

## UNA VISIÓN PALEOLIMNOLÓGICA DE LA VARIABILIDAD HIDROCLIMÁTICA RECIENTE EN EL CENTRO DE ARGENTINA: DESDE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO AL SIGLO XXI

*Francisco E. CÓRDOBA*<sup>1</sup>, *Lucía GUERRA*<sup>2</sup>, *Carolina CUÑA RODRÍGUEZ*<sup>2</sup>,  
*Florence SYLVESTRE*<sup>3</sup> y *Eduardo L. PIOVANO*<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Transferencia de Jujuy (CIT, Jujuy-CONICET), Instituto de Geología y Minería, Universidad Nacional de Jujuy. Av. Bolivia 1661, San Salvador de Jujuy, Argentina. francisco.e.cordoba@gmail.com

<sup>2</sup> Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (CICTERRA-CONICET), F.C.E.F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sarsfield 1611, X5016GCA Córdoba, Argentina. luciaguerra83@gmail.com, ccurarodriguez@gmail.com, epiovano@efn.uncor.edu

<sup>3</sup> CEREGE, Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Europôle méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France. sylvestre@cerege.fr

**Resumen:** En este trabajo se presenta una revisión de diferentes estudios paleolimnológicos previamente publicados y desarrollados en la región subtropical Argentina, con la finalidad de efectuar comparaciones latitudinales de la respuesta hidrológica de estos sistemas lacustres frente a las variaciones de la circulación atmosférica asociada a la dinámica del Sistema Monzónico Sudamericano desde la Pequeña Edad de Hielo (PEH) hasta la actualidad. Con este objetivo se analizan y comparan los registros paleolimnológicos recientes (~ 250 años) de las lagunas Mar Chiquita (Córdoba), Melincué (Santa Fe) y Encadenadas del Oeste (Buenos Aires). La necesidad de analizar integradamente la variabilidad hidroclimática de alta (1 a 10<sup>1</sup> años) y baja frecuencia (10<sup>2</sup> años en adelante) en el centro de Argentina toma relevancia a partir del gran “salto hidroclimático” ocurrido durante la década de los años 70 en el sudeste del continente sudamericano. Este cambio caracterizado por un aumento notable en las precipitaciones ha sido registrado como uno de los mayores saltos hidrológicos ocurridos en ambientes continentales a nivel global. Debido a que algunos patrones de variabilidad climática se caracterizan por períodos largos, es difícil discernir si la variabilidad ambiental observada es natural o bien corresponde a una señal de cambio con múltiples forzantes (antrópicos + naturales). En este sentido las reconstrucciones hidroclimáticas basadas en indicadores múltiples (sedimentología, geoquímica, bioindicadores, isótopos estables) permiten conocer la variabilidad ambiental durante un período superior al percibido por los habitantes de una región afectada, aportando a la sociedad el conocimiento básico para abandonar la idea del clima estacionario, suministrando además herramientas para efectuar eficientemente la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos. Las reconstrucciones paleohidrológicas y paleoambientales de las secuencias estudiadas indican que en general durante la finalización de la PEH predominaron condiciones áridas a lo largo de la región Pampeana, reflejadas por los niveles bajos a extremadamente bajos de las lagunas, con episodios de fases lacustres de niveles intermedios de menor duración. La PEH se habría extendido hasta la década de 1870/80 AD, momento que es indicado por el pasaje de sistemas lacustres efímeros a perennes. A partir de ca. 1870/80 AD y hasta 1976/77 AD se produce un mejoramiento climático progresivo a partir de un incremento sostenido de la humedad efectiva, que se refleja en los niveles intermedios alcanzados por las lagunas

desde la segunda mitad del siglo XIX. Durante los últimos ~ 40 años se establecieron los niveles lacustres más altos registrados desde la PEH, dando lugar al establecimiento de las condiciones actuales de las lagunas. Los resultados obtenidos permiten perfeccionar los modelos planteados sobre la variabilidad hidroclimática pasada en las regiones ubicadas hacia el E-SE de la Diagonal Árida Sudamericana y aportan información crucial para descifrar la actividad del Sistema Monzónico Sudamericano en su zona de influencia más austral.

**Palabras clave:** Cambios hidroclimáticos, Sistema Monzónico Sudamericano, Registros paleolimnológicos pampeanos, Llanura Chacopampeana.

## EXTENDED ABSTRACT

*A Paleolimnological perspective of recent hydroclimate variability in the Central Argentina: from the Little Ice Age to the 21<sup>th</sup> century*

This paper provides a review of the hydroclimatic variability reconstructions along the subtropical Argentinean region based on paleolimnological records from Laguna Mar Chiquita (Córdoba; Piovano *et al.*, 2002, 2004, 2009), Laguna Melincué (Santa Fe; Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015) to Lagunas Encadenadas del Oeste (LEO; Buenos Aires; Córdoba, 2012; Fig. 1). Lake records span two climatologically interesting periods, the so-called Little Ice Age (LIA; Grove, 2001; Wanner *et al.*, 2008) and the 20<sup>th</sup> century. Regional climate in the studied area is mainly defined by the South American Monsoon System that rules the precipitation regime and is one of the major atmospheric features driving seasonal climatic variability in southeastern South America (Vera *et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2011; Fig. 1). The need for an integral analysis of the high (1-10<sup>1</sup> years) and low (>10<sup>2</sup> years) frequency hydroclimatic variability associated with the South American Monsoon System activity becomes relevant when considering the significant “hydroclimatic jump” occurred during mid-1970s in the southeast of South America (Castañeda and Barros, 1994; Boulanger *et al.*, 2005; Piovano *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2011; Jacques-Coper and Garreaud, 2014). This “jump” toward humid conditions (Figs. 2, 3) has been recorded as one of the largest instrumentally recorded hydrological changes occurred globally in continental environments (Giorgi, 2002). Because some climate variability patterns are characterized by long periods, it is difficult to distinguish whether the observed environmental variability is natural

or corresponds to a climatic change with multiple forcing factors (natural plus anthropogenic). In this sense hydroclimatic reconstructions based on multiple proxies (sedimentology, geochemistry, biomarkers, stable isotopes) provide insight into how was environmental variability during a longer period than that perceived by the people of an affected region.

Results of instrumental data blended with multiproxy studies on sedimentary cores from Laguna Mar Chiquita (Fig. 5), Laguna Melincué (Fig. 6) and Lagunas Encadenadas del Oeste (Fig. 7) indicate that Pampean lake systems have clearly recorded hydrological variations around the end of the LIA (since AD 1770) to the present. Sedimentological, geochemical and isotopic data (Figs. 5, 6 and 7) combined with robust chronologies based on <sup>210</sup>Pb profiles (Fig. 4) and historical data (Piovano *et al.*, 2002, 2004; Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015; Córdoba, 2012; Córdoba *et al.*, en revisión) provide the framework for building a sedimentary model for Pampean shallow lakes with highly variable water depth and salinity (Fig. 8). Intervals with either negative or positive hydrological balances control lake water levels, salinity and primary productivity, and also the isotopic composition of both authigenic carbonate ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ) and sedimentary organic matter ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$ ). Extensive evaporation during lowstand stages results in an enrichment of <sup>18</sup>O and <sup>13</sup>C in the lake waters, and is recorded in the sediments as the most positive  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  compositions. Conversely, more negative  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  values are the result of increasing freshwater input into the lake system. Relatively low  $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$  values correspond with high lake levels, low salinity, low alkalinity and high lake productivity. High water salinity during lowstands diminishes the amount of primary production and the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$  value is correspondingly high. Lake water level

drops and concurrent increases in salinity promoted the development of evaporitic layers and a marked decrease in primary productivity. The deposits of these dry stages are evaporite-bearing sediments with a low organic matter content. Conversely, highstands are recorded as organic matter-rich muds. These results show that Pampean lakes are good sensors of high- and low-frequency changes in the recent hydrological budget and, therefore, document climatic changes at middle latitudes in south-eastern South America.

