). Estos términos fueron utilizados originalmente para describir la fertilidad del suelo de turberas aunque con posterioridad, fueron aplicados a lagos. Actualmente, estos términos se utilizan para denotar la situación de la cantidad de nutrientes en una masa de agua o para describir los efectos de los nutrientes en la calidad del agua para diversos usos (RYDING & RAST, 1992). Asimismo, la eutrofización es uno de los problemas medioambientales más conocidos en cuerpos de agua, como resultado de acciones antropogénicas que provocan enriquecimiento de nutrientes, fósforo y nitrógeno (UNEP-IETC/ILEC 2001).

El enriquecimiento excesivo en nutrientes de las aguas de superficie necesariamente conduce al cambio de la estructura y funcionamiento de los ecosistemas acuáticos y al deterioro de la calidad del agua. Entre los cambios

estructurales producidos por la eutrofización es de destacar el dominio de la principal comunidad de productores pelágicos de lagos y embalses, el fitoplancton, por parte de las cianobacterias (QUIRÓS 2004).

Un gran número de indicadores, índices y modelos han sido desarrollados con el objetivo de asesorar acerca del estado trófico y de la calidad de las aguas (RICHARDS 1954; CARLSON 1977; OCDE 1982). La mayoría de ellos, se basan en aspectos físicos, biológicos o químicos del agua (turbidez, concentración de clorofila y nutrientes, composición del fitoplancton). Debido al incremento del desarrollo agrícola y urbano, ha aumentado el interés por el conocimiento acerca de fuentes de agua disponible para diversos usos y aplicaciones (ejemplo: riego suplementario). Como consecuencia de ello, el interés por el monitoreo de la hidrología y calidad de aguas de cuerpos de agua naturales y artificiales, ha ido en incremento.

En el área de estudio (Figura 1), en la región pampeana Argentina, las actividades agropecuarias han sido y son el principal factor modificador de pastizales y humedales. Estos han sufrido importantes cambios a través de la erosión de suelos y sedimentación en el humedal, regulación de arroyos, canalizaciones y desecamiento de tierras anegadizas, urbanización, y culminando con la eutrofización de las aguas de superficie. Los lagos de dicha región son someros, polimícticos, y altamente fluctuantes en salinidad y tiempo de renovación de agua en función de los ciclos de se-

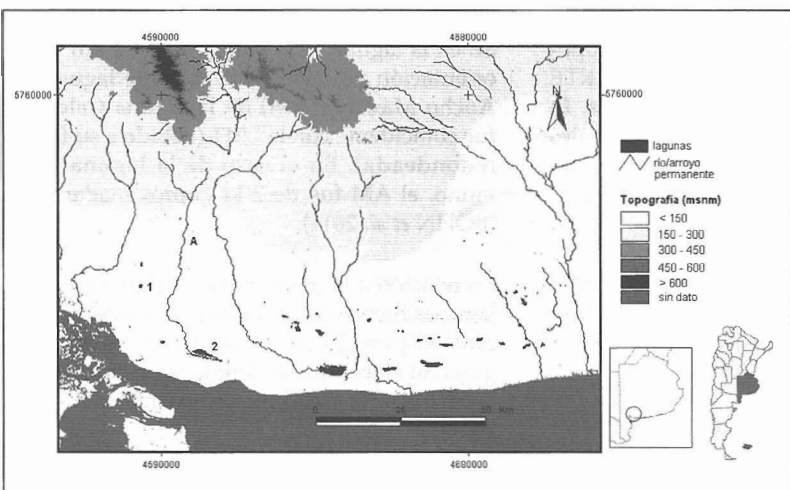


Figura 1. Localización del área de estudio en la provincia de Buenos Aires: 1) Laguna Calderón; 2) Laguna Unamuno; A) Arroyo Napostá Chico.

Figure 1. Localization of the study area in Buenos Aires province: 1) Calderón shallow lake; 2) Unamuno shallow lake; A) Napostá Chico river.

quía-inundación característicos de la región. Constituyen el componente central del humedal pampeano y sus drenajes se sitúan sobre suelos de alto potencial productivo (QUIRÓS *et al.* 2002). La gran mayoría de las lagunas presentan una hidroquímica altamente variable, mientras que las lagunas más salinas se sitúan en las cuencas hidrológicamente más aisladas (QUIRÓS & DRAGO 1999). Su concentración salina permite clasificarlas como lagos subsalinos y salinos (RINGUELET 1967) y, en algunos casos, como lagos de agua dulce. Su hidrología se ve afectada por el relieve estrictamente llano por lo que es altamente dependiente de las precipitaciones *in situ*. En las áreas menos salinas y con menor desarrollo humano, la vegetación arraigada generalmente cubre la superficie de las lagunas (QUIRÓS *et al.* 2002).

Las condiciones ecológicas de las lagunas del área de estudio han sido estudiadas mediante métodos tradicionales de evaluación de calidad de aguas (RINGUELET *et al.* 1967; GABELLONE *et al.* 2000; QUIRÓS *et al.* 2002a), dinámica estacional de características físicas (TORREMOREL *et al.* 2007), caracterización del fitoplancton (ANDRADE *et al.* 2007) y zooplancton (CLAPS *et al.* 2004; GARIBOTTI *et al.* 2009) así como también mediante las técnicas que involucran información proveniente de

sensores remotos y modelos específicos de calidad de aguas (GERALDI *et al.* 2007).

El balance hídrico de las lagunas de llanura estudiadas se encuentra afectado por la alternancia de períodos de déficit y exceso de precipitaciones típicos de la región. Como consecuencia, los cuerpos de agua presentan una gran variación morfométrica así como también en lo que respecta a la calidad de sus aguas (procesos de dilución-concentración de nutrientes). Este último aspecto se ve afectado por la intensidad del uso antrópico de la zona. El uso del suelo del área circundante a las lagunas es predominantemente agrícola, y por ende, la demanda de aguas superficiales para irrigación es creciente. El objetivo de este estudio es evaluar, comparativamente, el estado trófico de las lagunas y describir las diferentes variables físicas y químicas en relación a la calidad de agua de dos lagunas de zona templada: Unamuno y Calderón (provincia de Buenos Aires, Argentina) durante tres y dos años, respectivamente.

ÁREA DE ESTUDIO

La región pampeana argentina contiene un número elevado de lagunas de diferentes extensiones. Entre los aspectos físicos de la re-

gión, se destaca la presencia de planicies continentales y litorales con una pendiente topográfica menor a 4° (GONZÁLEZ URIARTE 2002) y patrones de drenaje dendríticos. El clima es templado con precipitaciones anuales entre 650-800 mm. La temperatura media es de 12° C, con máximas de 25° C y mínimas de 6° C aproximadamente (CAMPO *et al.* 2004). La agricultura es la actividad económica predominante por lo que el uso de la tierra en el área incluye zonas de cultivo y las prácticas ganaderas sobre pasturas naturales (CENSO NACIONAL AGROPECUARIO 2006).

Las lagunas Unamuno y Calderón (Fig. 1) se localizan en la subregión de la pampa austral, donde predomina la población de tipo rural. En este sector, tanto la agricultura como la ganadería presentan características de alta productividad (siembra directa, uso de fertilizantes) y patrones de producción más cercanos a los industriales que a los agropecuarios tradicionales (VIGLIZZO *et al.* 2005).

