

Reconstrucción de escenarios de variabilidad hidroclimática y eutrofización cultural en la Laguna del Plata (Sistema de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba) a través de indicadores paleolimnológicos del registro sedimentario

Ingrid Costamagna^{1,2}, Silvana R. Halac^{2,3}, Marcia Ruiz² y Eduardo L. Piovano³

¹ FCEFyN- UNC

² INA – CIRSA

³ CICTERRA (CONICET-UNC)

E-mail: ingrid.costamagna@hotmail.com

RESUMEN: El estudio de indicadores paleolimnológicos físicos (facies sedimentarias, susceptibilidad magnética -SM-), químicos (Carbono Orgánico Total -COT-, Nitrógeno Total -NT- y Fósforo Total -PT-) y biológicos (paleopigmentos derivados de la clorofila -DC-) del registro sedimentario de la Laguna del Plata (LdP), sistema de la Laguna Mar Chiquita (LMC) (Córdoba, Argentina), permitió reconstruir la variabilidad ambiental ocurrida en los últimos 70 años y relacionarla con la variabilidad hidroclimática del sistema y con el impacto de las actividades agrícolas en la región. De esta manera, se identificaron 4 escenarios con características ambientales diferentes. El incremento en las concentraciones de NT y PT en el registro sedimentario de LdP a partir del año 1984 es sincrónico con el avance de la frontera agrícola en la región, la cual tuvo su expansión en la década de 1980. A su vez, los resultados remarcan el control que ejerce la variabilidad hidroclimática sobre el ingreso de nutrientes a la LdP permitiendo relacionar procesos antrópicos con naturales. Asimismo, se estableció 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. La importancia de este trabajo radica en que aporta al entendimiento de la dinámica ambiental a lo largo de los siglos XX y XXI, considerando la acción simultánea de forzantes naturales y antrópicos. Este es el primer trabajo del sistema de LMC que evalúa simultáneamente procesos de origen natural y antrópico y representa una herramienta útil para la proyección a futuro y el planeamiento de las actividades de la región.

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 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, las cuales pueden ser inferidas a través del análisis de indicadores o *proxies* (Renaut & Gierlowski-Kordesch, 2010). Estos constituyen un reflejo de las condiciones físicas, químicas y biológicas del cuerpo de agua al momento de su deposición (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 que en ellos se acumula (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-), la variación de la concentración de diferentes elementos químicos (Nitrógeno (N) y Fósforo (P)); los físicos incluyen la granulometría, y estructuras sedimentarias entre otras (Cohen, 2003). Mientras que, entre los indicadores biológicos, se encuentran los paleopigmentos, que son indicadores de biomasa algal (Guilizzoni et al., 2011).

Uno de los problemas de degradación temporal de las condiciones ambientales, asociados al impacto antrópico sobre los lagos y que puede ser estudiado mediante la paleolimnología, es la eutrofización cultural. Esta problemática está asociada al incremento de N y P proveniente de los ríos tributarios y/o de descargas difusas desde el perillago. Estos nutrientes son derivados de actividades antrópicas, como el uso de fertilizantes en la agricultura, la ganadería, descarga de efluentes urbanos e industriales. El exceso de ellos produce efectos biogeoquímicos y biológicos indeseables, tales como aumento exacerbado de la producción primaria, floraciones de algas potencialmente tóxicas, pérdida de oxígeno, mortandad de peces, pérdida de vegetación acuática, 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).

Debido a que los compuestos orgánicos e inorgánicos fosforados y nitrogenados quedan preservados en los sedimentos, pueden ser determinados en la columna sedimentaria y correlacionados con las variaciones de los paleopigmentos fotosintéticos, lo que permite 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 estos incrementos en las concentraciones de nutrientes están relacionados a actividades antrópicas, o bien son desencadenados por cambios hidroclimáticos, o la combinación de ambos procesos.

ÁREA DE ESTUDIO

La Laguna Mar Chiquita (LMC) es el lago salino más grande de Sudamérica. Está ubicada en el noreste de la provincia de Córdoba, 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°10' y 63°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 km² (Dasso et al., 2014) (Figura 1). La característica principal de este

sistema está dada por los cambios en la fluctuación de volumen, nivel y superficie que ha experimentado a lo largo del tiempo, como resultado de variaciones temporales en las precipitaciones regionales, lo que modificó sus dimensiones: desde 2000 km² antes de la década de 1970 bajo un régimen de déficit hídrico hasta 6500 km² 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).