The paleohydrological reconstructions based on these Pampean lacustrine sedimentary sequences (Figs. 5, 6 and 7) allowed identifying three major environmental periods (Fig. 9). The paleolimnological records indicate that during the end of the LIA arid conditions prevailed along the Pampean region, reflected by low to extremely shallow-water depths, with shorter intermediate lake-level phases (Period III; Fig. 9). The LIA would have extended until AD 1870/1880, as indicated by the passage from ephemeral to perennial lake systems. From ca. AD 1870/1880 to 1976/1977 a progressive climate improvement after a sustained increase in effective moisture occurred along the region, reflected by the intermediate lake levels achieved since the second half of the nineteenth century (Period II; Fig. 9). During the last ~ 40 years the highest lake levels of the analyzed period were established, leading to the development of the present-day hydrological conditions (Period I).

These results allow improving the models based on past hydroclimatic variability in areas located east-southeast of American Arid Diagonal (Bruniard, 1982; Piovano *et al.*, 2009), and provide critical information to decipher South American Monsoon System activity in its southernmost influence area.

**Keywords:** Hydroclimatic changes, South American Monsoon System, Pampean paleolimnological record, Chacopampean Plains.

## INTRODUCCIÓN

El Sistema Monzónico Sudamericano es el principal responsable del notable incremento de las precipitaciones que ocurren durante el verano austral en la mayor parte del sudeste de Sudamérica (área comprendida entre los 20° y 40° de latitud sur, al este de los Andes; Fig. 1) (Zhou y Lau, 1998; Vera

*et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2011; Vuille *et al.*, 2012). El Monzón Sudamericano no sólo controla la precipitación de las regiones intertropicales del continente como en la Amazonia, sino también las extra-tropicales como el noroeste Argentino y Llanura Chacopampeana, afectando amplias regiones localizadas hacia el E-NE de la Diagonal Árida Sudamericana (Bruniard, 1982; Piovano *et al.*, 2009). Son numerosos los estudios que han demostrado que la actividad del monzón varía considerablemente a diferentes escalas temporales (interanual, interdecadal) y espaciales, y que su fluctuación estaría controlada por importantes conexiones locales, regionales y remotas (Zhou and Lau, 2001; Nogues-Paegle y Mo, 2002; Muza *et al.*, 2009; Carvalho *et al.*, 2011; Vuille *et al.*, 2012).

Una de las principales dificultades para caracterizar el comportamiento del Monzón Sudamericano a lo largo del sudeste de Sudamérica es la ausencia de registros instrumentales extendidos en el tiempo (es decir anteriores al siglo XX), limitando así el análisis de su variabilidad espacial y temporal más reciente, como por ejemplo desde el inicio del Período Cálido Actual a partir de 1900 AD (Bird *et al.*, 2011). En efecto, durante el Holoceno tardío, y particularmente para el último milenio, es escaso el conocimiento de cómo se ha comportado el Sistema Monzónico Sudamericano durante eventos climáticos globales como la Anomalía Climática Medieval y la Pequeña Edad de Hielo (PEH; Villalba, 1994; Piovano *et al.*, 2009; Bird *et al.*, 2011; Vuille *et al.*, 2012). En consecuencia, para predecir los futuros escenarios posibles en el contexto del calentamiento global en curso (IPCC, 2013), resulta fundamental conocer el funcionamiento del sistema climático y su variabilidad de baja frecuencia ( $10^2$ - $10^3$  años).

En la región Chacopampeana Argentina existen lagunas con ecosistemas altamente variables y dinámicos, que se caracterizan por ser muy sensibles a los cambios en la relación precipitación/evaporación y en consecuencia a la variabilidad climática (Ringuelet, 1967; Quirós *et al.*, 2002; Piovano *et al.*, 2002, 2004; Laprida y Valero-Garcés, 2009; Córdoba, 2012; Stutz *et al.*, 2014; Guerra *et al.*, 2015, entre otros). Los resultados obtenidos hasta el momento demuestran que estos sistemas responden con grandes fluctuaciones en su balance hidrológico y en sus características físicas, químicas y biológicas, las cuales quedan registradas en sus sedimentos (Piovano *et al.*, 2002, 2004, 2009; García-Rodríguez *et*

*al.*, 2009; Laprida y Valero-Garcés, 2009; Stutz *et al.*, 2012, 2014; Córdoba, 2012; Laprida *et al.*, 2014; Guerra *et al.*, 2015, entre otros).

La necesidad de analizar integradamente la variabilidad hidroclimática de alta (interanual a intradecadal) y baja frecuencia (interdecadal en adelante) toma relevancia a partir del gran “salto hidroclimático” ocurrido en el sudeste de Sudamérica como consecuencia de un aumento significativo de las precipitaciones a partir de la década de los años 70 (Castañeda y Barros, 1994; Boulanger *et al.*, 2005; Piovano *et al.*, 2009; Troin *et al.*, 2010; Carvalho *et al.*, 2011; Jacques-Coper y Garreaud, 2014). En este sentido es importante inscribir el análisis de la variabilidad hidroclimática reciente dentro de un contexto temporal mayor como el proporcionado por los archivos climáticos naturales (por ej., espeleotemas, testigos de hielo, dendroconología, paleolimnología, entre otros). Por ello, el análisis de registros climáticos naturales, como el proporcionado por los sedimentos lacustres, resulta de fundamental importancia para reconstruir fluctuaciones climáticas para períodos anteriores al inicio de las mediciones instrumentales. Para ello, en esta contribución se analizan y sintetizan los resultados obtenidos de diferentes estudios paleolimnológicos realizados en la región pampeana entre los 26° y 38° de latitud sur, con la finalidad de efectuar comparaciones latitudinales de la respuesta hidrológica de los sistemas lacustres frente a las variaciones de la circulación atmosférica asociada a la dinámica del Monzón Sudamericano desde la PEH hasta la actualidad. Para lograr este objetivo se analizan y comparan de manera integrada las reconstrucciones paleohidrológicas y paleoclimáticas desarrolladas y publicadas previamente de diferentes registros paleolimnológicos. Ellos corresponden a las lagunas Mar Chiquita (Córdoba; Piovano *et al.*, 2002, 2004, 2009), Melincué (Santa Fe; Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015) y Encadenadas del Oeste (Buenos Aires; Córdoba, 2012; Córdoba *et al.*, en revisión), las cuales fueron efectuadas bajo el análisis de indicadores múltiples (facies, geoquímica, isótopos y bioindicadores). Analizadas de manera conjunta, estas reconstrucciones permiten identificar y cotejar no sólo las señales de la variabilidad de alta y baja frecuencia con mayor confiabilidad, sino también la respuesta de los sistemas naturales frente a forzantes climáticos durante períodos con baja y alta influencia antrópica (por ej., Pequeña Edad