Sus características físicas (escasa profundidad, morfometría variable) las definen como típicas lagunas pampeanas por lo que su hidrografía fue estudiada como caso representativo de las lagunas del área de estudio. Las cuencas hidrográficas de las lagunas Unamuno y Calderón poseen 1341 km² y 132 km², respectivamente. La primera de ellas recibe el aporte del arroyo Napostá Chico (Fig. 1), con una descarga media de 0.8 m³/s (MELO & ZINGER 1996). La laguna Calderón no posee aportes superficiales.

Las lagunas Unamuno y Calderón, presentan una profundidad media de 1.30 y 0.25 m, respectivamente. El cálculo del Desarrollo de Línea de Costa (DLC) para ambas lagunas determinó que la laguna Unamuno presenta forma alargada (DLC > 10) mientras que la laguna Calderón se caracterizó por sus formas redondeadas (DLC < 2) (BOHN *et al.* 2011). En épocas de pluviometría normal, la laguna Unamuno presenta un área de 9.20 km² mientras que la laguna Calderón, 1.03 km² (aproximadamente 8.9 veces menor al área de la laguna Unamuno). La Longitud Máxima Total

(LMT) es de 6.12 km con una orientación NO-SE en la laguna Unamuno y de 1.22 km y con orientación variable en la restante laguna. El Ancho Máximo (AM) de la laguna Calderón fue coincidente con la LMT (debido a su forma redondeada). En el caso de la laguna Unamuno, el AM fue de 2 km aproximadamente (BOHN *et al.* 2011).

En relación a la permanencia del agua, ambas lagunas fueron consideradas permanentes durante el período 1998-2007. Sin embargo, ninguna de ellas es considerada de esta forma en la bibliografía y cartografía existentes (BOHN 2009).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizó la información pluviométrica correspondiente a dos localidades cercanas a las lagunas para el período 2004-2007. Sobre la base de registros pluviométricos anuales correspondientes al período 1970-2000, se calculó el valor normal (media anual histórica) de precipitación para la determinación de años normales (precipitación anual ~ normal), secos (precipitación anual < normal) y húmedos (precipitación anual > normal). Los registros de precipitación correspondientes al período 2004-2007 fueron cedidos por el INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). La batimetría en la laguna Unamuno fue realizada mediante una eco-sonda Bathy-500 MF y una escala graduada en el caso de la laguna Calderón (posicionada con GPS). Los mapas batimétricos fueron realizados mediante interpolación en el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 9.1. La cartografía y análisis de la variabilidad de los cuerpos de agua superficial se realizaron a partir de las escenas de imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+ (Resolución Espacial 30 m), path/row 226/087. Según el protocolo de procesamiento establecido en la Figura 2, sobre cada imagen se aplicó una corrección geométrica y se efectuaron las correcciones radiométricas propuestas por SONG *et al.* (2001) antes de clasificar las áreas ocupadas por agua para cada fecha.

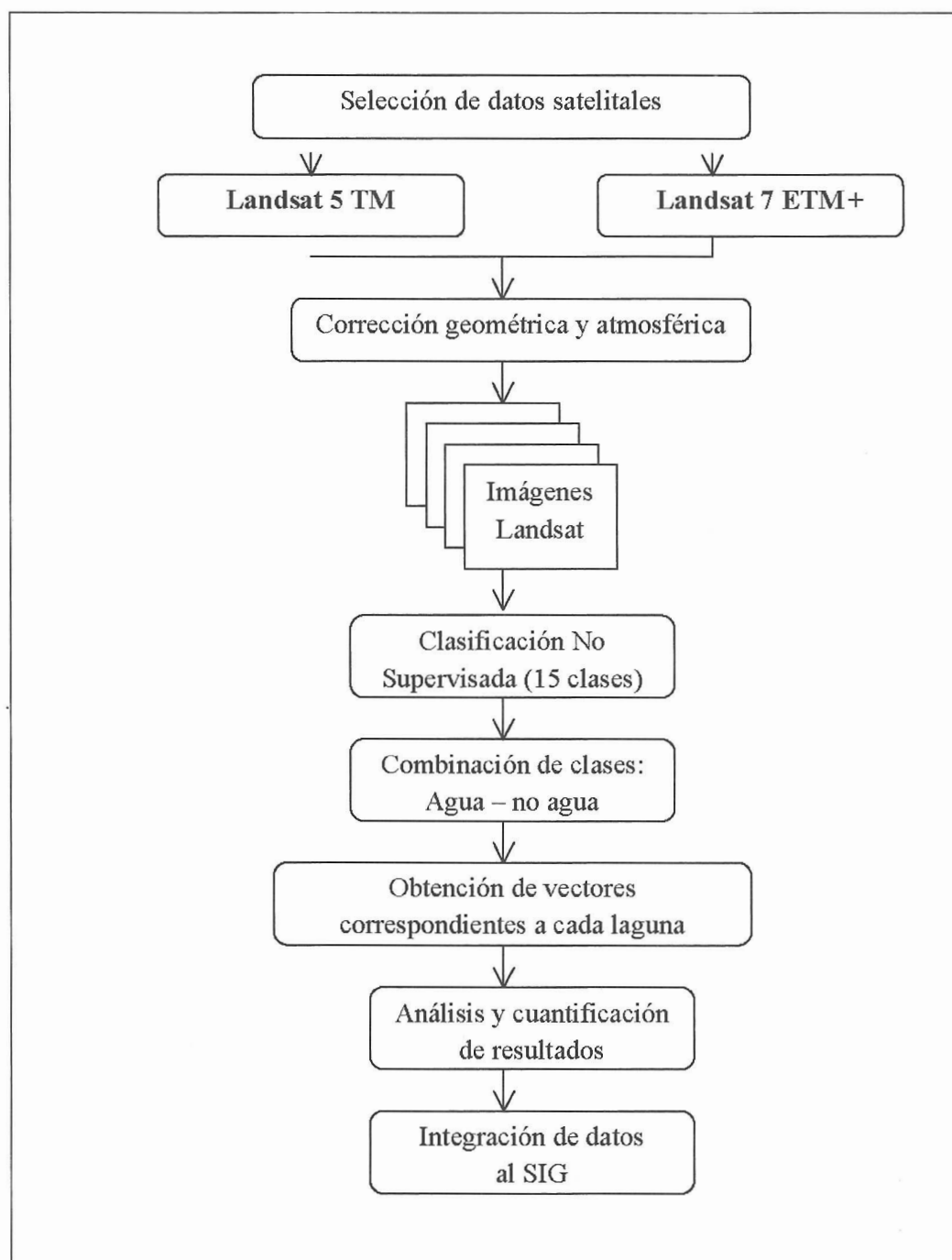


Figura 2. Protocolo de procesamiento para la determinación de áreas de las lagunas durante el período 2004-2007.

Figure 2. Processing protocol to determine the shallow lakes area during the period 2004-2007.

Las muestras superficiales de agua destinadas a la determinación de nutrientes y clorofila «a» fueron colectadas mediante el uso de una botella van Dorn en sitios de muestreo distribuidos de manera uniforme. Los muestreos se realizaron con una frecuencia de 35-50 días durante los períodos abril de 2004 a abril de 2007 en la laguna Unamuno y mayo de 2005 a abril de 2007 en la Calderón. Las muestras fueron mantenidas en oscuridad a 4°C y analizadas dentro de las 24:00 h de su recolección.

