

Forzantes ambientales intervinientes en la dinámica trófica de Laguna del Plata (Córdoba)

Ingrid Costamagna¹, Silvana R. Halac^{1,2}, Marcia Ruiz³, Eduardo L. Piovano^{1,2}

¹*Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

²*CICTERRA (UNC-CONICET), Argentina*

³*INA – CIRSA, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 31/08/2018

Fecha de aceptación del manuscrito: 22/03/2019

Fecha de publicación: dd/mm/aaaa

Resumen— El análisis de indicadores paleolimnológicos físicos, químicos y biológicos del registro sedimentario de Laguna del Plata (LdP), sistema de la Laguna Mar Chiquita (LMC) (Córdoba, Argentina), permitió reconstruir la variabilidad ambiental ocurrida en los últimos *ca.* 70 años y relacionarla con la variabilidad hidroclimática del sistema y con el impacto de las actividades antrópicas en la región. Se identificaron 4 escenarios con características ambientales diferentes. El incremento en las concentraciones de nutrientes determinado a partir del año 1984 en el registro sedimentario es sincrónico con el avance de la frontera agrícola en la región, la cual se expandió en la década de 1980. Además, los resultados muestran el control que ejerce la variabilidad hidroclimática sobre el ingreso de nutrientes a LdP permitiendo relacionar forzantes antrópicos y naturales. Asimismo, se observó que, durante períodos de alto impacto antrópico, la mayor disponibilidad de nutrientes es el factor que predomina en el control de la producción primaria de LdP.

Este trabajo considera la acción simultánea de forzantes naturales y antrópicos, y aporta al entendimiento de la dinámica ambiental del sistema para los siglos XX y XXI. Por lo anterior, se considera que puede contribuir a la proyección y planeamiento de las actividades de la región.

Palabras clave— Paleolimnología, variabilidad hidroclimática, eutrofización cultural

Abstract—The study of paleolimnological proxies from the sedimentary record of Laguna del Plata (LdP), Lake Mar Chiquita System (LMC) (Córdoba, Argentina), allowed to reconstruct the environmental variability occurred in the last *ca.* 70 years and relate it to the hydroclimatic variability and to the agricultural activities impact in the area. Four scenarios with different environmental characteristics were identified. The nutrient concentration increase determined in the sedimentary record since 1984, is synchronous with the advance of the agricultural frontier in the region, which was expanded in the 1980s. Moreover, the results showed the control by the hydroclimatic variability on the nutrients input to LdP which allows to relate anthropic and natural forcing. Additionally, it was observed that during periods of high anthropic impact, primary production at LdP is mainly controlled by the high availability of nutrients.

This study considers the simultaneous effect of natural and anthropogenic forcing and contributes to the understanding of the system environmental dynamics for the XX and XXI centuries. Also contributes to the projection and planning of the region activities.

Keywords— Paleolimnology, hydroclimatic variability, cultural eutrophication

INTRODUCCIÓN

Los sistemas acuáticos son muy sensibles a las variaciones ambientales como resultado de cambios en el clima, la tectónica, la cubierta vegetal, la litología y los sedimentos aflorantes en la cuenca, la biota acuática y las actividades humanas (Cohen, 2003). Toda modificación experimentada por el sistema a través del tiempo ya sea de origen natural o antrópico queda almacenada en el registro

sedimentario, y puede ser inferida a través del análisis de indicadores o *proxies* (Renaut y Gierlowski-Kordesch, 2010). Estos constituyen un reflejo de las condiciones físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua al momento de su depositación (Cohen, 2003; Caballero *et al.*, 2014). La paleolimnología se encarga de reconstruir la historia ambiental de los cuerpos de agua, a partir de esta información preservada en los sedimentos (Last, 2002). Los indicadores se clasifican según su naturaleza en químicos, físicos y biológicos. Dentro de los químicos más destacados se encuentran: la variación de la cantidad y origen de la relación orgánica e inorgánica (Carbono orgánico Total – COT / Carbono Inorgánico Total – CIT), la variación de la concentración de diferentes elementos químicos (Nitrógeno- N y Fósforo- P); los físicos incluyen la granulometría,

Dirección de contacto:

Ingrid Costamagna, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA, ingrid.costamagna@hotmail.com.

estructuras sedimentarias (Cohen, 2003) y dentro de los indicadores biológicos se encuentran los paleopigmentos, que son indicadores de biomasa algal (Guilizzoni *et al.*, 2011).

La eutrofización cultural es una problemática asociada al impacto antrópico que afecta negativamente la calidad del agua de sistemas lacustres, y que puede ser estudiada mediante la paleolimnología (Davison y Jeppesen, 2013). Está asociada al incremento de N y P proveniente de ríos tributarios y/o de descargas difusas que derivan de actividades antrópicas, como el uso de fertilizantes en la agricultura, la ganadería, descarga de efluentes urbanos e industriales (Carpenter *et al.*, 1998). La disponibilidad de estos nutrientes por encima de los valores naturales produce efectos negativos en el sistema, tales como el aumento de la producción primaria, floraciones de algas potencialmente tóxicas, pérdida de oxígeno disuelto, mortandad de peces, pérdida de biodiversidad, entre otros (Shaw *et al.*, 2003). Lo anterior conlleva a un deterioro ambiental de los cuerpos de agua y de su calidad, afectando su valor como bien ecosistémico y su uso para consumo humano, industrial, recreación, y otros propósitos (Carpenter *et al.*, 1998; Escobar *et al.*, 2005).

Los compuestos orgánicos e inorgánicos fosforados y nitrogenados quedan preservados en los sedimentos, por lo que pueden ser determinados en la columna sedimentaria y correlacionados con las variaciones de los paleopigmentos fotosintéticos, permitiendo la caracterización trófica de los cuerpos de agua (Guilizzoni *et al.*, 2011). Asimismo, la información hidroclimática y de uso del suelo de la cuenca de captación permiten determinar si el incremento en la concentración de nutrientes estaría relacionado a actividades antrópicas, a cambios hidroclimáticos, o a la combinación de ambos procesos.