La Laguna del Plata (LdP) es un pequeño cuerpo de agua salada 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 diferencian 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, mientras que en el sector sur de LdP (departamentos Río Primero y San Justo) se practica la agricultura intensiva.

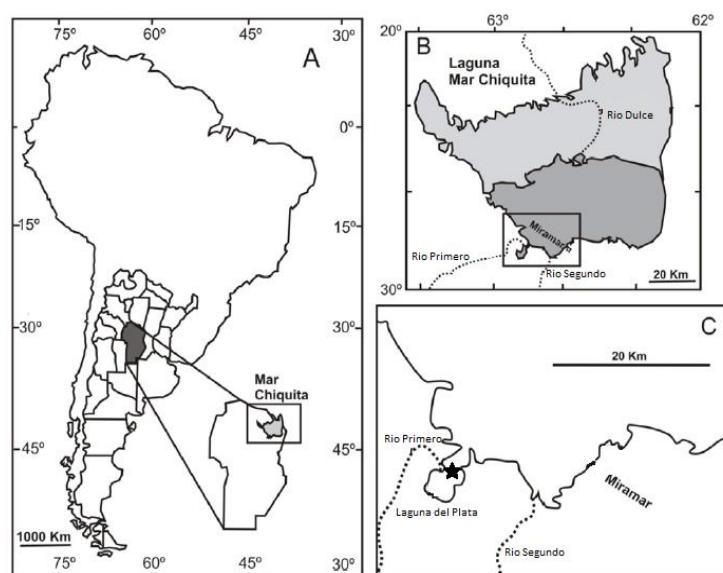


Figura 1.- A: Ubicación de la Laguna Mar Chiquita, B: Área ocupada por la Laguna Mar Chiquita en los estadios bajos (i.e., primeros años de la década de 1970 en gris oscuro) y durante los estadios altos (año 2003 en gris claro) C: Ubicación del lugar de muestreo. Tomado y modificado de Pilati et al. (2016)

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Extracción de testigos sedimentarios

Se realizó la extracción de dos testigos sedimentarios (TLP-17-I y TLP-17-II) (Figura 2); en la Laguna del Plata, en cercanías a la desembocadura del Río Primero (30° 54'48.4" S; 62° 51'16.4" O) (Figura 1C). El equipo utilizado es un Testificador de tipo *Hand Corer Beeker* de la marca Eijkelkamp, está integrado por dos cilindros metálicos que se colocan en los extremos del sacatestigo y un portatestigo que es un caño de PVC de 6 cm de diámetro y una longitud de aproximadamente 150 cm (Figura 2).

Luego de la extracción, el testigo se transportó y se conservó en el repositorio de testigos del CICTERRA¹ a 4°C.



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

2. *Procesamiento de testigos sedimentarios y análisis de laboratorio*

2.a *Tomografía computada*

Con la finalidad de reconocer estructuras sedimentarias, se realizaron tomografías computadas a ambos testigos cerrados (TLP-17-I y TLP-17-II) en el centro de diagnóstico por imagen del Hospital Misericordia.

2.b *Apertura y registro fotográfico*

Ambos testigos fueron abiertos y separados en mitades. Al testigo TLP-17-I se le realizaron fotografías para la posterior descripción macroscópica, mientras que el testigo TLP-17-II fue reservado para la realización del muestreo.

2.c *Susceptibilidad Magnética (SM)*

La determinación de la SM en los testigos se llevó a cabo con el equipo MS2E Barrington a alta resolución (cada 1 cm) sobre una de las mitades del testigo abierto. 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 & Oldfield, 1986). 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). Es importante destacar que 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; Lascu, 2009).

¹ Centro de Investigación en Ciencias de la Tierra, CONICET-UNC

2.d Descripción macroscópica y muestreo

Mediante la observación de las fotografías y la tomografía computada se realizó la descripción macroscópica del testigo, según el protocolo 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, teniendo en cuenta las estructuras identificadas mediante la tomografía computada y la descripción macroscópica. La frecuencia e intervalo de muestreo se definió teniendo en cuenta las diferencias de color, y estructuras presentes, sin un intervalo constante a lo largo del testigo. Se tomaron un total de 40 muestras.