La determinación de la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos se realizó en forma automática usando un autoanizador automático Autoanalyzer Technicon II. El analizador consta de cuatro canales (para la determinación de nitrato, nitrato, fosfato y silicatos) y fue ampliado a cinco canales (para la determinación de amonio). Estas determinaciones se realizaron mediante las siguientes técnicas:

- **Fosfatos** (PO_4^{3-}): EBERLEIN *et al.* 1987.
- **Nitratos** (NO_3^-): TREGUER & LE CORRE 1975.
- **Nitritos** (NO_2^-): GRASSHOFF *et al.* 1983.
- **Silicatos** (SiO_4^{2-}): Technicon AutoAnalyzer II. Method 186-72W/B.

El contenido de pigmentos fotosintéticos (Clorofila «a») se determinó de acuerdo al método espectrofotométrico recomendado por APHA (1998) sobre muestras filtradas previamente con un filtro Whatman GF/C. El contenido de materia orgánica en el material particulado en suspensión se determinó siguiendo el método descrito por STRICKLAND & PARSONS (1968).

Las mediciones de temperatura del agua (°C), oxígeno disuelto (mg/L), pH y conductividad eléctrica (CE) (mS/cm) se realizaron in situ mediante un sensor Horiba U-10 y la transparencia del agua fue estimada mediante un disco Secchi. Finalmente, el estado trófico de ambas lagunas fue estimado mediante el Índice de Estado Trófico (en inglés, Trophic State Index: TSI) (CARLSON 1977)

$$\text{TSI}_{\text{Cl}} = 10(2.46 + (\ln \text{Cl} / \ln 2.5))$$

donde Cl: clorofila «a» en superficie (mg/m³).

Este índice varía de 0 a 100: <30 oligotrófico; 30-60 mesotrófico, 60-90 eutrófico; >90 hipereutrófico. La estimación de la aptitud del agua se realizó a partir de las determinaciones de usos del agua de un lago/pantano en función de las condiciones tróficas definidas por RYDING & RAST (1992). La interpretación estadística de los datos se realizó mediante el software XLSTAT2008 (versión de prueba; Addinsoft, New York, USA).

RESULTADOS

Con respecto al régimen de precipitaciones, el año 2004 fue caracterizado como año húmedo, los años 2005 y 2006 como años secos y el año 2007 como año normal. Durante el período de estudio se observó una fuerte variación interanual de la precipitación y ésta se vio reflejada en cambios en la extensión areal del espejo de agua de las lagunas. El área media de las lagunas durante un período de precipitación normal fue de 12.70 y 1.14 km² en Unamuno y Calderón, respectivamente, siendo sus profundidades medias 1.30 y 0.25 m. Las máximas profundidades fueron 3.50 y 1.20 m, en Unamuno y Calderón, respectivamente. En cuanto a la variabilidad del área de las lagunas, se obtuvo un área máxima durante las estaciones de otoño-invierno de 2004 y primavera de 2007 en las lagunas Unamuno (área = 20 km²) y Calderón (área = 1.25 km²), respectivamente. En cuanto a las extensiones areales mínimas, se registraron durante el verano de 2007 en ambas lagunas alcanzando los 11.20 km² en la laguna Unamuno y los 0.91 km² en la laguna Calderón.

Además de la variabilidad interanual, se observaron ciclos anuales de cambio en el área de los espejos de agua, asociados a variaciones estacionales en la precipitación y la temperatura. Las mínimas precipitaciones durante el año 2004 fueron observadas durante el mes de mayo (Fig. 3) período en el que también se observaron las áreas mínimas para ambas lagunas (área laguna Calderón = 0.38 km²; área laguna Unamuno = 9.11 km²). En el caso de la laguna Unamuno este período mostró valores

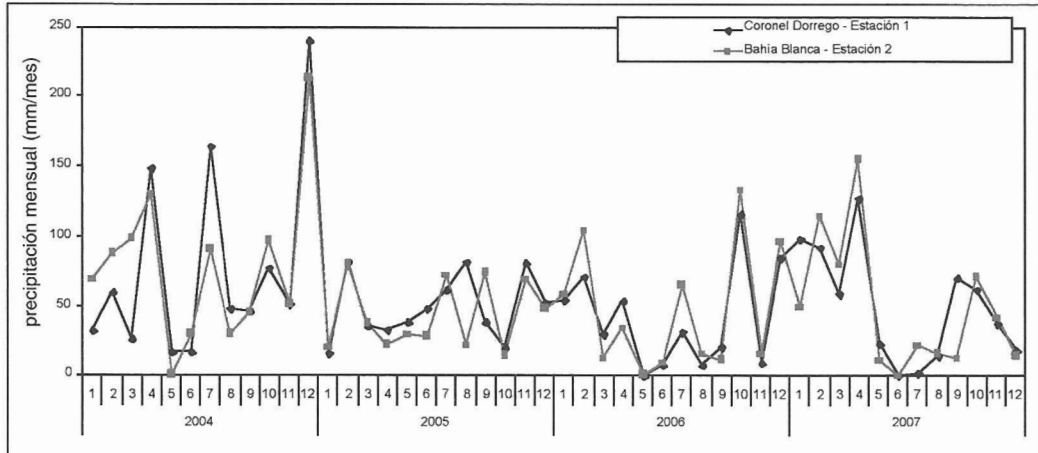


Figura 3. Variación de la precipitación para las dos estaciones analizadas del área de estudio durante el período 2004-2007

Figure 3. Precipitation variation in two analyzed stations in the study area during the 2004-2007 period.

de escasa transparencia del agua. El mismo fenómeno fue observado durante el año 2006 (Fig. 4), con las mínimas áreas lagunares registradas durante los meses de verano e invierno, en coincidencia con los periodos de menores precipitaciones y balances hídricos negativos. Durante el año 2007, las áreas lagunares mínimas fueron observadas durante los meses de enero y marzo, en coincidencia con los períodos de mayor evaporación y elevada temperatura (Fig. 4).

En la laguna Unamuno, las temperaturas máximas y mínimas fueron 23.08 °C (febrero de 2005) y 6.82 °C (junio de 2005), con un valor medio de 15.28 °C (± 5.41). En la laguna Calderón, los valores extremos de temperatura fue-

ron de 23.10 °C (diciembre de 2005) y 5.03 °C (junio de 2006) con un valor medio de 14.88 °C (± 5.61) (Tabla 1). En ambos casos, el oxígeno en superficie se relacionó en forma no lineal con la temperatura de las aguas superficiales debido a la solubilidad del elemento. La conductividad eléctrica (CE) durante el período fue inferior a 10 mS/cm en Unamuno (oligohalina) y en Calderón osciló entre 9 mS/cm y 35 mS/cm (mesohalina). La ocurrencia de mínimos y máximos en la CE se relacionó con las variaciones extremas en los tamaños del espejo de agua. Por ejemplo, la CE aumentó durante el año 2006, especialmente en Calderón. Simultáneamente el área de las lagunas disminuyó respecto de los años anteriores (aproximadamente -20 y -27% para Calderón y Una-

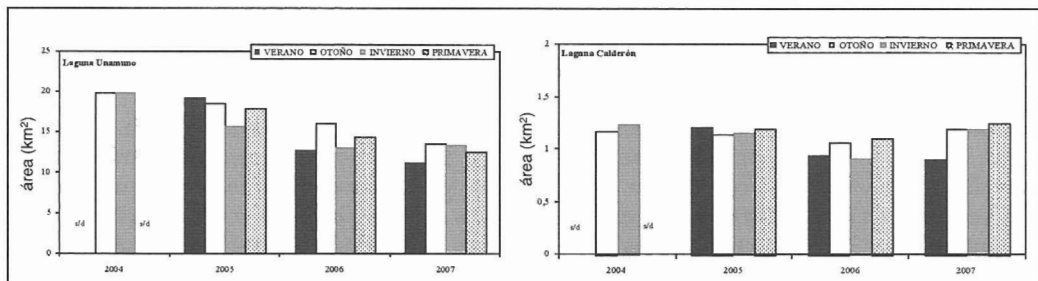


Figura 4. Variación estacional del área de las lagunas durante los años estudiados.