En este trabajo se analiza la variabilidad ambiental preservada en el registro paleolimnológico de los últimos ca. 70 años de la Laguna del Plata (LdP) ($30^{\circ}55'S$ - $62^{\circ}51'O$) perteneciente al sistema de la Laguna Mar Chiquita (LMC; Córdoba), diferenciando la incidencia de forzantes naturales y antrópicos.

ÁREA DE ESTUDIO

La LMC es el lago salino más grande de Sudamérica. Está ubicada en el noreste de la provincia de Córdoba, Argentina entre los departamentos Río Primero y San Justo, próxima a los límites con las provincias de Santa Fe y Santiago del Estero, entre los 30° y 31° S y los $62^{\circ}10'$ y $63^{\circ}10'O$. Las cuencas de los ríos Salí- Dulce, Primero y Segundo conforman el sistema endorreico de esta laguna, el cual alcanza una superficie aproximada de 127.000 km^2 (Dasso *et al.*, 2014) (Fig. 1). La característica principal de este sistema es que presenta cambios en la fluctuación de volumen, nivel y superficie a lo largo del tiempo, como resultado de variaciones temporales en las precipitaciones regionales. Lo anterior, provocó modificaciones en sus dimensiones: desde 2000 km^2 antes de la década de 1970 bajo un régimen de déficit hídrico hasta 6500 km^2 en el año 2003, producto de una fase húmeda que afecta la región desde la década de 1970 (Piovano *et al.*, 2009; Troin *et al.*, 2010).

LdP es un pequeño cuerpo de agua salado asociado a LMC en su extremo suroeste. En ella se encuentra la desembocadura del Río Primero, lo que produce dilución y condiciona los procesos de sedimentación que en ella ocurren, y la diferencia del cuerpo de agua principal (Piovano *et al.*, 2006). En la cuenca del Río Primero se encuentra la ciudad de Córdoba (segunda en importancia de Argentina: 1.3 millones de habitantes; INDEC, 2010), en donde se desarrollan diversas actividades industriales, mientras que en el sector sur de LdP (departamentos Río Primero y San Justo) se practica la agricultura intensiva.

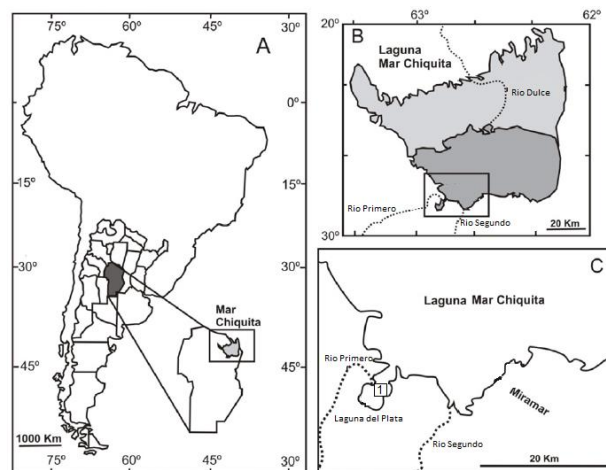


Fig. 1: A: Ubicación de la Laguna Mar Chiquita, B: Área ocupada por la Laguna Mar Chiquita en los estadios bajos (previo a la década de 1970, en gris oscuro) y durante los estadios altos (año 2003, en gris claro) C: El número 1 indica la ubicación de la extracción de los testigos TLP-17-I y TLP-17-II. Tomado y modificado de Pilati *et al.* (2016)

MATERIALES Y MÉTODOS

Extracción de testigos sedimentarios

La extracción de los testigos sedimentarios (TLP-17-I y TLP 17-II) se realizó en la LdP (Fig. 2), en cercanías a la desembocadura del Río Primero ($30^{\circ} 54'48.4''$ S; $62^{\circ} 51'16.4''$ O) (Fig. 1C). Se utilizó un equipo Testificador de tipo *Hand Corer Beeker* (EijKelkamp) (Fig. 2). Luego de la extracción, los testigos se transportaron y se conservaron en el repositorio de testigos del CICTERRA a 4°C y en oscuridad.



Fig. 2: Extracción del testigo sedimentario TLP-17-I y II

Procesamiento de testigos sedimentarios y determinación de indicadores

Análisis de imágenes, descripción macroscópica y muestreo

Con la finalidad de reconocer estructuras sedimentarias, se realizaron tomografías computadas a ambos testigos cerrados (TLP-17-I y TLP-17-II; DASPU-UNC) y fotografías al testigo TLP-17-I abierto. La descripción macroscópica se realizó a partir de dichas imágenes, según los protocolos de Schnurrenberger *et al.* (2003) y del *Limnological Research Center* (LRC, University of Minnesota, USA; <http://lrc.geo.umn.edu/>). Se tuvo en cuenta color, estructuras primarias, granulometría aproximada, espesor de láminas o capas y contactos entre capas o láminas.

El muestreo se realizó en el testigo TLP-17-II, sin un intervalo constante de muestreo, sino teniendo en cuenta las diferencias de color y estructuras identificadas mediante la descripción macroscópica. Se tomaron un total de 40 muestras.

Susceptibilidad Magnética (SM)

La SM se midió sobre una de las mitades del testigo TLP-17-II abierto con el equipo MS2E Barrington a alta resolución (cada 1 cm). La SM se define como una propiedad de los materiales que indica la facilidad con la cual este se magnetiza, es decir, cómo es su respuesta frente a la aplicación de un campo magnético externo (Thompson y Oldfield, 1986). La SM disminuye considerablemente, incluso llegando a tomar valores negativos, tanto con el aumento del contenido de agua como de la materia orgánica, por tratarse de materiales diamagnéticos (Dearing, 1994). La caracterización de la SM a lo largo de un testigo sedimentario permite identificar la presencia de distintos tipos de sedimentos y efectuar una primera separación de unidades sedimentarias la cual se complementa con el análisis de otros indicadores (*e.g.* granulométricos, COT, etc.; Lascu, 2009).