2.e Determinación de Derivados de la clorofila (DC)

El método espectrofotométrico permite determinar la concentración de pigmentos fotosintéticos a partir de la cantidad de luz absorbida en longitudes de onda características para cada pigmento. Se siguió el protocolo de Golterman & Clymo, 1971. Se utilizaron 2g de sedimento húmedo y 10 mL de acetona (90% v/v) como solvente de extracción. La extracción se realizó durante 24 hs en oscuridad y a 4°C. Las lecturas de absorbancias se realizaron en un espectrofotómetro Shimadzu UV-1700 (Guilizzoni et al., 1983).

2.f Determinación de Fósforo Total (PT)

Se realizó el método de la Ignición, donde se pesó aproximadamente 0.5g de sedimento seco, se llevó a 550°C en mufla, y luego se realizó una digestión ácida con 50 mL HCL 1N a temperatura ambiente durante 16 hs (*Analytical Water Manual*, 1979). La determinación de PT fue realizada por el método colorimétrico del ácido ascórbico (SM 4500 PE, APHA1992).

2.g Determinación de materia orgánica (COT)

El contenido de materia orgánica se determinó 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 COT se obtuvo multiplicando el LOI₅₅₀ por un factor de 0,5, debido a que se considera que éste representa el 50% del contenido de materia orgánica (Dean, 1974).

2.h Determinación de Nitrógeno Total (NT)

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

3. 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 del PROMAR² respectivamente. Las precipitaciones medias regionales para la cuenca del Río Primero durante el siglo XX y XXI fueron tomadas de Caviola (2012) y completadas con datos de precipitaciones para la Ciudad de Córdoba provistos por el Servicio Meteorológico Nacional (<https://www.smn.gob.ar/>).

4. Información de actividades antrópicas en la región

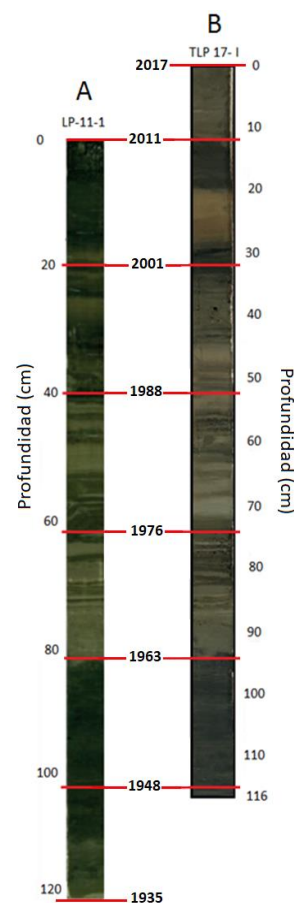
Los cambios en el uso del suelo en la región sur de LdP, relacionados a desmonte y agricultura, se obtuvo de información histórica de Mengui, 2006; Bucher *et al.*, 2006 y luego a partir del año 1970, se cuenta con datos de estimaciones agrícolas provenientes de la Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones (<http://datoestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>) a partir de las Has sembradas de los principales cultivos de la región (soja, trigo, maíz y girasol).

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Desarrollo del marco cronológico del testigo

Con la finalidad de determinar la edad de la secuencia sedimentaria de TLP-17-II, se extrapoló el modelo de edades ²¹⁰Pb realizado por Stupar (2014) en un testigo extraído en LdP en 2011 (LP-11-1). Se calcularon las tasas de sedimentación correspondientes para 5 períodos: AD³ 2011-2001; AD 2001-1988; AD 1988-1976; AD 1976-1963; AD 1963-1948, mientras que 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). Asumiendo que el techo del testigo TLP-17-II corresponde al año 2017, se extrapolaron las tasas de sedimentación a lo largo de éste, obteniendo que su base corresponde al año 1948 (Figura 3).

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



² PROMAR: Programa de investigación de la Laguna Mar Chiquita del Conicet y la UNC.

³ AD: *Anno Domini* es un indicador calendario equivalente al después de Cristo abreviado como d.C. para numerar los años de la era cristiana.

Tabla 1.- Tasas de sedimentación calculadas para los diferentes períodos de años.