Figure 4. Areal seasonal variation in both shallow lakes during the studied years.

	Laguna		Laguna		Laguna	
	Unamuno	Calderón	Unamuno	Calderón	Unamuno	Calderón
Variable	valor medio		mínimo		máximo	
Disco Secchi (m)	0,21	0,10	0,05	0,02	0,33	0,30
Cond. Eléctrica (mS/cm)	6,61	19,99	4,19	9,18	10,00	34,40
pH	9,66	9,73	8,13	8,18	11,12	10,72
Z (m)	1,45	0,61	0,40	0,15	3,20	2,17
Temperatura del agua (°C)	15,28	14,88	6,82	5,03	23,08	23,10

Tabla 1. Variables abióticas de las lagunas Unamuno y Calderón. Valores promedio, mínimos y máximos para el período estudiado.

Table 1. Abiotic variables in the Unamuno and Calderón shallow lakes. Mean, minimum and maximum values during the studied period.

munio, respectivamente), sugiriendo procesos de concentración de la CE del agua en estos sistemas acuáticos pampeanos.

Los valores máximos de fosfatos, al igual que su variación a lo largo del período estudiado, fueron mayores en Calderón. En dicha laguna (Calderón), se registró un período de mayores concentraciones para las mediciones realizadas durante los meses de noviembre y diciembre de 2006 y febrero de 2007. Durante este último mes las concentraciones alcanzaron los 825.7 $\mu\text{mols/L}$, lo cual habría sido consecuencia de las escasas precipitaciones de los meses anteriores y los altos valores de evaporación, típicos de la estación estival. El mencionado pico no se observó en la laguna Unamuno (Fig. 5). La laguna Calderón experimentó mayores disminuciones (con respecto a Unamuno) en su profundidad durante los períodos de verano de los años analizados. En este sentido, el mencionado cuerpo lagunar experimentó una mayor influencia de la relación agua-sedimento. En la laguna Unamuno, se destacaron algunas mediciones por su mayor concentración de fosfatos: marzo, mayo, octubre y noviembre de 2006 y marzo de 2007. Para las mediciones que se produjeron en períodos estivales, se encontró una correlación de dichas concentraciones de fosfatos con períodos de concentración de nutrientes (por las elevadas temperaturas) y mayores contenidos de clorofila «a». Esto último podría estar indicando la influencia de la alta productividad fi-

toplancónica en la liberación de los componentes del fosfato a la columna de agua. Un patrón similar fue detectado para los componentes del nitrógeno (Fig. 6), con un pico en la concentración de nitratos y amonios durante el mes de marzo de 2007, lo cual podría responder a períodos de balances hídricos negativos (evaporación-precipitación) durante los meses anteriores en la laguna Calderón. Como en el caso del fosfato, este pico no se observó en la laguna Unamuno. Con respecto a estos componentes, la diferencia más notoria entre ambas lagunas está en su dinámica temporal. En Unamuno, las concentraciones más altas fueron halladas durante 2006, especialmente entre Mayo y Diciembre, luego de un balance negativo entre precipitación y evapotranspiración (Fig. 3 y 6). Por el contrario, en Calderón los máximos valores se dieron en noviembre de 2005 y marzo de 2007, con concentraciones de nitratos como la forma dominante y predominio de balances negativos entre los valores de precipitación y evapotranspiración (Fig. 3). Con respecto a las formas nitrogenadas, la dominante fue el amonio en ambas lagunas.

A pesar de que el amonio podría constituir una buena fuente de nitrógeno para las plantas, y muchas de ellas pueden usarlo en medios alcalinos, la mayoría de las algas y macrófitos se desarrollan mejor usando nitrato para la obtención del nitrógeno, incluso aunque este nitrato deba ser reducido a amonio. Esto es, en parte debido a la toxicidad del NH_4^+ y a

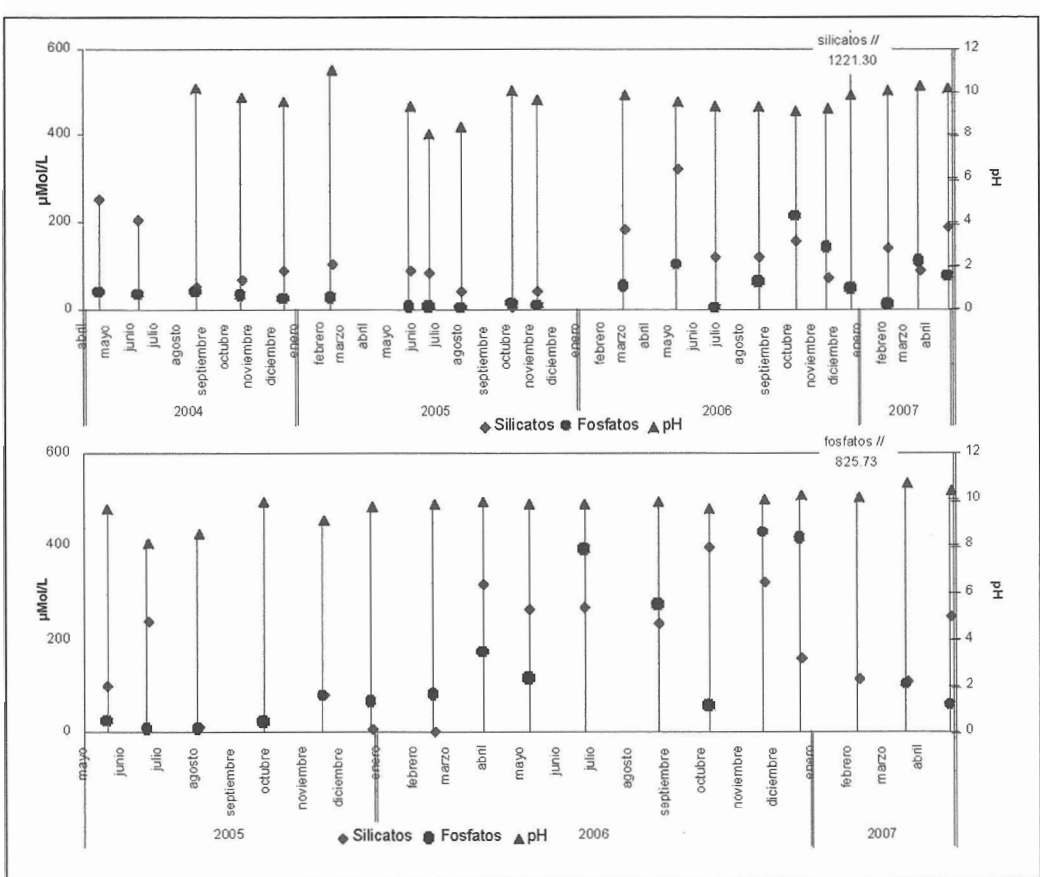


Figura 5. Evolución (según día juliano) de valores medios de concentraciones de fosfatos, silicatos y pH en aguas superficiales de las lagunas Unamuno (superior) y Calderón (inferior).