Determinación de Indicadores de Producción Primaria

Los derivados de la clorofila (DC) se determinaron por espectrofotometría según las fórmulas de Golterman y Clymo, 1971. Se utilizaron 2g de sedimento húmedo y 10 mL de acetona (90% v/v) como solvente. La extracción se realizó durante 24 horas en oscuridad y a 4°C (Guilizzoni *et al.*, 1983). Las lecturas de absorbancias se realizaron en un espectrofotómetro Shimadzu UV-1700.

Los contenidos de materia orgánica (LOI₅₅₀) y de Carbono Orgánico Total (COT) se estimaron por la técnica de Pérdida por Ignición o LOI (*Loss of Ignition*, Dean, 1974), siguiendo el protocolo descrito por Heiri *et al.* (2001). La variación de peso ocurrida durante la calcinación a 550°C es producto de la combustión de la materia orgánica que se oxida a CO₂ y cenizas, siendo proporcional a la cantidad de carbono orgánico presente en la muestra.

El LOI₅₅₀ se calculó a partir de:

$$\text{LOI}_{550} (\%) = ((W_{\text{liof}} - W_{550}) / W_{\text{liof}}) * 100 \quad (1)$$

Siendo,

LOI₅₅₀: peso perdido a 550°C expresado en porcentaje,

W_{liof}: peso de la muestra liofilizada antes de la combustión (expresado en g)

y W₅₅₀: peso de la muestra después de la combustión a 550°C (expresados en g).

A partir del valor de LOI₅₅₀ se estimó el contenido de COT, considerando que éste representa un 50% del contenido de materia orgánica (Dean, 1974):

$$\text{COT} (\%) = 0,50 \times \text{LOI}_{550} \quad (2)$$

Determinación de Indicadores de Eutrofización

La extracción del Fósforo Total (PT) se llevó a cabo por el método de la Ignición (*Analytical Water Manual*, 1979). Se colocó 0.5g de sedimento a 550°C en mufla, y se digirió con 50 mL HCL 1N a temperatura ambiente durante 16 hs. La cuantificación de PT se realizó por el método colorimétrico del ácido ascórbico (SM 4500 PE, APHA1992).

La determinación de Nitrógeno Total (NT) se realizó mediante el método Kjeldahl según Bremner (1965), que se divide en tres etapas: 1° Digestión, 2° Destilación que tienen la finalidad de transformar el nitrógeno (N) presente en amoníaco (NH₃) para recogerlo en una solución de ácido bórico y 3° Titulación, para la cuantificación del NT presente en la muestra.

Registros hidroclimáticos

La información instrumental hidroclimática utilizada corresponde a las variaciones del nivel y salinidad de la LMC tomadas de Piovano *et al.* (2004) y Troin *et al.* (2010), completadas con datos recientes publicados por el Ministerio de Agua, Ambiente y Servicios Públicos de la Provincia de Córdoba y la Estación Biológica Mar Chiquita (PROMAR) respectivamente. Las precipitaciones medias regionales para la cuenca del Río Primero durante el siglo XX y XXI fueron tomadas de Caviola (2012) y actualizadas con datos de precipitaciones para la Ciudad de Córdoba provistos por el Servicio Meteorológico Nacional.

Información de actividades antrópicas en la región

Los cambios en el uso del suelo en la región sur de LdP, relacionados a desmonte y agricultura, se analizaron a partir de información histórica (Mengui, 2006; Bucher *et al.*, 2006) y a partir de 1970, de estimaciones de hectáreas sembradas de los principales cultivos de la región (soja, trigo, maíz y girasol; Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones).

Análisis estadísticos

Con el fin de determinar si las variables medidas o indicadores, son significativamente diferentes entre las facies reconocidas, se realizó un Análisis de Varianza (ANAVA) y un test a posteriori (test de Tukey) con el software InfoStat/P (Di Rienzo, 2012), considerándose un límite de confianza del 95% (p≤0,05).

RESULTADOS

Desarrollo del marco cronológico del testigo

Con la finalidad de determinar las edades de la secuencia sedimentaria de TLP-17-II, se utilizó el modelo de edades ^{210}Pb realizado por Stupar (2014) en un testigo extraído en LdP en 2011 (LP-11-1). Con este modelo se calcularon las tasas de sedimentación correspondientes a 5 intervalos de tiempo: AD¹ 2011-2001; AD 2001-1988; AD 1988-1976; AD 1976-1963; AD 1963-1948. Para el último período (AD 2011-2017) sólo presente en TLP-17-II, se utilizó la tasa de sedimentación calculada para AD 2011-2001 (Tabla 1). Estas tasas de sedimentación se extrapolaron a lo largo del testigo TLP-17-II, y asumiendo que el techo del testigo corresponde al año 2017, se obtuvo que la base representa al año 1948 (Fig. 3).

TABLA 1: TASAS DE SEDIMENTACIÓN CALCULADAS PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS DE AÑOS.

Intervalo de tiempo	Tasa de sedimentación calculada (cm. año ⁻¹)
AD 2017-2011	2
AD 2011-2001	2
AD 2001-1988	1,54
AD 1988-1976	1,87
AD 1976-1963	1,54
AD 1963-1948	1,39

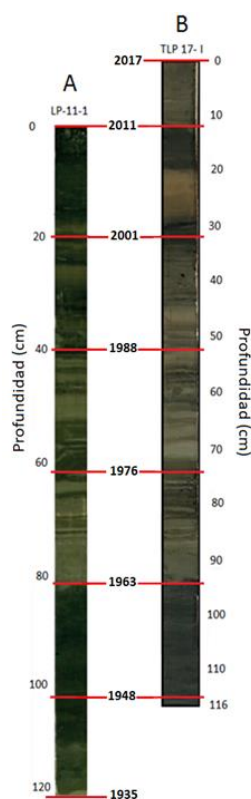


Fig. 3: Correlación de testigos LP-11-1 Stupar (2014) (A) y TLP-17-I (B) según tasas de sedimentación

Identificación de facies sedimentarias

Las facies se definieron a través de la observación de las fotografías, tomografías y del análisis integral de los indicadores (SM, COT, PT, NT y DC). Se siguieron los protocolos de Reading, 2000 y Schnurrenberger *et al.*, 2003 y se tuvo en cuenta color, laminación, composición química, textura, y estructuras sedimentarias. Se diferenciaron 5 facies: (Tabla 2, Fig. 4).