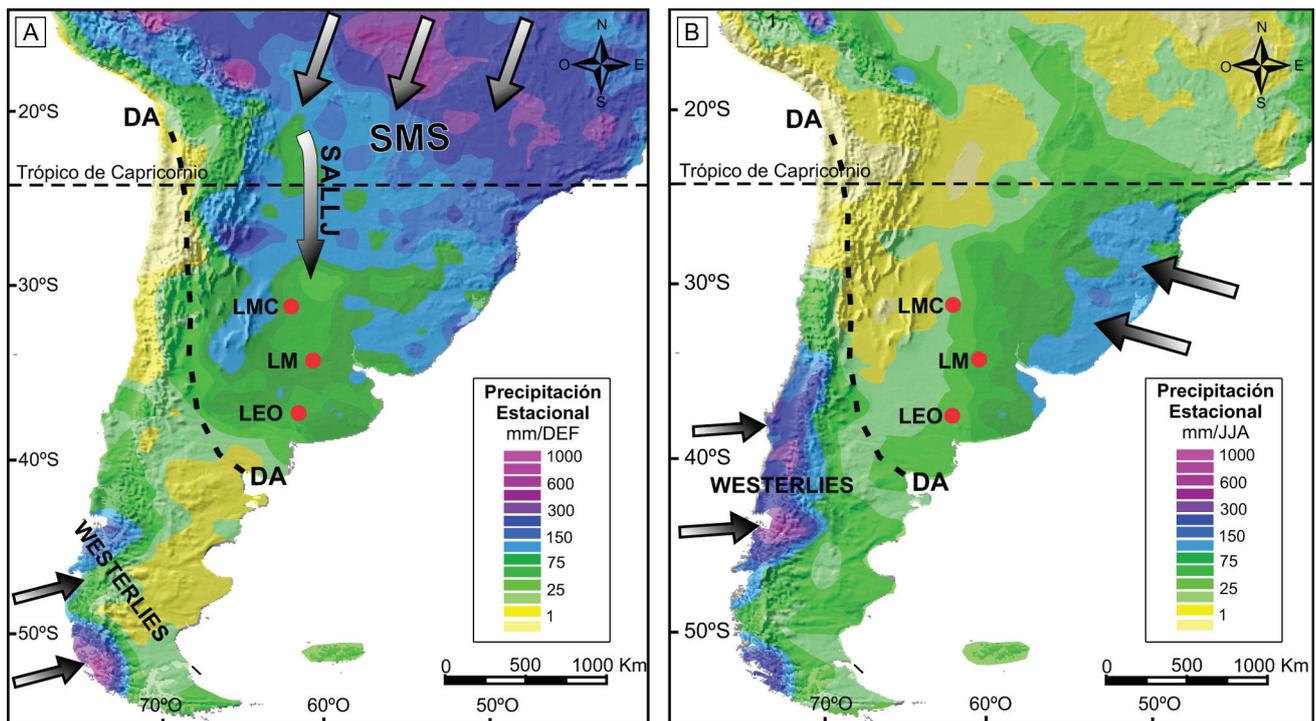
de Hielo vs Período Cálido Actual) inscribiendo la variabilidad actual dentro de un marco temporal más prolongado que el proporcionado por los registros instrumentales.

## ÁREA DE ESTUDIO

### Ubicación, marco geológico y climático

Los sistemas lacustres presentan una configuración del tipo hidrológica mixta y cerrada, como la mayoría de los cuerpos de agua ubicados en la llanura Chacopampeana. Se consideran aquí a la laguna Mar Chiquita (30°S-62°O; Córdoba), laguna Melincué (33°S-61°O; Santa Fe) y Lagunas Encadenadas del Oeste (LEO; 37°S-62°O; Buenos Aires) (Fig. 1). Las lagunas se localizan a lo largo de una transecta N-S dentro de la región Pampeana caracterizada por ser una extensa llanura de más de 1.000.000 km<sup>2</sup> (Chebli *et al.*, 2000), que puede ser considerada como una planicie continua, suavemente ondulada y con alturas por debajo de los 200 m s.n.m., sólo interrumpida en la parte sur por los sistemas serranos de Tandilia y Ventania, y por las Sierras Subandinas y Pampeanas hacia el oeste. Mantos de sedimentos loésicos y arenas finas, ampliamente distribuidos y con importante desarrollo de paleosuelos, caracterizan el registro reciente de la mayor parte de esta región (Zárate, 2003).

El principal forzante del balance hidrológico de las lagunas está dado por la actividad del Sistema Monzónico Sudamericano (Fig. 1), el cual juega un rol fundamental en la distribución y variabilidad temporal de la precipitación. En los meses más cálidos (de diciembre a marzo) el pasaje de aire húmedo y cálido desde el norte hacia el centro de Argentina asociado a la Corriente en Chorro de Capa Baja (Vera *et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2009) se intensifica debido al corrimiento de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur hacia el sur, y es en este periodo cuando se registra la mayor cantidad de precipitaciones del año (Garreaud *et al.*, 2009). La Corriente en Chorro de Capa Baja es la responsable del transporte meridional de vapor de agua hacia el centro de Argentina (Fig. 1) activando la convección y precipitación, y junto con la Zona de Convergencia del Atlántico Sur y el Anticiclón del Atlántico, constituyen elementos determinantes del comportamiento del Sistema Monzón Sudamericano en la llanura Chacopampeana (Vera *et al.*,



**Figura 1.** Componentes principales de la circulación atmosférica estacional en Sudamérica (SMS: Sistema Monzónico Sudamericano, SALLJ: Corriente en Choro de Capa Baja y Westerlies: Vientos del Oeste) y localización de los sistemas lacustres estudiados en la región Chacopampeana: Laguna Mar Chiquita (LMC), Laguna Melincú (LM) y Lagunas Encadenadas del Oeste (LEO). La línea de puntos indica la posición de la Diagonal Árida Sudamericana (DA). a) Precipitación de verano (DEF, Diciembre-Enero-Febrero; GPCC Full Data Product Version 4 Gauge-Based Analysis 0,5 degree, 2001-2002 en mm/mes). b) Precipitación de invierno (JJA, Junio-Julio-Agosto; GPCC Full Data Product Version 4 Gauge-Based Analysis 0,5 degree, 2001 en mm/mes).

**Figure 1.** Main components of the seasonal atmospheric circulation patterns in South America (SMS: South American Summer Monsoon, SALLJ: South American Low Level Jets, and Westerlies) and location of studied lake systems across the Chacopampean region: Laguna Mar Chiquita (LMC), Laguna Melincú (LM) and Lagunas Encadenadas del Oeste (LEO). Dashed-line indicates the position of the South America Arid Diagonal (DA). (a) Austral summer precipitation (DJF, December-January-February; GPCC Full Data Product Version 4 Gauge-Based Analysis 0.5 degree, precipitation 2001–2002 in mm/month). (b) Austral winter precipitation (JJA, June-July-August; GPCC Full Data Product Version 4 Gauge-Based Analysis 0.5 degree, precipitation 2001 in mm/month).