Figure 5. Evolution (by Julian Day) of mean values of phosphate, silica and pH concentrations in superficial waters, Unamuno (top) and Calderón (down) shallow lakes.

los elevados valores de pH que se dan en ambas lagunas, muy eutróficas durante los períodos de gran intensidad fotosintética. La distribución del amonio en las aguas de las lagunas fue temporalmente variable. El pH de ambas lagunas es alcalino y sus valores oscilaron entre 8 y 11 (Fig. 5).

A diferencia de lo observado en la concentración de nutrientes, los picos máximos en la concentración de clorofila «a» en ambas lagunas ocurrieron en sincronía, alcanzando valores de 326.93 mg/m³ en Unamuno (junio-julio 2005) (estado eutrófico) y 643.76 mg/m³ en Calderón (julio 2005) (estado hipereutrófico).

Estos máximos coincidieron con valores de escasa transparencia del agua (Disco Secchi < 0.2 en ambos casos) y profundidad. Las concentraciones mínimas fueron detectadas en octubre de 2006 en la laguna Unamuno (2.63 mg/m³) y en abril de 2007 en la laguna Calderón (1.48 mg/m³) (Fig. 7). En relación a los valores medios, éstos fueron de 99.85 mg/m³ (indicando un estado eutrófico) (± 78.51) en Unamuno y de 76.54 mg/m³ (indicando un estado eutrófico) (± 155.41) en Calderón.

Durante el período estudiado, ambas lagunas variaron entre los estados eutrófico e hipereutrófico y presentaron una alta variabilidad en la

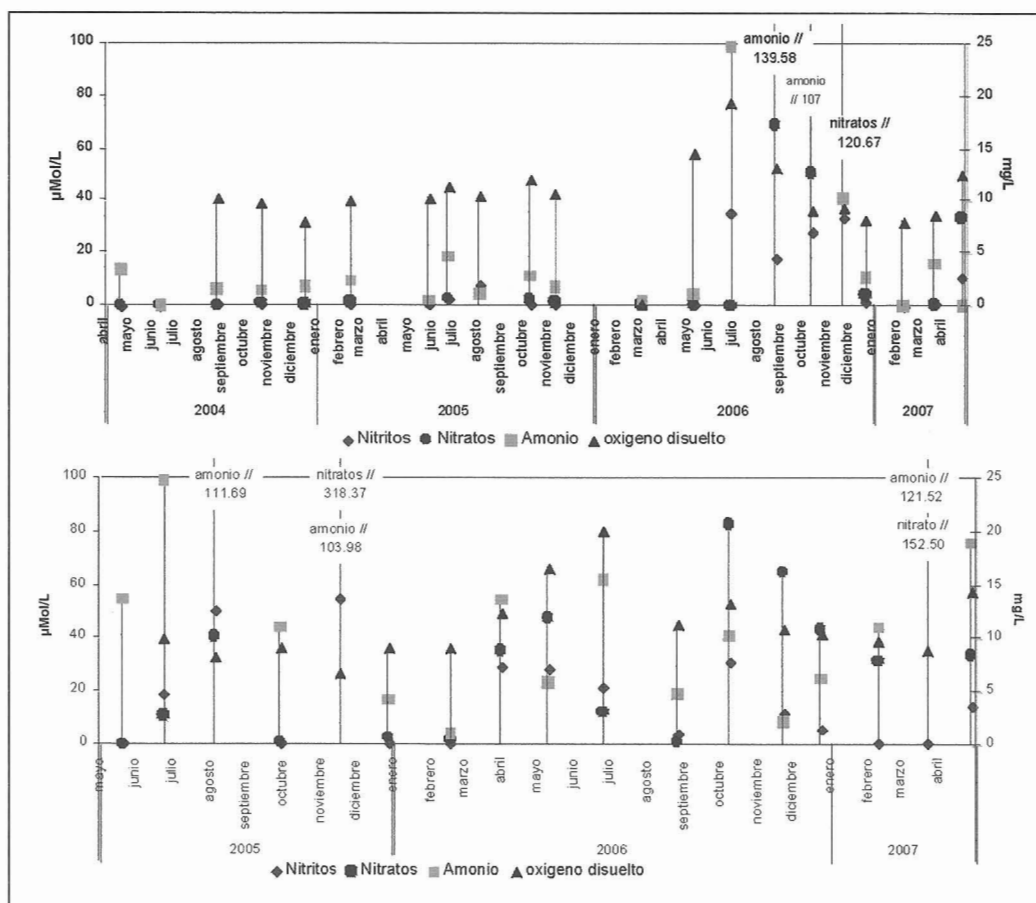


Figure 6. Evolución de valores medios (según día juliano) de concentración de nitritos, nitratos y amonio en aguas superficiales de las lagunas Unamuno (superior) y Calderón (inferior).

Figure 6. Evolution of mean values (by Julian day) of nitrite, nitrate and ammonium concentration in superficial waters, Unamuno (top) and Calderón (lower) shallow lakes.

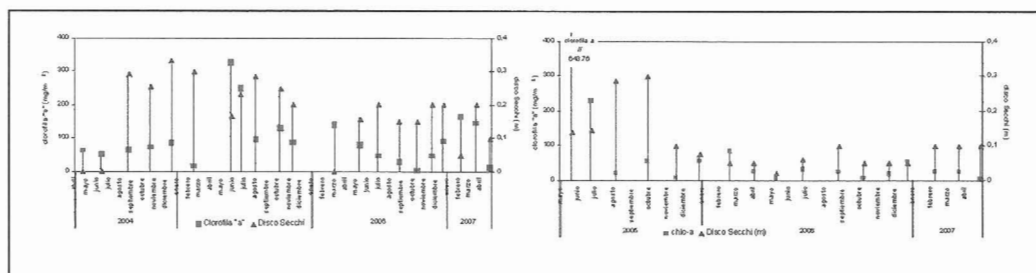


Figura 7. Concentración de clorofila "a" y transparencia (Disco Secchi) (según día juliano) del agua en las lagunas Unamuno (izquierda) y Calderón (derecha)

Figure 7. Chlorophyll-a concentration and water transparency (Secchi Disk) (by Julian Day) in the Unamuno (right) and Calderón (left) shallow lakes.