- Facies A: Facies de fangos predominantemente macizos con intervalos laminados y bandeados

Se extiende desde la base del testigo hacia los 82 cm. Este intervalo es principalmente macizo en su base mientras que hacia el techo se observa laminación. Los primeros centímetros hasta los 94 cm presentan color pardo oscuro (10 YR 4/1) alternado con láminas pardo claro (10 YR 4/2). Hacia la parte superior presenta un bandeado de colores pardo claro (5 YR 3/1) con intercalaciones pardo más oscuras (10 YR 3/2).

El marco cronológico calculado permite asignar esta facies al período AD 1948-1971 (Fig. 4).

Esta facies presenta valores de SM altos, mientras que el resto de los parámetros (COT, PT, NT y DC), se mantienen en valores bajos y relativamente estables a lo largo de toda la facies (Tabla 2).

- Facies B: Facies de fangos laminados a bandeados

Se extiende desde los 82 cm hasta los 60 cm. En la base el color es marrón oscuro (10 YR 3/2), con alternancia de láminas milimétricas de color marrón claro (5 YR 3/1). Hacia el techo la condición se invierte, predominando el color marrón claro con bandas marrones oscuras. Presenta un límite transicional con facies superior.

El marco cronológico calculado permite asignar esta facies al período AD 1972-1983 (Fig. 4).

En comparación con la facies A, la facies B presenta un incremento del 165 % en NT, 703,9 % en DC, 39 % en COT y una disminución de la SM del 76,06 % (Tabla 2).

- Facies C: Facies de fangos oscuros bandeados a laminados

Se extiende desde de los 60 cm hasta los 28 cm. Presenta color marrón oscuro (10 YR 3/2) con bandas de color marrón claro (5 YR 3/1) en la base, mientras que hacia el techo se observa color marrón oscuro nuevamente con pequeñas láminas más claras. Desde los 33 cm hasta el techo presenta color marrón oscuro (10 YR 4/1) con láminas de color marrón claro (5 YR 3/1). Posee un límite gradacional con unidad inferior y superior.

El marco cronológico calculado permite asignar esta facies al período AD 1984-2003 (Fig. 4).

En esta facies se observa un incremento de todos los parámetros con respecto a la facies B: 6,57 % en SM, 33,73 % en COT, 31,71 % en PT, 71,43 % en NT y 60,23 % en DC (Tabla 2).

- Facies D: Facies de fangos marrones laminados.

Se extiende desde los 27 cm hasta los 11 cm. Posee color marrón claro (10 YR 4/2) abajo, mientras que hacia el techo predomina el color marrón oscuro (10 YR 4/1). Es masiva a la vista, aunque en la tomografía es posible reconocer la

¹ AD (Anno Domini): indicador calendario equivalente al después de Cristo abreviado como d.C. para numerar los años de la era cristiana.

laminación y la presencia de una estructura de deformación producto de la extracción del testigo.

El marco cronológico calculado permite asignar esta facies al período AD 2004-2011 (Fig. 4).

Esta facies presenta una disminución de: 3,79 % en NT, 9,43 % en PT y 46,26 % en DC, mientras que la SM aumentó un 58,12 % y el COT se mantiene igual con respecto a la facies C (Tabla 2).

- Facies E: Facies de fangos finamente laminados

Se extiende desde los 10 cm hasta el techo del testigo. De color pardo oscuro (10 YR 3/2) con láminas milimétricas marrón claro (10 YR 4/2) hasta los 6 cm, a partir de allí es masiva. Presenta límites netos con la unidad inferior (Fig. 4).

El marco cronológico propuesto permite asignar esta facies al período AD 2012-2017, representando los últimos 5 años de depósito (Fig. 4).

En esta facies se puede observar una clara tendencia de aumento del 24,60 % en SM, 4,19 % en COT, 20,41 % en PT y 88,20 % en DC, teniendo además las cantidades mayores de PT y DC, mientras que el NT disminuye en un 23,62 % (Tabla 2).

TABLA 2: FACIES IDENTIFICADAS EN EL TESTIGO SEDIMENTARIO TLP-17-II: LÍMITES, PERÍODO ABARCADO, VALORES PROMEDIO, MÁXIMO Y MÍNIMO DE INDICADORES MEDIDOS.

Facies	A	B	C	D	E
Límites (cm)	82-116	61-81	28-60	11-27	0-10
Período (años)	1948-1971	1972-1983	1984-2003	2004-2011	2012-2017
SM (x10⁻⁵ SI)	Máx:139 Min:22 Med:104,9	Máx:31,5 Min:21 Med:25,13	Máx:80 Min:6,5 Med:26,76	Máx:132,5 Min:10,5 Med:42,32	Máx:121,5 Min:16,5 Med:52,73
COT (%)	Máx:3,20 Min:1,99 Med:2,42	Máx:3,81 Min:2,90 Med:3,38	Máx:5,89 Min:2,73 Med:4,52	Máx:7,46 Min:2,71 Med:4,54	Máx:5,24 Min:3,85 Med:4,73
PT (µg·g⁻¹)	Máx:1007 Min:769 Med:863	Máx:1048 Min:653 Med:856	Máx:1222 Min:1026 Med:1127	Máx:1222 Min:875 Med:1021	Máx:1338 Min:1071 Med:1229
NT (µg·g⁻¹)	Máx:630 Min:180 Med:292	Máx:860 Min:640 Med:770	Máx:1860 Min:850 Med:1323	Máx:1520 Min:760 Med:1267	Máx:1210 Min:730 Med:970
DC (U. gCOT⁻¹)	Máx:8,83 Min:0,19 Med:1,85	Máx:32,83 Min:3,37 Med:14,86	Máx:2,79 Min:47,88 Med:23,81	Máx:23,31 Min:5,14 Med:12,80	Máx:33,18 Min:16,93 Med:24,09

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relaciones estadísticas entre los indicadores determinados en las diferentes facies

La facies A, presenta valores significativamente más altos de SM que el resto de las facies y valores significativamente más bajos de COT, NT y DC en comparación a las facies C-D-E, C-D y C-E respectivamente. En relación con el PT, la facies A y B presentan valores significativamente más bajos que el resto de las facies. A su vez, se destaca que en la facies E se encuentra el contenido significativamente más alto de PT y DC con respecto al resto de las facies.