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

2. Identificación y descripción de facies sedimentarias

El término facies se utiliza para denominar sedimentos con características específicas y contrastantes con el resto de las unidades (Schnurrenberger et al., 2003). Éstas se definieron en función del color (Según las hojas 5YR y 10 YR de la Tabla Munsell), laminación, composición química, textura, y estructuras sedimentarias observadas siguiendo los protocolos de Reading, 2000 y Schnurrenberger et al., 2003, realizando un análisis integral de los resultados obtenidos de la observación de las fotografías, tomografías y de los indicadores (SM, COT, PT, NT y DC). 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 la laminación se hace más evidente. Los primeros centímetros hasta los 94 cm presentan color pardo oscuro (10 YR 4/1) alternado con láminas pardo claro (10 YR 4/2), mientras que hacia la parte superior presenta un bandeo de colores pardo claro (5 YR 3/1) con intercalaciones pardo más oscuras (10 YR 3/2). El marco cronológico determinado permite asignar esta facies al período AD 1948 hasta 1972 (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 propuesto permite asignar esta facies al período que abarca desde el año AD 1972 hasta 1984 (Fig. 4). En comparación con la facies A, la facies B presenta un incremento del 165 % en NT, 703,9 % en DC y 39 % en COT, una disminución de la SM del 76,06 % (Tabla 2).

- Facies C: Facies de fangos oscuros bandeados a laminados

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

El marco cronológico propuesto permite asignar esta facies al período que abarca desde el año AD 1984 hasta 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. Color marrón claro (10 YR 4/2) abajo, mientras que hacia el techo predomina el color marrón oscuro (10 YR 4/1). Maciza a la vista, aunque en la tomografía es posible reconocer la laminación y la presencia de una estructura de deformación producto de la extracción del testigo.

El marco cronológico propuesto permite asignar esta facies al período que abarca desde el año 2003 a 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. Color pardo oscuro (10 YR 3/2) con láminas milimétricas marrón más 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 que abarca desde el año AD 2011 a 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. Esta contiene 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 y valores promedio, máximo y mínimo de indicadores medidos.