2006; Garreaud *et al.*, 2009). De esta manera, el comportamiento del Monzón Sudamericano determina el balance hídrico a lo largo de esta región y tiene una influencia y un impacto directo en la dinámica de los sistemas lacustres pampeanos (Piovano *et al.*, 2009; Troin *et al.*, 2010).

En comparación con otras regiones continentales del planeta, el sudeste de Sudamérica mostró uno de los mayores incrementos en las precipitaciones anuales durante la segunda mitad del siglo XX (Giorgi, 2002) relacionado con una intensificación del monzón, con aumentos en los promedios regionales que superan el 10%, pudiendo en algunas áreas superar el 30% (Castañeda y Barros, 1994; Troin *et al.*, 2010; Carvalho *et al.*, 2011; Jacques-Coper y Garreaud, 2014). Este incremento en las lluvias se

manifestó como un aumento en la descarga de los ríos que forman parte de la cuenca del Plata (Genta *et al.*, 1998; Pasquini y Depetris, 2007) y en el nivel de los sistemas lacustres pampeanos (Piovano *et al.*, 2002, 2009; Córdoba, 2012; Guerra *et al.*, 2015). Esta variabilidad hidroclimática ha tenido un gran impacto socioeconómico ya que la región está habitada por más de 200 millones de habitantes y genera casi la totalidad de la producción hidroeléctrica y cerealera de los países que la integran (Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay). En particular, el aumento en las precipitaciones repercutió dramáticamente sobre algunas localidades ubicadas en el litoral de las lagunas de la región Pampeana (por ej. Miramar en Córdoba, Melincú en Santa Fe o Carhué en Buenos Aires) que fueron fundadas en la segunda

mitad del siglo XIX durante un escenario hidrológico de sequías extensivas (Piovano *et al.*, 2006; Leroy *et al.*, 2010), sincrónico con la Pequeña Edad de Hielo. A pesar de los escenarios pronosticados por el IPCC, el registro instrumental de las precipitaciones y de niveles de agua de los sistemas lacustres pampeanos señala un importante reverso hacia una fase menos húmeda a partir del año 2003.

### Generalidades de los sistemas lacustres analizados

**Laguna Mar Chiquita (Córdoba).** La laguna Mar Chiquita (30°54'S; 62°51'O) posee un origen tectónico (Brunetto e Iriondo, 2007; Mon y Gutiérrez 2009) y se ubica en el noreste de la provincia de Córdoba, en la región de la llanura Pampeana denominada Pampa Norte (Fig. 1). Durante los niveles altos de agua, constituye el sistema lacustre de mayor superficie de Sudamérica y uno de los más grandes del mundo. La laguna conforma el receptáculo final de un sistema endorreico de aproximadamente 127.000 km<sup>2</sup> integrado por las cuencas de los ríos Suquía, Xanaes, Salí-Dulce, y por pequeños sistemas dispersos (Piovano *et al.*, 2002). Como respuesta a la alta variabilidad del balance hidrológico su superficie puede variar entre 2.000 y más de 6.000 km<sup>2</sup>, lo cual se asocia a un importante cambio de altura de su línea de costa (~ 8 m) y salinidad (27 - 360 g L<sup>-1</sup>). A partir de la década de los años 1970 la laguna presentó un importante incremento en su nivel, el cual aunque con oscilaciones, llegó a un valor máximo durante el año 2003. Las aguas son alcalinas (pH > 8) y de composición clorurada sulfatada sódica (Martínez *et al.*, 1994). Durante períodos de niveles bajos, está sobresaturada en calcita y yeso mientras que durante las fases de niveles altos permanece sobresaturada sólo en calcita y excepcionalmente en yeso. La escasa profundidad (10 m durante estadios de nivel alto), en combinación con los vientos, da lugar a una columna de agua completamente mezclada.

Este sistema lagunar ha sido objeto de numerosos estudios, entre los cuales se pueden mencionar los de Martínez *et al.* (1994), Piovano *et al.* (2002, 2004, 2009), da Silva *et al.* (2008), Troin *et al.* (2010), Stupar *et al.* (2014) y Coianiz *et al.* (2015).

**Laguna Melincué (Santa Fe).** La laguna Melincué se localiza en el centro de la Llanura Pampeana (33°43'S; 61°28'O), en la zona denominada Pampa

de las Lagunas, formando parte de un bloque tectónicamente hundido (Pasotti *et al.*, 1984). El agua de la laguna es fuertemente alcalina (pH > 9), bicarbonatada sódica y con salinidades variables (STD > 2 ppm). Constituye un sistema endorreico somero (~ 4 m de profundidad máxima en 2003). Su localización en una zona de muy baja pendiente (< 5%) provoca que pequeños cambios de niveles se traduzcan en grandes variaciones en la superficie del cuerpo de agua. Como consecuencia de los cambios en las precipitaciones regionales, esta laguna experimentó notables fluctuaciones a lo largo de los siglos XX y XXI (Guerra *et al.*, 2015). Actualmente, la cuenca de drenaje tiene una superficie de 678 km<sup>2</sup>, de los cuales la laguna ocupa un área de 57,3 km<sup>2</sup> (de acuerdo a mediciones de abril de 2011). La máxima extensión y profundidad de la laguna se alcanzó durante el año 2003, de forma contemporánea a la expansión del resto de las lagunas pampeanas, cuando la superficie del cuerpo lacustre llegó a ocupar un área de 145 km<sup>2</sup>.

**Lagunas Encadenadas del Oeste (Buenos Aires).** El sistema endorreico de las Encadenadas del Oeste está ubicado en el sur de la llanura Pampeana (36°S; 62°O) y comprende cinco lagunas principales interconectadas (lagunas Alsina, Cochicó, del Monte, del Venado y Epecuén) y alineadas sobre una depresión regional de dirección noreste-sudoeste, el Lineamiento Vallimanca (Cingolani, 2005). Su cuenca abarca una superficie de unos 15.600 km<sup>2</sup>, incluye los sistemas fluviales que drenan el flanco norte de las sierras de Curamalal, Bravard y Ventana (Sistema de Ventania, Fig. 1). Durante el siglo XX-XI, el tamaño total del sistema lacustre ha variado aproximadamente entre 600 km<sup>2</sup> después de un período húmedo y 350 km<sup>2</sup> bajo condiciones de déficit hídrico (IATASA, 1994). A partir de 2003-2005, el sistema experimentó una caída de niveles de agua que se mantiene hasta la actualidad, y de forma contemporánea con el resto de las lagunas pampeanas. En general, las lagunas poseen elevada salinidad, con un marcado gradiente en sentido este-oeste con su cota mínima en la laguna Epecuén (por ej., lagunas del Monte: 3,96 g L<sup>-1</sup>, del Venado: 5,86 g L<sup>-1</sup> y Epecuén: 56,75 g L<sup>-1</sup> de SDT). Las aguas de las lagunas son cloruradas sódicas y presentan valores de pH que varían entre 8,22 y 9,05, evidenciando su carácter netamente alcalino.