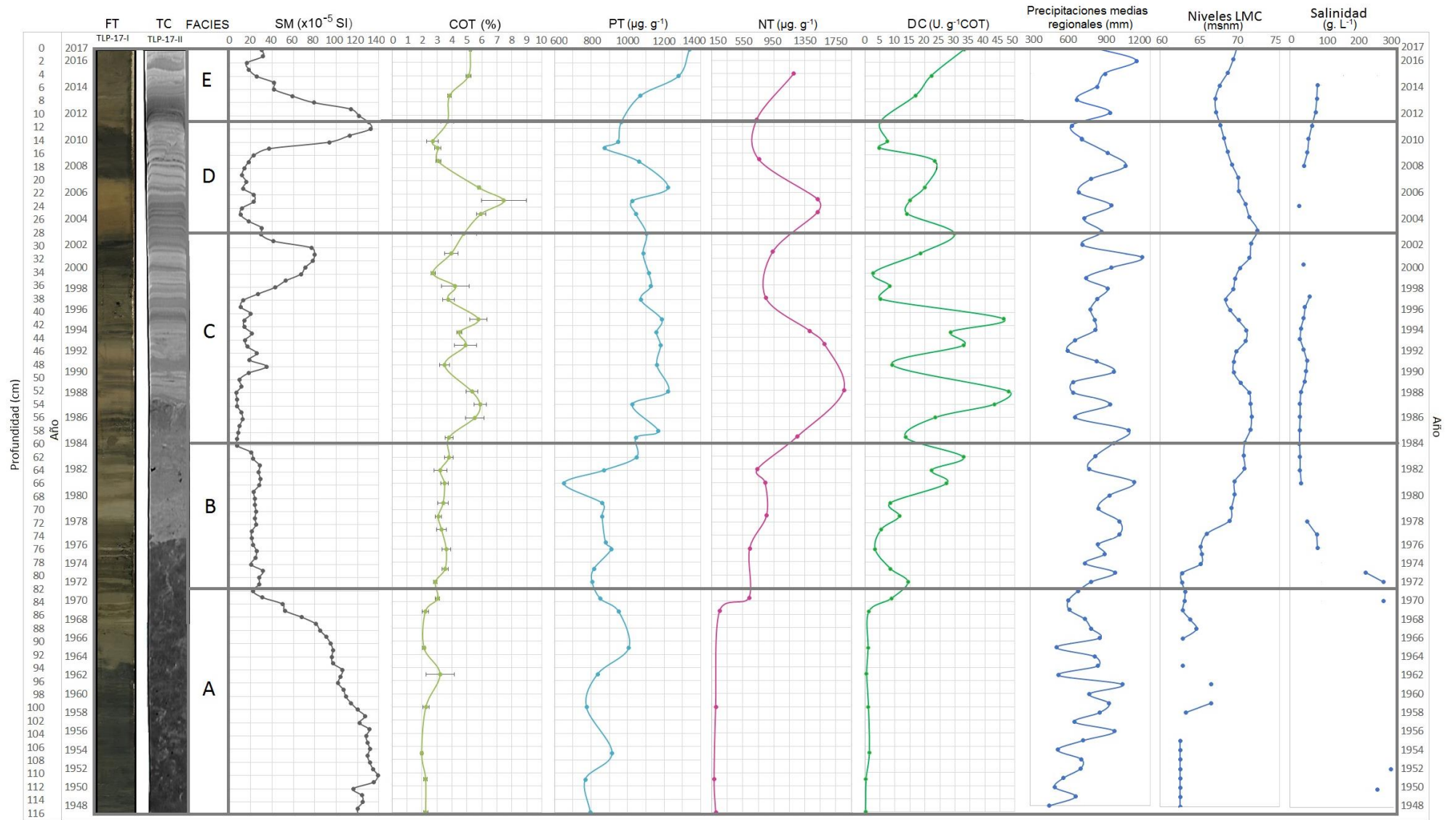


Fig. 4: FT (Fotografía), TC (Tomografía computada), facies determinadas y valores de indicadores medidos en el TLP-17-II. Indicadores hidroclimáticos (precipitaciones regionales, niveles y salinidad de LMC) obtenidos de datos instrumentales.

Relación entre indicadores de eutrofización (NT y PT), el desarrollo agrícola de la región y datos hidroclimáticos

El desarrollo de un marco cronológico en la secuencia sedimentaria del testigo TLP-17-II permitió vincular los indicadores analizados con los datos del registro hidroclimático disponible y la información de actividades agrícolas de la región.

Las concentraciones de PT y NT muestran una tendencia de incremento en el tiempo, principalmente a partir de 1984, observándose también, desde esta época, fluctuaciones de estos indicadores (Fig. 5). Lo anterior se relaciona con el pulso de expansión de la actividad agrícola en la región que tuvo lugar a partir de la década de 1980 (Menghi 2006, Bucher *et al.* 2006; Fig. 6), situación que también coincide con concentraciones bajas de PT y NT en la secuencia sedimentaria anterior a 1984 (Fig. 5). Las fluctuaciones en las concentraciones de NT y PT previamente mencionadas indicarían la presencia de otro factor de control además de la actividad antrópica. Si bien los aumentos en las concentraciones de NT y PT en los sedimentos se relacionan con una mayor disponibilidad de nutrientes en la década de 1980, la variabilidad hidroclimática sería un factor determinante en el control del flujo de éstos a LdP. Lo anterior podría explicarse a partir de que el incremento en las precipitaciones y el consecuente aumento de la escorrentía superficial intensifica el lavado y erosión de suelos (Shaw *et al.*, 2003) favoreciendo el transporte e ingreso de nutrientes a LdP.