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

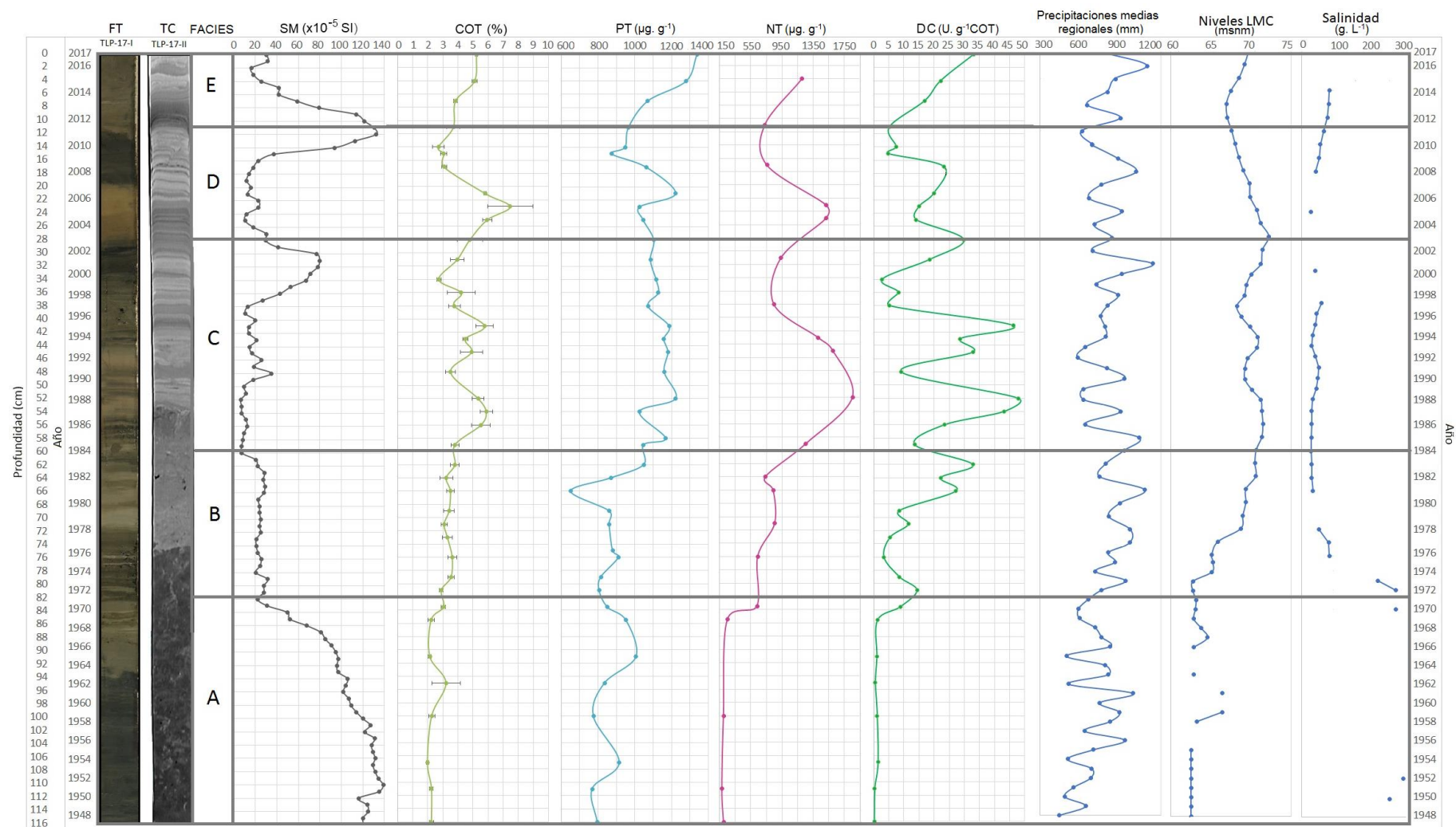


Figura 4.- FT (Fotografía), TC (Tomografía computada), facies determinadas y valores de indicadores medidos en el TLP-17-II. Indicadores hidroclimáticos (precipitaciones regionales, niveles y salinidad de LMC) obtenidos de datos instrumentales.

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

El desarrollo de un marco cronológico en las secuencias sedimentarias 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.

Al analizar las concentraciones de PT y NT, se puede ver una tendencia de incremento a través del tiempo, principalmente a partir de 1984, observándose también desde esta época fluctuaciones en las concentraciones de estos indicadores (Figura 5).

La actividad agrícola en la región tuvo un pulso de expansión a partir de la década del 1980. Previamente, la actividad agrícola fue escasa, debido principalmente a las condiciones de sequía de la región hasta la década de 1970 (Bucher *et al* 2006; Menghi, 2006; Figura 6), lo que coincide con las concentraciones bajas de PT y NT en la secuencia sedimentaria antes de 1984 (Figura 5). Las fluctuaciones en la concentración de estos nutrientes observadas a partir de 1984 (Figura 5), indicarían la presencia de otro factor de control además de la actividad antrópica. Si bien los aumentos de las concentraciones de NT y PT en los sedimentos permiten considerar una mayor disponibilidad de nutrientes para el período sincrónico con el avance de la frontera agrícola en la década de 1980, sería la variabilidad hidroclimática el factor determinante en el control del flujo de llegada 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, favoreciendo el transporte e ingreso de nutrientes a LdP.

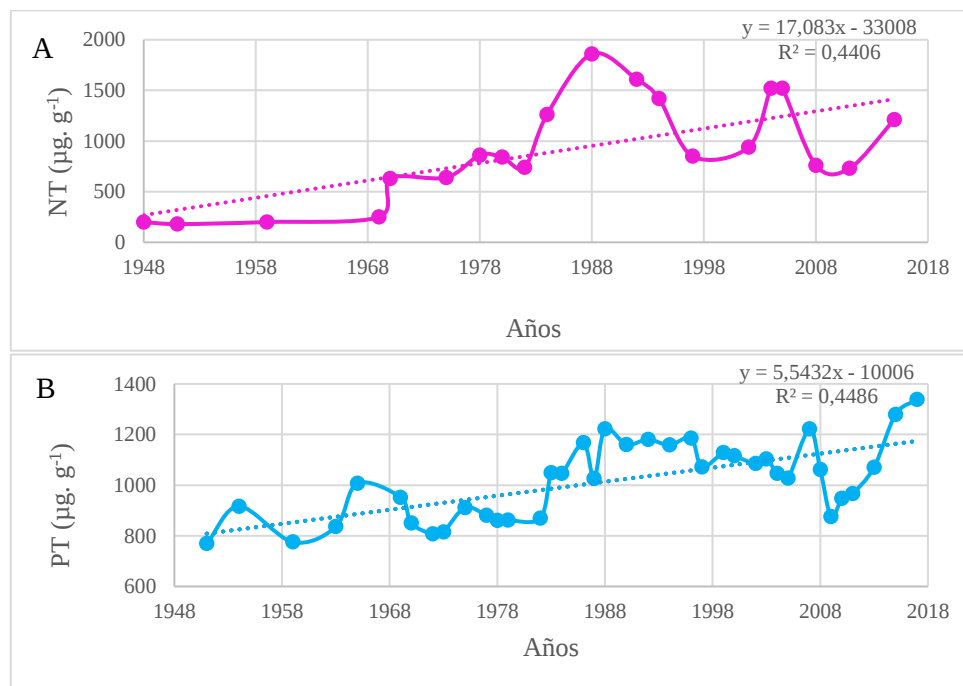


Figura 5.- Concentración de NT (a) y concentración de PT (b) en relación con el tiempo con ajuste a una función lineal