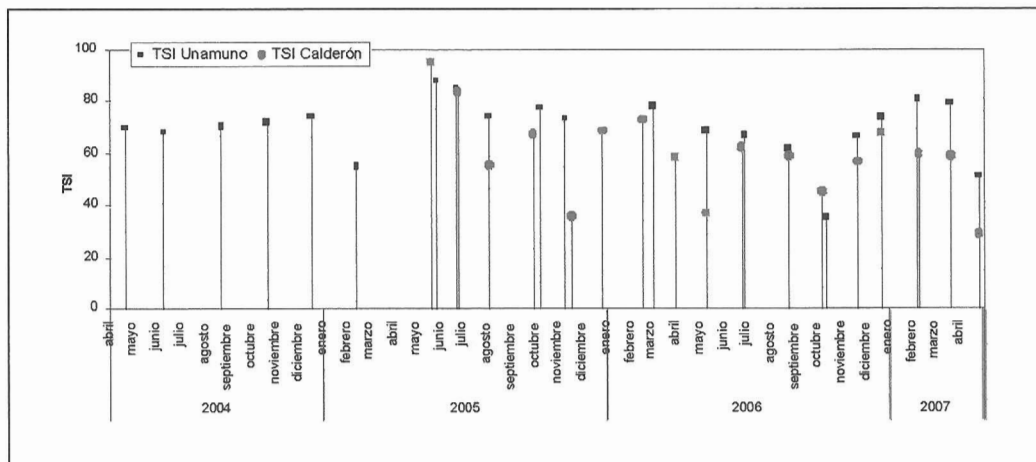


Figura 8. Variación del estado trófico según el TSI (Carlson, 1977) (según día juliano) en las lagunas Unamuno y Calderón
Figure 8. Trophic state variation by TSI (Carlson, 1977) (by Julian Day) relation in Unamuno and Calderón shallow lakes.

concentración de sales disueltas. La laguna Unamuno (Fig. 8) presentó valores medios de TSI siempre superiores a 30, mostrando condiciones de mesotrofia. El análisis estacional del TSI (Fig. 8) mostró el mínimo valor para la laguna Calderón durante el otoño de 2007, alcanzando 28.84 (oligotrofia en el límite con la mesotrofia) en coincidencia con valores medios de transparencia del agua (Disco Secchi = 0.1 m). En el caso de la laguna Unamuno, el mínimo valor de TSI se halló durante la primavera de 2006, con 50.87 (mesotrofia) y escasa transparencia del agua (DS = 0.15 m). Asimismo, ambas lagunas han mostrado grandes variaciones alcanzando extremos de hipereutrofia. Estas variaciones presentaron carácter estacional en la laguna Calderón, mostrando una tendencia de disminución del TSI durante la primavera (2005 y 2006) y un aumento de dicho índice durante los meses de verano (2005 y 2006) (Fig. 8). En el primero de los casos (primavera 2005 y 2006), la calidad del agua de la laguna fue considerada aceptable para el cultivo de peces y la realización de deportes acuáticos mientras que, durante el período estival 2005-2006, la calidad de agua de la laguna Calderón sólo fue apta para la remodelación de zonas de recreo y su utilización para refrigeración (RYDING & RAST 1992). En la laguna Unamuno, el estado trófico mostró menor variabilidad y carencia de patrones es-

tacionales. Los valores de TSI fueron superiores a 60 (lo que indicó un estado eutrófico) durante todo el período excepto en tres ocasiones durante las cuales el estado trófico de las aguas fue mesotrófico: febrero de 2005 (TSI=54.80), octubre de 2006 (TSI=35.15) y abril de 2007 (TSI=51.22). En dichas ocasiones, la calidad del agua de la laguna Unamuno fue considerada apta para el cultivo de peces, para la mejora de aguas profundas y para la producción de agua potable, según los criterios establecidos por RYDING & RAST (1992).

CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación indican que la ausencia de patrones de variación estacionales e interanuales de los parámetros físicos y químicos de las aguas de las lagunas Unamuno y Calderón fueron una consecuencia de las condiciones medioambientales, geomorfológicas e hidrológicas de la región. Las variaciones en el área de las lagunas, el balance entre evaporación y precipitación (fundamentalmente durante períodos estivales), influyeron sobre las concentraciones de los nutrientes, de clorofila «a», de CE así como también en la transparencia del agua.

Sobre la base de las determinaciones de estado trófico y de estudios empíricos en lagos y pantanos de zonas templadas efectuados por RYDING & RAST (1992) se consideró que la calidad de agua de las lagunas mayormente no es aceptable para producción de agua potable. Por el contrario, podría considerarse su uso para el cultivo de peces, la producción de energía y la realización de deportes acuáticos.

Las altas concentraciones de nutrientes halladas en ambas lagunas podrían ser explicadas por la conjunción de varios aspectos, entre los que se destacan: la morfometría de los cuerpos de agua analizados y la influencia de la precipitación; la intensa actividad agrícola y ganadera que se realiza en las cuencas hidrográficas de ambas lagunas; las características de sus cuencas hidrográficas (cuencas cerradas); y la topografía del entorno. Ambas lagunas, son consideradas someras y, por tanto, el comportamiento de las variables físicas y químicas es muy diferente al que ocurre en lagos profundos y estratificados (SCHEFFER 1998). En ambos casos estudiados, fue notable la influencia de la relación agua – sedimento en la variabilidad de las concentraciones de nutrientes. Dicho aspecto fue mayormente evidenciado en la laguna Calderón, la más somera de las lagunas estudiadas. En la misma, las mayores concentraciones de fosfato halladas para todo el período de estudio fueron registradas durante el período estival como consecuencia de un intenso contacto entre el sedimento y el agua. Cabe destacar que en dicho período la profundidad de la laguna no superó 1 metro. Asimismo, esta relación fue mayormente evidenciada para los componentes del fosfato en relación con los del nitrógeno.

En ambas lagunas, pudo observarse que el intenso contacto sedimento-agua produjo un rápido retorno de los materiales más sedimentados a la columna de agua. En relación a la concentración salina en las lagunas, ésta siguió tanto a la variación anual como interanual de las precipitaciones. Una laguna puede diluirse o concentrarse entre años sucesivos. Son de resaltar las sequías estacionales relativas du-

rante los años húmedos así como las inundaciones relativas durante los años secos. El grado de salinidad de las lagunas pampeanas es altamente variable, aunque la gran mayoría de ellas está dominada por el catión Na. Las lagunas cercanas al piedemonte de las sierras situadas en la planicie, poseen los menores contenidos de sólidos disueltos, aguas carbonatadas y bajas relaciones Cl:Na. A medida que la pendiente del paisaje disminuye, hacia el Norte y el Noreste de la región (pampas plana y deprimida), la salinidad de las lagunas aumenta paulatinamente en forma apreciable así como lo hacen la concentración de Cl y la relación Cl:Na. Este último grupo es el que mejor representa a una laguna pampeana típica (QUIRÓS *et al.* 2005) y es el caso de las lagunas estudiadas. Las lagunas Unamuno y Calderón pertenecen a cuencas hidrográficas cerradas, por lo que las concentraciones halladas anualmente en general superan la media normal o son consideradas altas dentro de los límites conocidos para cuerpos de agua de zonas templadas.