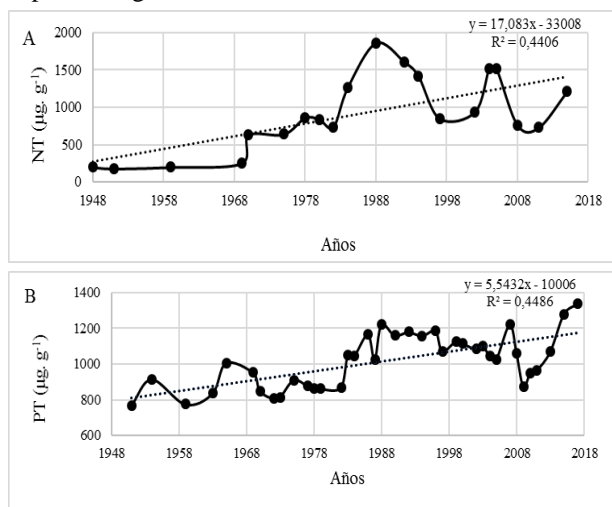


Fig. 5: Concentración de NT (a) y de PT (b) en relación con el tiempo con ajuste a una función lineal

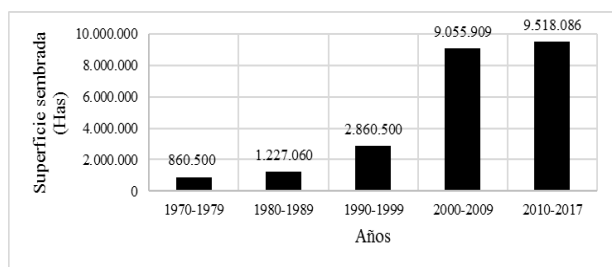


Fig. 6: Superficie sembrada por década en los departamentos San Justo y Río Primero. Tomado de Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones, Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos (2018).

Evolución del sistema en relación con los indicadores del registro sedimentario, datos hidroclimáticos y actividades antrópicas de la región

La reconstrucción ambiental del sistema desde el año 1948 hasta el año 2017, se realizó relacionando las facies identificadas en la secuencia sedimentaria de LdP (TLP-17-II) con la información hidroclimática (niveles y salinidades de LMC y precipitaciones regionales registradas durante el siglo XX y XXI) y el desarrollo agrícola. Se definieron 4 escenarios con condiciones ambientales diferentes y se elaboró un modelo hidrobiogeoquímico que incorpora los indicadores NT, PT, DC (Fig. 7), al propuesto previamente por Piovano *et al.* (2004).

- Escenario I (AD 1948-1971)

Registrado por la facies A. Está caracterizado por condiciones de extrema sequía, con precipitaciones medias regionales de 685 mm. año⁻¹, niveles bajos y salinidades de LMC muy altas (270 g. L⁻¹) (Fig. 4). Los valores bajos de los indicadores NT (292 µg. g⁻¹) y PT (863 µg. g⁻¹), indican un impacto antrópico asociado a la actividad agrícola muy bajo mientras que, las concentraciones bajas de los indicadores de producción primaria, COT (2,42 %) y DC (1,85 U. g COT⁻¹), indican poco desarrollo de biomasa algal, asociados a la alta salinidad (Fig. 7).

- Escenario II (AD 1972-1983)

Registrado por la facies B. Se caracteriza por un aumento en las precipitaciones medias regionales (c.a. 862 mm. año⁻¹) y en los niveles de LMC, y por lo tanto descenso de la salinidad (50 g. L⁻¹) (Fig. 4). Si bien se observa un aumento en las concentraciones de los indicadores de eutrofización, NT (857 µg. g⁻¹) y PT (770 µg. g⁻¹), estos no son significativamente mayores al escenario anterior, considerándolo de bajo impacto antrópico. La disminución de la salinidad favorecería el desarrollo de organismos fotosintéticos, lo que se ve reflejado en un aumento en la concentración de DC (14,86 U. g COT⁻¹) en comparación al escenario anterior (Fig. 7).

- Escenario III (AD 1984-2003 y AD 2012-2017)

Registrado por la facies C y E. Se mantiene la misma situación hidroclimática húmeda del escenario anterior, con precipitaciones medias regionales de 861 mm. año⁻¹ y una salinidad promedio de 58 g. L⁻¹ (Fig. 4). Las altas concentraciones de NT (1631 µg. g⁻¹) y PT (1178 µg. g⁻¹) indicarían un impacto antrópico alto. A su vez, esta mayor concentración de nutrientes favorecería y sería el factor determinante en el desarrollo de productores primarios, lo que se ve reflejado en las altas concentraciones de DC (24,04 U. g COT⁻¹) y COT (4,62 %) (Fig. 7).

- Escenario IV (AD 2004-2011)

Registrado por la facies D. Está caracterizado por condiciones secas dentro del contexto húmedo general, con precipitaciones medias regionales de 803 mm. año⁻¹ y salinidad promedio de 43 g. L⁻¹ (Fig. 4). Si bien las actividades del hombre continúan incrementándose en el tiempo, aquí se observa una disminución tanto de los indicadores de eutrofización como de los de producción primaria: NT (1267 µg. g⁻¹), PT (1021 µg. g⁻¹), DC (12,80 U. g COT⁻¹) y COT (4,54%) lo que estaría asociado al cambio hidroclimático ocurrido (Fig. 7).