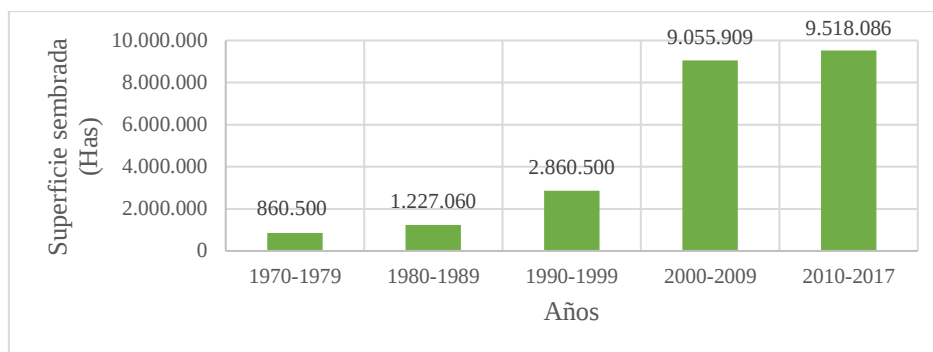


Figura 6.- Superficie sembrada por década en los departamentos San Justo y Rio Primero. Tomado de Dirección de Estimaciones Agrícolas y Delegaciones, Subsecretaría de Agricultura, Dirección Nacional de Estimaciones, Delegaciones y Estudios Económicos (2018).

4. Evolución del sistema en relación con los indicadores medidos, datos hidroclimáticos y actividades antrópicas de la región

Relacionando los indicadores medidos en la secuencia sedimentaria de LdP con la información hidroclimática (niveles y salinidades de LMC y precipitaciones regionales registradas durante el siglo XX y XXI) y los cambios en la actividad antrópica de la región (desarrollo agrícola), se realizó la reconstrucción ambiental del sistema, la cual abarca desde el año 1948 hasta la actualidad, definiéndose 4 escenarios en las que las condiciones ambientales fueron diferentes. Además, para explicar estos escenarios se realizó un modelo hidrobiogeoquímico (Figura 7) el cual incorpora los indicadores NT, PT, DC al previamente propuesto por Piovano *et al.* (2004)

- Escenario I (AD 1948-1971): Registrado por la facies A. Está caracterizado por el desarrollo de una extrema sequía, con precipitaciones medias regionales del orden de 685 mm. año⁻¹, niveles bajos y salinidades muy altas de LMC (270 g. L⁻¹) (Figura 4). Los valores bajos de los indicadores NT (292 µg. g⁻¹), PT (863 µg. g⁻¹), permiten considerar que el impacto antrópico asociado a actividad agrícola ha sido muy bajo o despreciable, mientras que las concentraciones bajas de los indicadores de producción primaria, COT (2,42 %) y DC (1,85 U. g⁻¹ COT), indican poco desarrollo de biomasa algal, asociados a la alta salinidad (Figura 7).
- Escenario II (AD 1972-1983): Registrado por la facies B. Se caracteriza por un aumento en las precipitaciones medias regionales, las cuales fueron del orden de 862 mm. año⁻¹ y niveles altos de LMC, con el consecuente descenso de la salinidad (50 g. L⁻¹) (Figura 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, considerándose éste también de bajo impacto antrópico. La disminución de la salinidad favorecería el desarrollo de organismos fotosintéticos, lo que se ve reflejado en los mayores picos de concentración de DC que en el escenario anterior (Figura 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

del orden de 861 mm. año⁻¹ y una salinidad promedio de 58 g. L⁻¹ (Figura 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⁻¹ COT) y COT (4,62 %) (Figura 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 del orden de 803 mm. año⁻¹ y salinidad promedio de 43 g. L⁻¹ (Figura 4). Si bien las actividades del hombre continúan incrementándose en el tiempo, aquí se observa una disminución de los indicadores medidos: NT (1267 µg. g⁻¹), PT (1021 µg. g⁻¹), DC (12,80 U. g⁻¹ COT) y COT (4,54%) lo que estaría asociado al cambio hidroclimático ocurrido (Figura 7).