La morfometría de las lagunas estudiadas presentó diferencias y similitudes. En relación al área, la laguna Calderón presentó una extensión de aproximadamente 9 veces menor a la de la laguna Unamuno. La mayoría de los cuerpos de agua de la región pampeana presentan variación temporal de sus parámetros morfométricos (BAIGÚN & DELFINO 2003; GROSMAN 2008) y la profundidad media es aproximadamente 0.7 de su profundidad máxima (QUIRÓS *et al.* 2002b). En las lagunas estudiadas, la profundidad media fue 1.45 m en Unamuno (0.45 de su $Z_{\text{máx}}$) y de 0.61 m en Calderón (0.28 de su $Z_{\text{máx}}$). En lagos templados, las variaciones en área y niveles de agua, particularmente durante los meses de verano, pueden ser el resultado de diferencias locales en el monto o intensidad de la precipitación (SCHEFFER 1998). En el caso de Unamuno y Calderón, tanto el área como la profundidad respondieron a tendencias locales de la relación precipitación-evapotranspiración.

Dados los cambios observados en su morfología, la variación en las concentraciones de nu-

trientes en aguas de las lagunas podría ser una consecuencia de su dilución durante períodos más húmedos o debido a la absorción por los sedimentos durante períodos más secos. Ciclos de dilución-concentración han sido detectados en diferentes sistemas, como resultado de la intensa interacción entre sedimentos-agua-fitoplancton ocurrido en lagos someros (SCHEFFER 1998). Este proceso es particularmente evidente en Calderón, durante el verano, cuando la profundidad máxima es inferior a 1.20 m debido a un incremento de la evaporación y la concentración de nutrientes.

Las lagunas claras presentan el desarrollo de vegetación acuática y predominan en las regiones donde la acción humana es menor (SCHEFFER 1998; QUIRÓS *et al.* 2002a). Los resultados indican que, en las lagunas Unamuno y Calderón, la elevada turbidez de sus aguas estaría asociada a la inexistencia de macrófitos, a la alta utilización humana de sus drenajes y al uso del suelo agrícola predominante de la región. Esta característica las posiciona dentro del grupo de las lagunas turbias, de acuerdo a la clasificación realizada por QUIRÓS *et al.* (2002), en su estudio acerca del funcionamiento de lagunas pampeanas.

En términos generales, las concentraciones más bajas de clorofila fueron encontradas durante los años más húmedos. Este aspecto fue acom-

pañado por un incremento del área del 79% en Unamuno, sugiriendo que la variación de profundidad del nivel de agua es un aspecto clave en la dinámica de las lagunas y que se produjo un proceso de dilución, como el descrito para los nutrientes. La alteración del balance entre la precipitación, la evapotranspiración y el nivel de la capa freática, puede variar la concentración de nutrientes (MAIZELS *et al.* 2003), estado trófico (GERALDES & BOAVIDA 2005) y la salinidad en las lagunas de zonas templadas (QUIRÓS *et al.* 2002a). El análisis de la precipitación en el área de estudio indicó que la variación interanual del factor climático afectó a la morfología de las lagunas. La influencia de los valores de precipitación *in situ* fue evidenciada en algunos casos, en los que se observó la dilución de ciertas concentraciones posteriormente al período de mayores precipitaciones. Sin embargo, dichas relaciones fueron mayormente evidenciadas al relacionar no sólo las precipitaciones *in situ* sino la relación evaporación-precipitación.

La variabilidad del estado trófico de las lagunas Unamuno y Calderón se vinculó con las precipitaciones locales y el uso de la tierra en su entorno inmediato. De acuerdo a estudios realizados por el INTA (2009), el área de estudio presenta predominio de actividades agrícolas y ganaderas. El incremento del porcentaje de tierras cultivadas y pasturas en la región (Fig. 9)

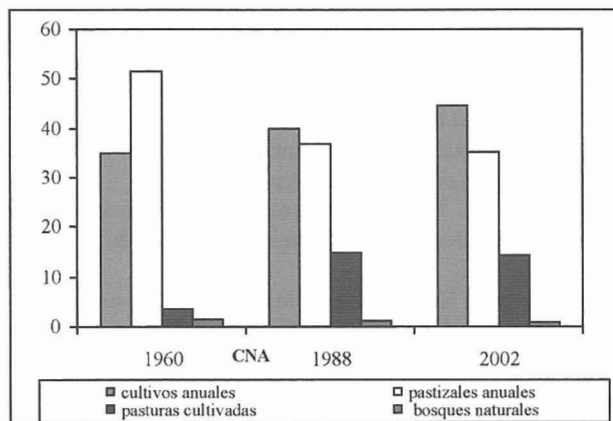


Figura 9. Cambios relativos en el uso de la tierra entre 1960 y 2002 en la ecorregión Pampa (Viglizzo *et al.* 2005).

Figure 9. Relative changes in the land use between 1960 and 2002 in the Pampa ecoregion (Viglizzo *et al.* 2005).

constituye uno de los principales aportes de nutrientes a las aguas de las lagunas de la región. Por su parte, la actividad ganadera (Ministerio de Asuntos Agrarios 2006) también contribuye a incrementar las concentraciones de nutrientes debido a que las excretas de los animales constituyen fuentes de nitratos y fosfatos. Favorecidos por la pendiente regional ($<4^\circ$), los nutrientes llegan por filtración o escorrentía a los cuerpos de agua. Para el año 2006, el área correspondiente a las cuencas hidrográficas de las lagunas alcanzó aproximadamente las 392000 cabezas de ganado.

En este contexto, una de las principales fuentes de N la constituye la precipitación del amoníaco emitido por las deyecciones del ganado. El carácter endorreico y arreico de las cuencas hidrográficas de las lagunas estudiadas, contribuyen a que la concentración de nutrientes y materia orgánica en los cuerpos de agua sean paulatinas y en aumento favorecidos por la falta de intercambio y aireación de sus volúmenes de agua.

En la laguna Calderón se alcanzó el estado de hipertrofia en mayo de 2005, tras un período estival de escasas precipitaciones (precipita-

ción mes de mayo=29 mm), lo cual podría explicarse por la ocurrencia de una floración de cianobacterias (ANDRADE *et al.* 2007). En la laguna Unamuno, los valores extremos de eutroficidad se produjeron en otoño de 2005 (precipitación mensual < 20 mm), en la transición entre un estado eutrófico e hipereutrófico. En este caso, la situación podría deberse a procesos de concentración como consecuencia de meses anteriores de escasa precipitación y la evaporación típica de períodos estivales.

AGRADECIMIENTOS

El financiamiento de este trabajo fue realizado por la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT). Los autores agradecen al Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Universidad Nacional del Sur (UNS). A la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por proveer datos climáticos y satelitales, a los Sres. Unamuno, Pedemonte y Kamplachas por permitir el acceso al área de estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION - WATER ENVIRONMENT FEDERATION (APHA-AWWA-WEF). 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Clesceri, L.S., Greenberg, A.E., Eaton, A.D. (Eds.). 20th Edition. American Public Health Association. Washington.
- ANDRADE, G.M., FERRER, N., BOHN, V.Y. & PICCOLO, M.C. 2007. Estudio preliminar del fitoplancton de la laguna Unamuno (Provincia Buenos Aires). XXXI Jornadas Argentinas de Botánica. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica 42:193.
- BAIGÚN, C.R.M. & DELFINO, R.L. 2003. Sobre ferrocarriles, lagunas y lluvias: características de las pesquerías comerciales de pejerrey en la Cuenca del Río Salado (Provincia de Buenos Aires). Biología Acuática 20:12-18.
- BOHN, V.Y. 2009. Geomorfología e hidrografía de las lagunas del sur de la provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 244 pp.
- BOHN, V.Y., PERILLO, G.M.E. & PICCOLO, M.C. 2011. Distribution and morphometry of shallow lakes in a temperate zone (Buenos Aires Province, Argentina). Limnetica 30 (1): 89-102.
- CAMPO, A., CAPELLI, A. & DIEZ, P. 2004. El suroeste bonaerense. I. pp. 5-9 en: A. Campo, A. Capelli & P. Diez (Ed.). El clima del suroeste bonaerense. 1era. edn. EdiUns. Bahía Blanca, Argentina. 99 pp.