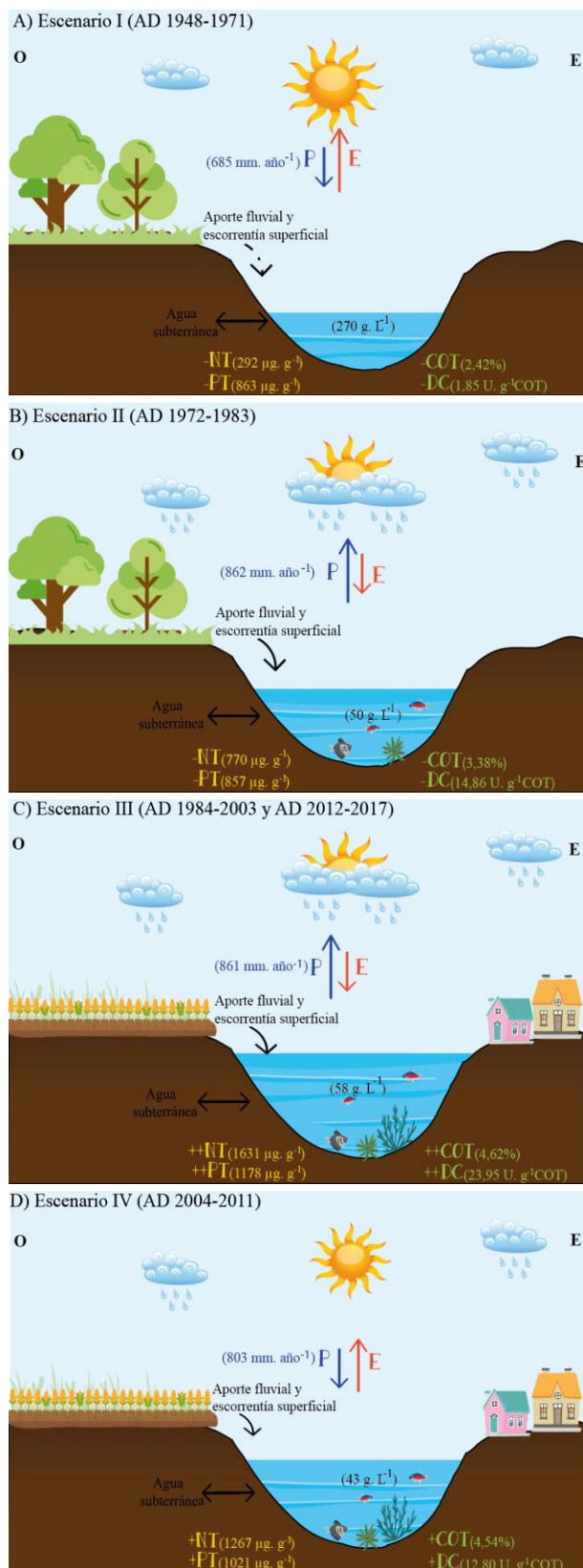


Fig. 7: Modelo hidrobiogeoquímico de evolución ambiental propuesto para LdP A) Escenario I (AD 1948-1971), B) Escenario II (AD 1972-1983), C) Escenario III (AD 1984-2003 y AD 2012-2017), D) Escenario IV (AD 2004-2011). La precipitación (P) y la evaporación (E) se representan con flechas, cuya longitud relativa es proporcional a su magnitud. Los indicadores NT y PT se muestran con signos positivos (+) y negativos (-) al igual que los indicadores de producción primaria (DC y COT). Los signos + y ++ indican aumentos de la concentración mientras que el signo - indica disminución. Los aportes por escorrentía fluvial y superficial están representados por una flecha y línea entrecortada antes de 1970 (debido al escaso aporte durante la extrema sequía antes de esta década), mientras que después de 1970, es indicada por una flecha sólida

CONCLUSIONES

En relación con los resultados previamente expuestos, se puede concluir que:

- El análisis de multi-indicadores (SM, COT, PT, NT y DC) realizado en el registro sedimentario de LdP permitió realizar la reconstrucción ambiental del sistema y definir 4 escenarios con características ambientales diferentes.

- Se produjo un incremento en las concentraciones de NT y PT a partir del año 1984, el cual fue sincrónico con el avance de la frontera agrícola en la región y progresivo a través del tiempo. Si bien lo anterior indica que las actividades antrópicas favorecieron el incremento de nutrientes, la variabilidad hidroclimática condicionó su flujo hacia LdP.

- Los indicadores de producción primaria (DC y COT) respondieron tanto al desarrollo agrícola como a la variabilidad hidroclimática. En condiciones de alto impacto antrópico, el aumento de la biomasa algal fue controlada por la mayor concentración de nutrientes.

- Las tendencias de los indicadores mencionados confirman que la eutrofización cultural del sistema ha ido en aumento progresivo, principalmente en las últimas 3 décadas.

AGRADECIMIENTOS

Las actividades asociadas a la realización del presente trabajo fueron financiadas por los proyectos PICT-2013-1371 y PICT-2014-3298.

Se agradece a las siguientes instituciones que facilitaron sus laboratorios: CICTERRA (Centro de Investigaciones en Ciencia de la Tierra, Conicet-UNC: LAB-GEO y CIGeS), UNC (Química General de Biología) e INA-CIRSA (Instituto Nacional del Agua, Centro de la Región Semiárida). Al Centro de Diagnóstico de Imágenes computadas. Se agradece también, el apoyo logístico otorgado por Marcia Ruiz, Nerina Pisani, Carolina Cuña Rodríguez, Guillermo Ribeiro, Eduardo Wannaz, Miriam Palomeque, Jorge Martínez y Damián Cáceres.

REFERENCIAS

- [1] Analytical Water Manual (1979) Ottawa, Canadá-. Naquadat (National Quality Data Bank).
- [2] Apha, Awwa, Wpcf (1992). "Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual". Ediciones Diaz de Santos, Madrid España.
- [3] Bengtsson, L. & M. Enell, 1986. "Chemical analysis". In *Berglund, B. E. (ed.), Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 423-451.
- [4] Bremner J.M. (1965). "Inorganic forms of nitrogen". In: *Black CA, Evans DD, Ensminger LE, Dinauer RC (eds) Methods of soil analysis, Part 2*. American Society of Agronomy, Madison, Wisc, USA Agronomy N° 9, pp 1179-1237.
- [5] Bucher EH, Marcellino JA, Ferreyra CA, Molli AF (2006) "Historia del Poblamiento Humano". In: *Bucher EH (ed) Bañados del Rio Dulce y Laguna Mar Chiquita*. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, pp 15-27
- [6] Caballero, M.; Valadez, F. Y Rodríguez, A. (2014). "Paleolimnología: Como descifrar la historia de los lagos y su entorno a partir del estudio de sus sedimentos". México DF.