A diferencia de los otros sistemas lacustres, las

Encadenadas del Oeste se encuentran próximas al límite sur de la Diagonal Árida Sudamericana (Fig. 1), en una zona de transición entre la influencia más austral de la Corriente en Chorro de Capa Baja y la circulación dominante de los Vientos del Oeste. De esta manera se sitúan en un área clave para detectar los cambios de humedad efectiva directamente relacionados con la intensidad y posición más austral de la Corriente en Chorro de Capa Baja en el pasado.

## MATERIALES Y METODOLOGÍA

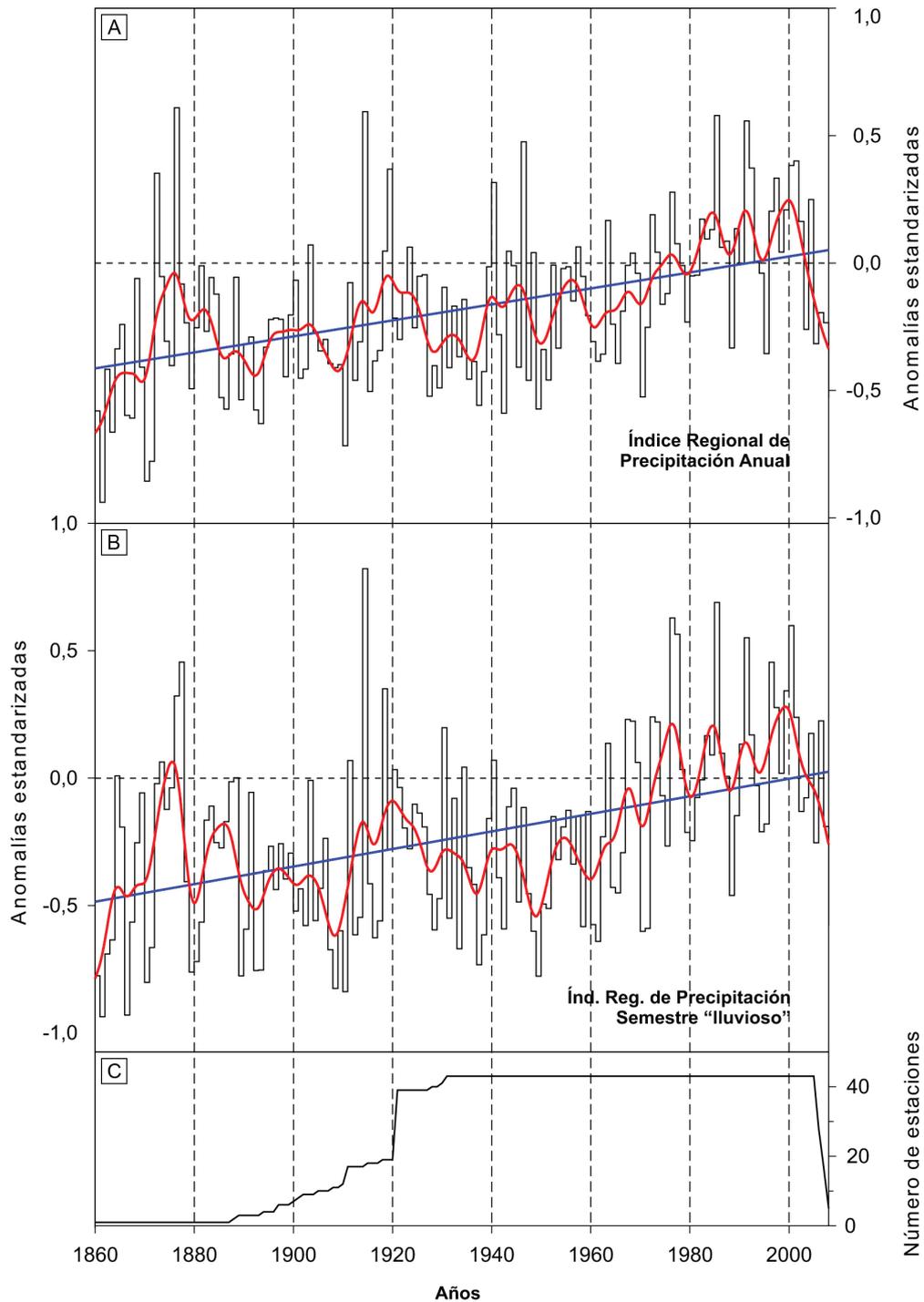
Con la finalidad de analizar las fluctuaciones hidroclimáticas ocurridas en la región Chacopampeana argentina durante los últimos ~ 250 años, se compararon las reconstrucciones paleohidrológicas y paleoclimáticas obtenidas a partir de los registros paleolimnológicos de las lagunas Mar Chiquita, Melincué y Encadenadas del Oeste (Fig. 1). Para ello, se analizaron y compararon las variaciones de los indicadores ambientales de diversa naturaleza (sedimentaria, mineralógica y geoquímica) estudiados previamente a lo largo de las secuencias. Sobre la base del análisis integral de los indicadores ambientales se definieron diferentes facies sedimentarias, a partir de las cuales se determinaron unidades sedimentarias que representan distintas condiciones ambientales durante la evolución pasada de las lagunas. El marco geocronológico para cada testigo se elaboró mediante dataciones radioisotópicas de  $^{210}\text{Pb}$  en los sedimentos más recientes, lo que permitió elaborar un modelo de edades e identificar los sedimentos acumulados durante los últimos 100-150 años, que abarcan aproximadamente los primeros 50-70 cm de cada testigo. Las edades de los sedimentos más antiguos se obtuvieron al extender cada modelo cronológico por debajo del último nivel datado. La cronología  $^{210}\text{Pb}$  permitió correlacionar los registros sedimentarios y comparar la respuesta de cada sistema a lo largo de los últimos ~250 años. Los detalles de las metodologías utilizadas para la datación de los sedimentos y para los análisis sedimentológicos, geoquímicos e isotópicos pueden encontrarse en Piovano *et al.* (2002, 2004), Guerra (2015), Guerra *et al.* (2015), Córdoba (2012) y Córdoba *et al.* (en revisión). Una discusión detallada de los modelos cronológicos de  $^{210}\text{Pb}$  utilizados y las dificultades y limitaciones que presentan los registros radiométricos pampeanos puede encontrarse en Córdoba *et al.* (en revisión). El

análisis en conjunto las reconstrucciones planteadas permitió identificar un patrón regional y temporal de los cambios hidrológicos ocurridos en la región central de Argentina.