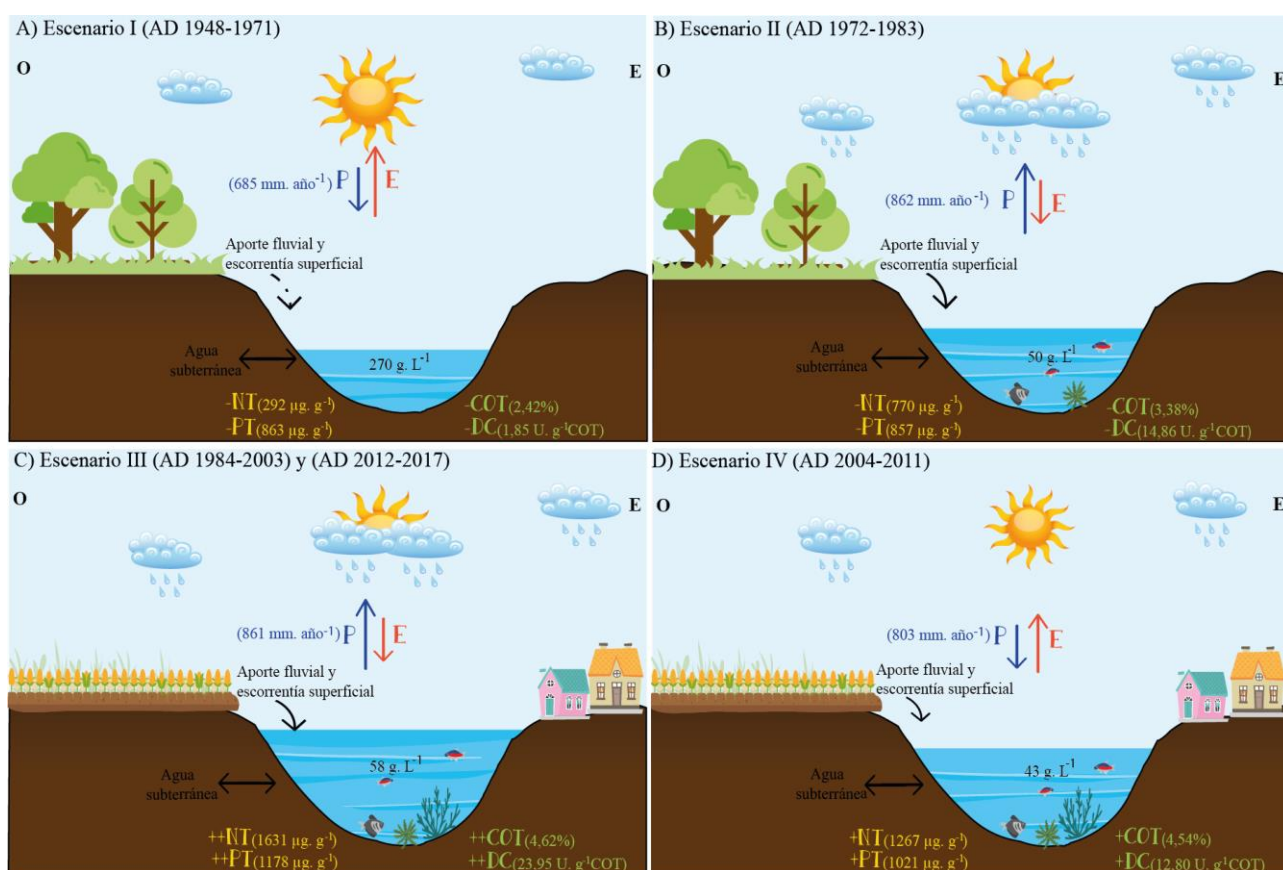


Figura 7.-Modelo hidrobiogeoquímico de evolución ambiental propuesto para LdP A) Escenario I (1948-1971), B) Escenario II (1972-1983), C) Escenario III (1984-2003) y (2012-2017), D) Escenario (2004-2011). La precipitación (P) y la evaporación (E) se representan con flechas, cuya longitud relativa es 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. El aporte por escorrentía fluvial y superficial están representados por una flecha y línea entrecortada antes de la década de 1970 (debido al escaso aporte durante la extrema sequía antes de esta década), mientras que después de esta, es indicada por una flecha sólida.