- [7] Caviola, M. (2012). "Estudio de las variaciones hidroclimáticas en el registro sedimentológico de la Laguna del Plata en Laguna Mar Chiquita, Provincia de Córdoba". Tesis de grado. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba.
- [8] Carpenter, S. R.; Caraco, N. F.; Correll, D. L.; Howarth, R. W.; Sharpley, A. N. Y Smith, V. H. (1998) "Nonpoint pollution of Surface waters with phosphorus and nitrogen". *Ecological Applications* - 8, pp. 559-568
- [9] Cohen, A. S. (2003). "Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems". *Oxford University Press*. New York.
- [10] Dasso, C. M.; Piovano, E. L.; Pasquini, A. I.; Córdoba, F. E.; Lecomte K. L.; Guerra, L. Y Campodónico, V. A. (2014). "Recursos Hídricos Superficiales". *Relatorio del XIX Congreso Geológico de Córdoba* pp. 1209 a 1231, Tomo II.
- [11] Dean, W.E. (1974). "Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods". *Journal of Sedimentary Petrology* 44: 242-248.
- [12] Dearing, J. (1999). "Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system". Kenilworth, Chi Publ.
- [13] Davison T. A. y Jeppesen, E. (2013). "The role of palaeolimnology in assessing eutrophication and its impact on lakes". *J Paleolimnol* 49:391-410
- [14] Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C.W. (2012) "InfoStat, version 2012", InfoStat Group, FCA - UNC, Argentina.
- [15] Escobar, J.; Restrepo, J.C. Y Martínez, J. I. (2005) "La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses". Universidad Nacional de Colombia - Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica. vol. 8 Núm. 2 pp. 51-59.
- [16] Golterman H.L. Clymo R.S. (1971). "Methods for Chemical Analysis of Fresh Waters". IBP Handbook No. 8. Oxford & Edinburgh.
- [17] Guilizzoni P., Bonomi G., Galanti G., Ruggiu D. (1983) "Relationship between sedimentary pigments and primary production: evidence from core analyses of twelve Italian lakes". *Hydrobiologia* 103:103-106
- [18] Guilizzoni, P., Marchetto, A., Lami, A., Gerli, S., Musazzi, S., (2011). "Use of sedimentary pigments to infer past phosphorus concentration in lakes". *J. Paleolimnol.*, 45, 433-445
- [19] Heiri, O.; Lotter, A.F. y Lemcke, G. (2001). "Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results". *J. Paleolim.* 25: 101-110.
- [20] INDEC (2010) "Censo Poblacional 2010" tomado de <https://www.indec.gob.ar/nivel3_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=41> (marzo 2018)
- [21] Lascu, I. (2009). "Magnetic susceptibility logging for cores". Version 1.0. *Limnological Research Center Core Facility – SOP series*.
- [22] Last, W. M., y Slezak, L. A. (1988). "The salt lakes of western Canada: a paleolimnological overview". *In Saline Lakes* (pp. 301-316). Springer, Dordrecht.
- [23] Menghi M (2006) "Vegetación". *In: Bucher EH (ed) Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita*. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, pp 173-189
- [24] Pilati, A., Castellino, M. Bucher E.H., (2016). "Nutrient, chlorophyll and zooplankton seasonal variations on the southern coast of a subtropical saline lake (Mar Chiquita, Córdoba, Argentina)" *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 52 (2016) 263-271
- [25] Piovano, E., D. Ariztegui, S.M. Bernasconi, y J. A. McKenzie, (2004). "The isotopical record of hydrological changes in subtropical South America over the last 230 years." *The Holocene* 14:525- 535
- [26] Piovano E.L., Zanon G.A. y Ariztegui D. (2006). "Marco geológico general". *En Bañados del río Dulce y Laguna Mar Chiquita* (Córdoba, Argentina) (ed. Bucher E.H.), pp 29-35. Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, Argentina.
- [27] Piovano E.L., Ariztegui D., Córdoba F., Cioccale M., Sylvestre F. (2009). "Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka". *In: Vimeux F, Sylvestre F, Khodri M* (Eds) Past climate variability from the LastGlacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions: From the LastGlacial Maximum to the Holocene. Springer- Developments in Paleoenvironmental Research Series (DPER) 14: pp 323-351.
- [28] Reading, H. G. (2000). "Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy". Department of Earth Sciences, University of Oxford. 688 pp.
- [29] Renaut, R.W., Gierlowski-Kordesch, E. (2010). "Lakes". *Facies models* 4a. edición. ed. Geological Association of Canadá pp. 541-575. Canadá
- [30] Schnurrenberger, D.; Russell, J. Y Kelts, K. (2003). "Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components". *Journal of Paleolimnology* 29: 141-154.
- [31] Shaw, G. R., Moore D. P., Garnett, C. (2003). "Eutrophication and algal blooms". *Environmental and ecological chemistry – vol II*.
- [32] Stupar, Y.V. (2014). "Trends and rates of mercury and arsenic in sediments accumulated in the last ~80 years in the climatic-sensitive Mar Chiquita system, Central Argentina". *Tesis Doctoral*. Universidad de Bordeaux-1 y Universidad Nacional de Córdoba.
- [33] Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos (2016) "Estimaciones Agrícolas" Tomado de <<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>> (marzo 2018)
- [34] Thompson, R., y Oldfield, F. (1986). "Environmental magnetism". 227p., Allen y Unwin.London.
- [35] Torres R. y P. Marconi. (2011). "Estado de Conservación de los Sitios Prioritarios Dulce y Mar Chiquita. Evaluación y Recomendaciones" -1a. ed.- Salta: Fundación Yuchan, 2011.
- [36] Troin M, Vallet-Coulomb C, Sylvestre F, Piovano E. L. (2010). "Hydrological modeling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina) in the context of 20th century climatic changes". *J Hydrol* 393:233-244