## RESULTADOS

### Registro instrumental e histórico de variables hidroclimáticas

**Precipitaciones.** El inicio de las primeras mediciones instrumentales de precipitación en la región pampeana (AD 1860) coincide aproximadamente con la finalización del enfriamiento global conocido como la PEH (Grove, 2001; Wanner *et al.*, 2008) y por lo tanto, las series de lluvias registran la transición hacia las condiciones hidroclimáticas actuales (Período Cálido Actual; Bird *et al.*, 2011). En particular, la figura 2 presenta los Índices Regionales de Precipitación Anual (IRP-A; enero-diciembre) y del semestre “lluvioso” o monzónico (IRP-SL; octubre-marzo) los cuales fueron construidos a partir del registro de precipitaciones mensuales de 42 estaciones meteorológicas localizadas en el SO de la llanura Chacopampeana (Córdoba, 2012). Las series de precipitaciones mensuales homogeneizadas (período 1860-2008) se expresaron como anomalías estandarizadas con respecto al periodo de referencia 1961–2000. Las anomalías negativas corresponden a periodos con déficit hídricos mientras que las positivas indican intervalos húmedos. El análisis de la evolución de las precipitaciones en la región Chacopampeana muestra en general un dominio de anomalías negativas desde el año 1860 AD hasta la década de 1970, con los valores más bajos entre 1860-1870, 1890-1910 y 1930-1939 AD (Fig. 2). Este último intervalo de sequía es conocido en la región Chacopampeana como el “*Dust Bowl Pampeano*” (Viglizzo y Frank, 2006; Tripaldi *et al.*, 2013) por las graves consecuencias económicas y sociales que generó y que son comparables con las consecuencias y pérdidas del *American Dust Bowl* en Estados Unidos para la misma década (Shubert *et al.*, 2004). Intervalos más húmedos con anomalías positivas se reconocen durante 1872-1878, 1915-1927, 1940-1949 y 1976-2003 AD. Por otro lado, si bien las tendencias en general han sido positivas desde el fin de la PEH a lo largo de la región (Castañeda y Barros, 1994; Barros *et al.*, 2000), se destaca el pronunciado incremento a partir de la década de los años 70.



**Figura 2.** Series de precipitaciones mensuales homogeneizadas (período 1860-2008) expresadas como anomalías estandarizadas con respecto al periodo de referencia 1961–2000 en el SO de la región Chacopampeana. A partir de las series de datos mensuales se obtuvieron medias ponderadas para los Índices Regionales de Precipitación: (a) Anual (IRP-A; abril-marzo) y (b) del semestre “lluvioso” (IRP-SL; Octubre-Marzo). La línea azul representa la tendencia de cada serie construida por mínimos cuadrados. La línea roja corresponde a un filtro gaussiano de 10 términos y permite resaltar los patrones de variabilidad de baja frecuencia en cada índice. (c) Número de estaciones incluidas en los cálculos de los índices regionales para cada año (modificado de Córdoba, 2012).

**Figure 2.** Homogenized monthly precipitation series were converted to standardized anomalies with respect to the 1961–2000 reference period and subsequently weighted average to create two regional precipitation indices: (a) Annual Precipitation Index (IRP-A; April-March) and (b) Wet Precipitation Index (IRP-SL; October-March). Least squares linear trend (blue straight line) and smoothed (applying a 10-year Low-pass Gaussian filter) are shown to highlight the trend and the low-frequency patterns in the indices. (c) Number of stations contributing to the regionally-averaged precipitation indices in any given year (modified from Córdoba, 2012).

Análisis estadísticos (tests Mann-Kendall y Kendall estacional) confirman el desarrollo de una tendencia positiva estadísticamente significativa en todos los observatorios (Córdoba, 2012), corroborando los resultados obtenidos en estudios previos (por ej., Castañeda y Barros, 1994; Barros *et al.*, 2000; Troin *et al.*, 2010). La información muestra además que este aumento no se produce simultáneamente a lo largo de la región Pampeana mostrando importantes variaciones intra-regionales (Castañeda y Barros, 1994; Penalba y Vargas, 2004; Córdoba, 2012; Guerra, 2015, Guerra *et al.*, 2015). Por ejemplo, en la cuenca de las lagunas Encadenadas del Oeste el aumento de la precipitación media anual fue de un 30% a partir de la década del 70 y originó un corrimiento de las isohietas hacia el SO (~200 km), provocando una mayor frecuencia de inundaciones, como así también de áreas anegadas con lagunas casi permanentes. Los resultados obtenidos concuerdan parcialmente con las observaciones realizadas por Compagnucci *et al.* (2002), quienes analizando series de precipitación en la región centro-oeste de Argentina reconocen el cambio climático iniciado en la década de 1970, evidenciado por un aumento en las precipitaciones del semestre cálido (octubre-marzo) vinculadas a una intensificación del Monzón Sudamericano. La variabilidad hidroclimática en el área de la laguna Mar Chiquita (Piovano *et al.*, 2004) y de la laguna Melincué (Guerra, 2015) muestra patrones temporales similares al identificado en la región de las Encadenadas del Oeste, señalando la acción de este sistema monzónico como control principal del balance hidrológico de la región.

**Niveles limnimétricos y salinidad.** Los registros históricos e instrumentales de las lagunas (alturas limnimétricas o niveles lacustres y salinidades) permiten identificar importantes cambios ambientales en las lagunas, los cuales están íntimamente asociados a los cambios en las precipitaciones ocurridos durante los últimos ~120 años (Fig. 3). La medición instrumental de alturas limnimétricas expresadas en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.), se inicia en la laguna Melincué a partir de la década de 1930, mientras que en Mar Chiquita y las Encadenadas del Oeste se realiza desde finales de la década de 1960 (Fig. 3). Particularmente, las lagunas Mar Chiquita y Epecuén presentan los registros de salinidades más completos y extendidos en el tiempo (Fig. 3), mientras que el

resto de las lagunas que forman parte del sistema de las Encadenadas del Oeste (lagunas del Venado, del Monte) y Melincué exhiben menor información a lo largo del siglo XX-XXI. En general, niveles lacustres relativamente bajos y valores elevados de salinidad (por ej., 374 g L<sup>-1</sup>, en AD 1903 en Epecuén o 251 g L<sup>-1</sup>, en AD 1951 en Mar Chiquita), tuvieron lugar desde finales del siglo XIX hasta la década de 1970. Como se observa en la figura 3, valores de salinidad mayores a 300 g L<sup>-1</sup> (por ej., 340 g L<sup>-1</sup> en Epecuén en AD 1886 o 360 g L<sup>-1</sup> en Mar Chiquita en AD 1911) caracterizan la etapa de niveles muy bajos que habría tenido lugar hacia fines del siglo XIX y comienzos del siglo XX. Por el contrario, valores más bajos de salinidad, y por lo tanto niveles lacustres relativamente más altos, coinciden con el registro de un aumento precipitaciones y crecida de arroyos, lo cual está documentado por los periódicos locales y antiguos pobladores de la zona de Mar Chiquita y las Encadenadas del Oeste entre 1915 y 1922 (Torrente y Bonorino, 1988; González *et al.*, 1990; Piovano *et al.*, 2002; Córdoba, 2012; Fig. 3). El registro de valores elevados de salinidad durante la década de 1930 (por ej., 259 g L<sup>-1</sup> en Mar Chiquita o 381 g L<sup>-1</sup> en Epecuén) son el resultado de un descenso dramático en los niveles de las lagunas a raíz de una disminución de las precipitaciones. El desarrollo de esta fase de sequía, de carácter regional es conocido como el *Dust Bowl Pampeano* (Viglizzo y Frank, 2006). Los niveles bajos dominaron hasta la década de 1970, si bien se registraron también algunos pulsos cortos de incremento de niveles, como por ejemplo los ocurridos entre 1870-1880 AD, 1915-1922 AD, 1939/40 -1949 AD y particularmente entre 1959 -1961 AD en Mar Chiquita (Piovano *et al.*, 2002).