CONCLUSIONES

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

- Los análisis de multi-indicadores (SM, COT, PT, NT y DC) realizados en el registro sedimentario de LdP permitieron realizar la reconstrucción ambiental del sistema y definir 4 escenarios con características ambientales diferentes.
- Se observa un incremento en las concentraciones de NT y PT a partir del año 1984, el cual es sincrónico con el desarrollo agrícola de la región, el cual tuvo su expansión a mediados de la década de 1980 y fue en aumento progresivo a través del tiempo. Además, si bien las actividades antrópicas favorecen el incremento de nutrientes, la variabilidad hidroclimática es el factor que condiciona su flujo hacia LdP.
- Los indicadores de producción primaria (DC y COT) responden tanto a cambios hidroclimáticos como a eventos antrópicos, destacando que, bajo condiciones de alto impacto antrópico, es la mayor concentración de nutrientes asociado a estas actividades, el factor el que controla el crecimiento de la biomasa algal.
- Las tendencias de los indicadores mencionados evidencian que la eutrofización cultural del sistema ha ido en aumento progresivo, principalmente en las últimas 3 décadas.

REFERENCIAS

- Analytical Water Manual (1979) Ottawa, Canadá-. Naquadat (National Quality Data Bank).
- Apha, Awwa, Wpcf (1992). Métodos Normalizados para el análisis de agua potable y residual. Ediciones Diaz de Santos, Madrid España.
- 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.
- Bucher EH, Marcellino JA, Ferreyra CA, Molli AF (2006) Historia del Poblamiento Humano In: Bucher EH (ed) Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, pp 15–27.
- 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.
- 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.
- 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
- Cohen, A. S. (2003). Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems. Oxford University Press. New York.
- 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.
- 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.

- Dearing, J. (1999). Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system. Kenilworth, Chi Publ.
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M. & Robledo, C.W. (2012) InfoStat, version 2012, InfoStat Group, FCA - UNC, Argentina.
- Escobar, J.; Restrepo, J.C. Y Martínez, J. I. (2005) La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses. vol. 8 Núm. 2 pp. 51-59 - Universidad Nacional de Colombia - Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica.
- Golterman H.L. Clymo R.S. (1971). Methods for Chemical Analysis of Fresh Waters. IBP Handbook No. 8. Oxford & Edinburgh.
- 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
- 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
- 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.
- Lascu, I. (2009). Magnetic susceptibility logging for cores. Version 1.0. Limnological Research Center Core Facility – SOP series.
- Last, W. M., & Slezak, L. A. (1988). The salt lakes of western Canada: a paleolimnological overview. In *Saline Lakes* (pp. 301-316). Springer, Dordrecht.
- Menghi M (2006) Vegetación. In: Bucher EH (ed) *Bañados del Río Dulce y Laguna Mar Chiquita*. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, pp 173–189
- 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
- Piovano, E., D. Ariztegui, S.M. Bernasconi, y J. A. McKenzie, (2004). The isotopic record of hydrological changes in subtropical South America over the last 230 years. *The Holocene* 14:525- 535. Piovano E.L., Zanol G.A. & 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.
- Piovano, E.L., Zanol, G.A. & 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.
- 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 Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions: From the Last Glacial Maximum to the Holocene*. Springer- Developments in Paleoenvironmental Research Series (DPER) 14: pp 323-351.
- Reading, H. G. (2000). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Department of Earth Sciences, University of Oxford. 688 pp.
- Renaut, R.W., Gierlowski-Kordesch, E. (2010). *Lakes. Facies models* 4a. edición. ed. Geological Association of Canadá pp. 541-575. Canadá

- Shaw, G. R., Moore D. P., Garnett, C. (2003). Eutrophication and algal blooms. Environmental and ecological chemistry – vol II.
- Schnurrenberger, D.; Russell, J. Y Kelts, K. (2003). Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components. *Journal of Paleolimnology* 29: 141–154.
- 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.
- Thompson, R., & Oldfield, F. (1986). Environmental magnetism. 227p., Allen y Unwin.London.
- Torres R. & P. Marconi. (2011). Estado de Conservación de los Sitios Prioritarios Dulce y Mar Chiquita. Evaluación y Recomendaciones -1a. ed.- Salta: Fundación Yuchan, 2011.
- Troin M, Vallet-Coulomb C, Sylvestre F, Piovano El. (2010). Hydrological modeling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina) in the context of 20th century climatic changes. *J Hydrol* 393:233–244.
- Páginas web:
<http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Consultada en Marzo de 2018)
https://www.indec.gob.ar/nivel3_default.asp?id_tema_1=2&id_tema_2=41 (Consultada en Marzo de 2018)
<http://www.cba.gov.ar/nivel-de-diques-y-embalses/> (Consultada en Marzo de 2018)