- CARLSON, R. 1977. A Trophic State Index for Lakes. *Limnology and Oceanography* 22:361-369.
- CLAPS, M.C., GABELLONE, N. & BENITEZ, N.A. 2004. Zooplankton biomass in an eutrophic shallow lake (Buenos Aires, Argentina): spatio temporal variations. *Annls Limnol. Int. J. Limnol.* 40(3):201-210.
- DODDS W.K. 2007. Trophic state, eutrophication and nutrient criteria in streams. *Trends in ecology & evolution* 22(12).
- EBERLEIN, K. & KATTNER, G. 1987. Automatic method for the determination of ortho-phosphate and total dissolved phosphorus in the marine environment. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 326:354-357.
- GABELLONE, N.A., SOLARI, L.C., CLAPS, M.C., MAC DONAGH, M.E., BENITEZ, H. *et al.* 2000. Estado trófico de la laguna San Miguel del Monte (Ptdo. de San Miguel del Monte, Buenos Aires). *Diversidad y Ambiente* 1:29-35.
- GARIBOTTI, E.J., CERVellini, P.M. & PICCOLO, M.C. 2009. Microcrustáceos planctónicos y características limnológicas de dos lagunas pampeanas (Buenos Aires, Argentina). *Limnetica* 28(1):91-104.
- GERALDES, A.M. & BOAVIDA, M.J.L. 2005. Seasonal water level fluctuations: implications for reservoir limnology and management. *Lakes & Reservoirs: Research and Management* 10:59-69.
- GERALDI, A., PICCOLO, M.C., EVANS, B. & PERILLO, G.M.E. 2007. Aplicación de SIG para la estimación de calidad de agua de las lagunas Las Encadenadas del Oeste. En: *Teledetección: herramienta para la gestión sostenible*. R. Rivas, A. Grisotto & M. Sacido (Ed.). 403-411. Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata, Argentina. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Argentina.
- GONZÁLEZ URIARTE, M. 2002. Geoambientes del Suroeste bonaerense. En: *Territorio, Economía y Medio Ambiente en el Sudoeste Bonaerense*. M. Vaquero (Comp.): 463-483. Edi Uns. Bahía Blanca, Argentina.
- GRASSHOFF, K., EHRHARDT, M. & KREMLING, K. 1983. *Methods of seawater analysis*. 2nd. edn. Weinheim: Verlag Chemi. 419 pp.
- GROSMAN, F. 2008. Una invitación a conocer nuestras lagunas pampeanas. I. en: *Espejos en la Llanura. Nuestras lagunas de la Región Pampeana*. F. GROSMAN (Comp.). 19-38 Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Tandil, Argentina.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). 2009. Monitoreo de la cobertura y uso del suelo a partir de sensores remotos. Informe Técnico Unificado PNECO 1643. 31 pp.
- MAIZELS, P., ETCHEPARE, E., CHORNOMAZ, E., BUSTINGORRY, J., ESCARAY, R., *et al.* 2003. Parámetros abióticos y biomasa planctónica en la laguna Chascomús (Pcia. de Buenos Aires). Período de inundación 2002. *Biología Acuática* 20:6-11.
- MELO, W. & ZINGER, S. 1996. Dinámica del arroyo Napostá Chico, Buenos Aires. I Jornadas de Geografía Física. Departamento de Geografía y Turismo. Universidad Nacional del Sur 1:14-23.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (OECD) 1982. *Eutrophication of Waters, Monitoring, Assessment and Control*. OECD, Paris.
- QUINN, F. & SELLINGER, C. 2006. A reconstruction of Lake Michigan-Huron water levels derived from tree ring chronologies for the period 1600-1961. *J. Great Lakes Res.* 32: 29-39. Internat. Assoc. Great Lakes Res.
- QUIRÓS, R. & DRAGO, E. 1999. The environmental state of Argentinean lakes. An overview. *Lakes and Reservoirs. Research and Management*. Vol. 4, Number 1. 55- 64.
- QUIRÓS, R., RENNELLA, A., BOVERI, M., ROSSO, J.J. & SOSNOVSKY, A. 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12:175-185.
- QUIRÓS, R., ROSSO, J.J., RENNELLA, A., SOSNOVSKY, A. & BOVERI, M. 2002a. Estudio sobre el estado trófico de las lagunas pampeanas. *Interciencia* 27:584-591.

- QUIRÓS, R. 2004. Sobre la Morfología de las Lagunas Pampeanas. Serie de Documentos de Trabajo del Área de Sistemas de Producción Acuática. Departamento de Producción Animal, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Documento No 3, 16 p.
- RICHARDS, L. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N° 60. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México. 160 pp.
- RINGUELET, R.A., SALIBIAN, A., CLAVERIE, E. & ILHERO, S. 1967. Limnología química de las lagunas pampásicas (Provincia de Buenos Aires). *Physis* Tomo XXVII 74:201-221.
- RYDING, S.O. & RAST, W. 1992. El control de la eutrofización en lagos y pantanos. Ed. Pirámide. Madrid, España. 355 pp.
- SCHEFFER, M. 1998. Ecology of Shallow Lakes. Ed. Chapman & Hall. Lelystad, The Netherlands. 357 pp.
- SONG, C., WOODCOCK, C.E., SETO, K.C., LENNEY, M.P. & MACOMBER, S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?. *Remote Sensing of Environment* 75:230-244.
- STRICKLAND, J.D. & PARSONS, T.R. 1968. Determination of Particulate Organic Carbon. En: A practical handbook of seawater analysis. J.D. Strickland & T.R. Parsons (Eds.). 207-211. Bulletin 167, Fisheries Research Board of Canada, Ottawa.
- TORREMOREL, A., BUSTIGORRY, J., ESCARAY, R. & ZAGARESE, H. 2007. Seasonal dynamics of a large, shallow lake, laguna Chascomús: The role of light limitation and other physical variables. *Limnologica* 37:100-108.
- TRÉGUER, P. & LECORRE, P. 1975. Manual d'analyses des sels nutritifs dans l'eau de mer. Utilisation de l'Auto-Analyzer II. Technicon LOC-UBO. 2nd. Brest, France. 110 pp.
- UNEP-IETC/ILEC 2001. Lakes and reservoirs: Water quality: The Impact of Eutrophication, 3.
- VIGLIZZO, E.F., FRANK, F.C. & CARREÑO, L. 2005. Situación ambiental en las ecorregiones pampa y campos y malezales. En: La situación ambiental Argentina 2005. U. BROWN, M. MARTÍNEZ ORTIZ, J. ACERBI & F. CORCHERA (ed.). Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires. 577 pp.