Los registros limnimétricos muestran un aumento sincrónico de los niveles lacustres a partir del año 1972/73 como consecuencia del marcado aumento en las precipitaciones que ocurre en la región Chacopampeana a partir de finales de la década de 1970 (Fig. 2). Luego de este notable aumento de niveles, sin precedentes tanto en los registros históricos como instrumental, las lagunas se mantuvieron con niveles relativamente altos y fluctuantes, y valores comparativamente bajos de salinidad (por ej., 38 g L<sup>-1</sup> en Epecuén en 1987; 35 g L<sup>-1</sup> en Mar Chiquita en 1989; 3,6 g L<sup>-1</sup> en Melincué en 2005). Durante este período “hiper-húmedo” o de balances hídricos positivos, el registro instrumental de las lagunas muestra fluctuaciones relativamente sincrónicas y en fase. A

partir del año 2003-2005 todos los sistemas exhiben un descenso abrupto de niveles que se mantiene hasta la actualidad, asociado a la disminución de las precipitaciones regionales (Fig. 2).

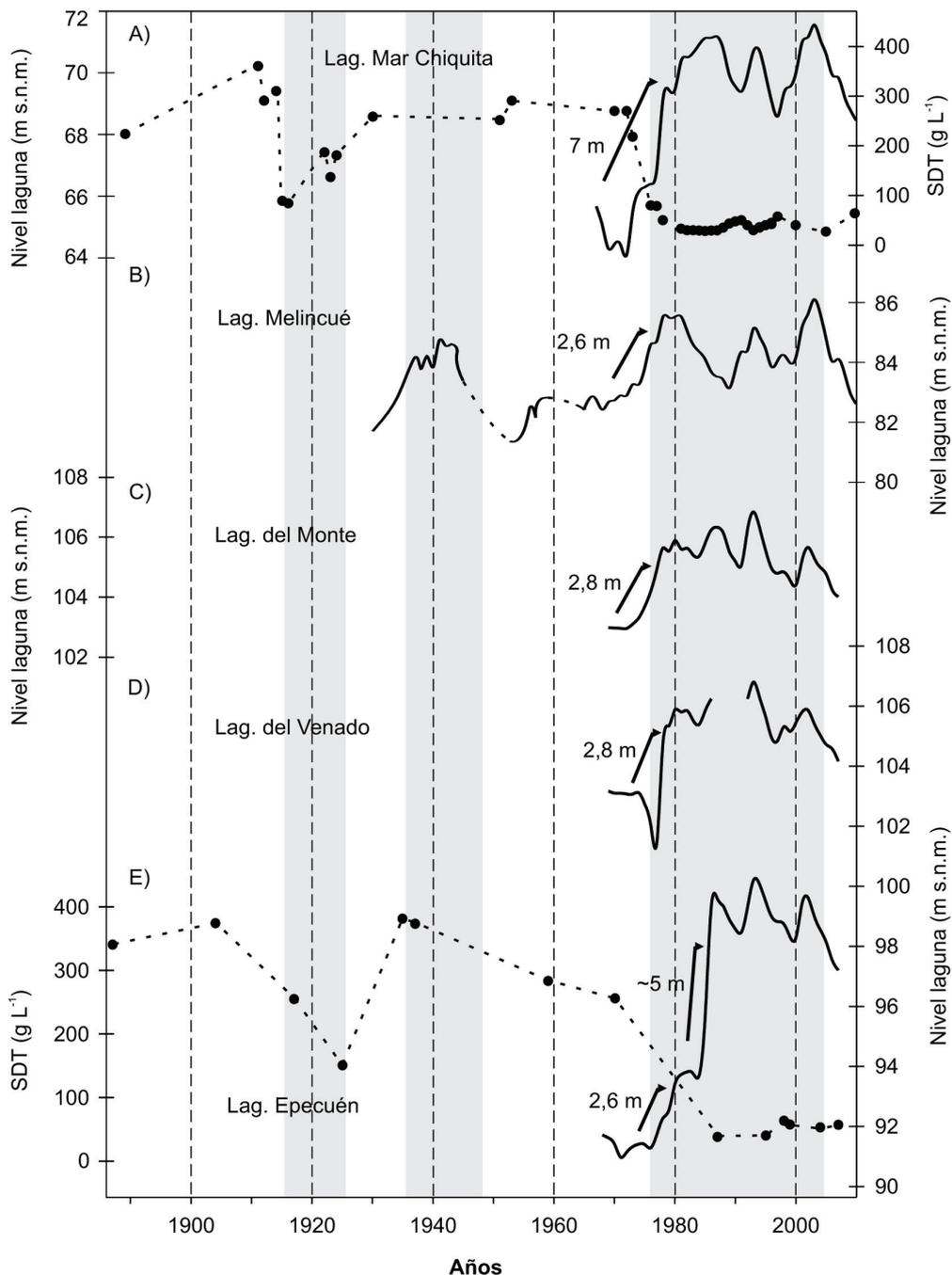
### Datación de los registros sedimentarios

Un punto crítico de las reconstrucciones efectuadas fue el ajuste de los registros paleolimnológicos frente a la información instrumental regional para cada sistema. Para relacionar las series hidroclimáticas instrumentales con la estratigrafía de los registros sedimentarios se desarrollaron cronologías aplicando diferentes modelos matemáticos basados en el método radioisotópico del  $^{210}\text{Pb}$  (Appleby, 2001, 2008; Carrol y Lerche, 2003). Entre los modelos comúnmente utilizados para derivar edades se encuentran: a) el modelo CFCS (flujo constante/sedimentación constante, por sus siglas en inglés; Robbins, 1978; Appleby, 2001), b) el modelo CIC (concentración inicial constante; Robbins, 1978; Appleby, 2001), c) el modelo CRS (tasa de suministro constante; Robbins, 1978; Appleby, 2001) y d) el modelo SIT (tomografía isotópica de sedimentos; Carrol y Lerche, 2003). Dado que cada modelo se basa en supuestos particulares (por ej., flujo de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y/o tasa de depositación constantes), la selección del modelo numérico más apropiado para aplicar a los registros pampeanos se debe realizar cuidadosamente para evitar sesgos e inconsistencias en la cronología final de los perfiles sedimentarios. La dificultad principal que presentaron los archivos pampeanos para ser datados por  $^{210}\text{Pb}$  es un patrón de decaimiento exponencial del  $^{210}\text{Pb}$  en profundidad, en muchos casos alejado de la curva de decaimiento teórica del radioisótopo (perfiles de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  no-lineales y no-monotónicos; Fig. 4a). Esta característica es un rasgo dominante en los sedimentos de algunas lagunas de la región Pampeana (por ej., en las Encadenadas del Oeste y Mar Chiquita; ver Piovano *et al.*, 2002; Mulsow *et al.*, 2009; Stupar *et al.*, 2014; Córdoba, 2012; Córdoba *et al.*, en revisión), que se debe a cambios en el flujo atmosférico de  $^{210}\text{Pb}$  que llega a los sistemas, como consecuencia de las variaciones en las precipitaciones (Córdoba *et al.*, en revisión). Por esta razón, para cada *set* de datos de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  se recomienda aplicar los distintos modelos de datación y validar las cronologías resultantes con evidencias cronoestratigráficas independientes (Appleby, 2008). En la figura 4b se muestran los

perfiles de edad/profundidad obtenidos al aplicar los cuatro modelos numéricos más utilizados (CFCS, CIC, CRS y SIT) para derivar edades en el registro de la laguna del Monte. Los resultados obtenidos al aplicar estos modelos refuerzan la idea de que el modelo CRS es el más apropiado para asignar edades a los sedimentos de los sistemas pampeanos. El modelo CRS es una metodología válida y poderosa para establecer las edades de sedimentos depositados recientemente, que presentan un perfil de decaimiento del  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  no exponencial como el observado en los sistemas pampeanos (Córdoba *et al.*, en revisión). Además, el uso de marcadores cronoestratigráficos independientes, localizados en diferentes secciones del perfil, resultan críticos para seleccionar el modelo de datación más confiable. Resultados sobre la elección y validación de los modelos matemáticos más adecuados para derivar edades en los registros pampeanos está discutida en Córdoba *et al.* (en revisión).

### Registros paleolimnológicos de los sistemas lacustres pampeanos

**Laguna Mar Chiquita (Fig. 1).** El archivo climático de la laguna Mar Chiquita (Testigo TMC-00-I, 116 cm de largo; Fig. 5) contiene la señal de las variaciones hidroclimáticas ocurridas desde el final de la Pequeña Edad de Hielo (1767 AD; Piovano *et al.*, 2002, 2004). El análisis de multi-indicadores (sedimentología, geoquímica, isótopos estables en carbonatos y materia orgánica y restos biológicos) de los sedimentos depositados durante los últimos 100 años (datados por el método radiométrico del  $^{210}\text{Pb}$ ; Piovano *et al.*, 2002) fue calibrado frente a la curva de cambios de nivel (registro instrumental e histórico), permitiendo elaborar un modelo actualístico y reconstruir las fluctuaciones del nivel de la laguna en el pasado (Piovano *et al.*, 2009). En el registro sedimentario se identificaron tres facies sedimentarias correspondientes a diferentes escenarios hidrológicos de la laguna (Fig. 5). Los niveles bajos de agua están caracterizados por fangos macizos ricos en evaporitas (calcita, yeso y halita), facies C en figura 5, depositados durante estadios hipersalinos y de baja productividad primaria. En consecuencia, el depósito de balances hídricos negativos y condiciones de aridez se caracterizan por presentar un alto porcentaje de evaporitas asociadas con un bajo contenido de materia orgánica. Por el

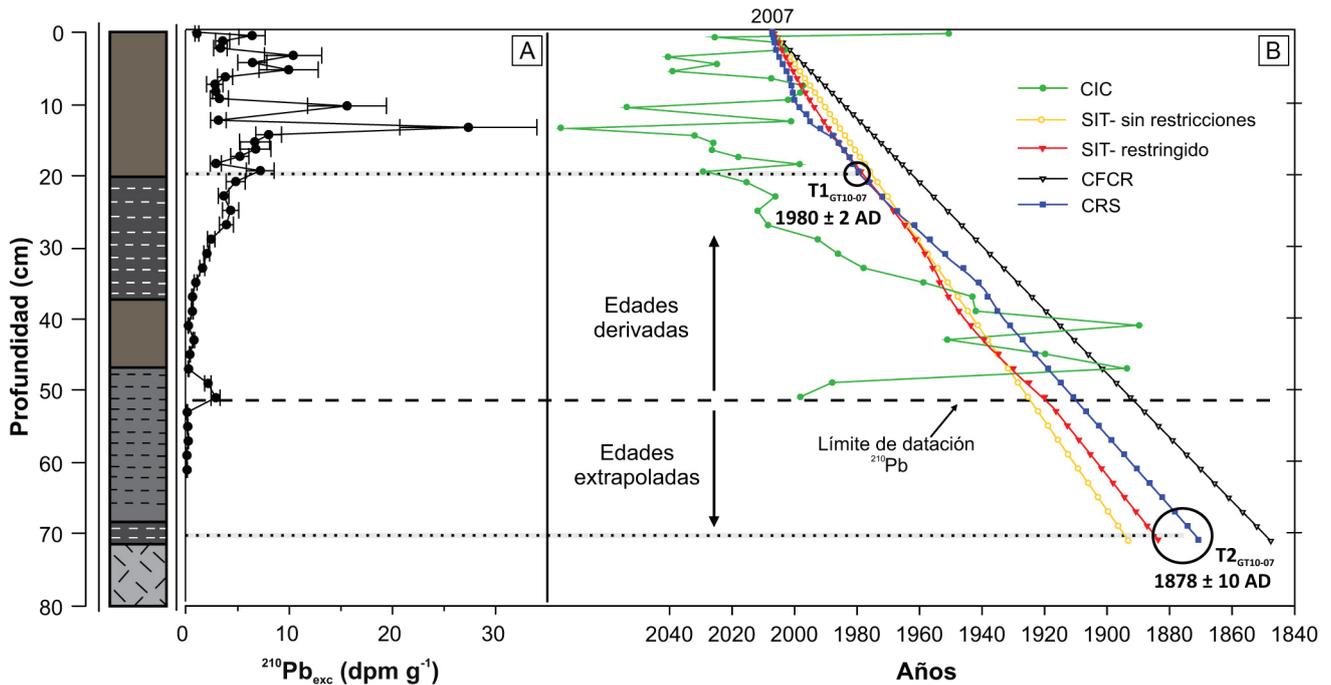


**Figura 3.** Comparación entre las alturas limnimétricas de las lagunas analizadas (en metros sobre el nivel del mar - m s.n.m. -) y salinidad del agua (como Sólidos Disueltos Totales - SDT:  $\text{g L}^{-1}$  -) desde 1880 AD hasta la actualidad. a) Registro de niveles y salinidad del agua de la laguna Mar Chiquita. b) Registro de niveles de la laguna Melincué. c) Registro de niveles de la laguna del Monte. d) Registro de niveles de la laguna del Venado. e) Registro de niveles y salinidad del agua de la laguna Epecuén. Las barras en color gris corresponden a períodos húmedos reconocidos en el registro entre 1918-1927, 1940-1949 y el más reciente entre 1977/1978-2005.

**Figure 3.** Water-lake level fluctuations and water salinity data expressed as Total Dissolved Solids (SDT:  $\text{g L}^{-1}$ ) from 1880 to the present. (a) Laguna Mar Chiquita. (b) Laguna Melincué. (c) Laguna del Monte. (d) Laguna del Venado. (e) Laguna Epecuén. The shaded bars indicate short wet spells between 1918-1927, 1940-1949, and the most recent wet period from 1977/1978 to 2005.

contrario, durante niveles altos de agua se depositan facies ricas en materia orgánica y diatomeas (facies A). Durante los niveles intermedios se produce la

acumulación de fangos laminados a bandeados o facies B, con contenidos intermedios de materia orgánica y carbonatos con respecto a las facies A y



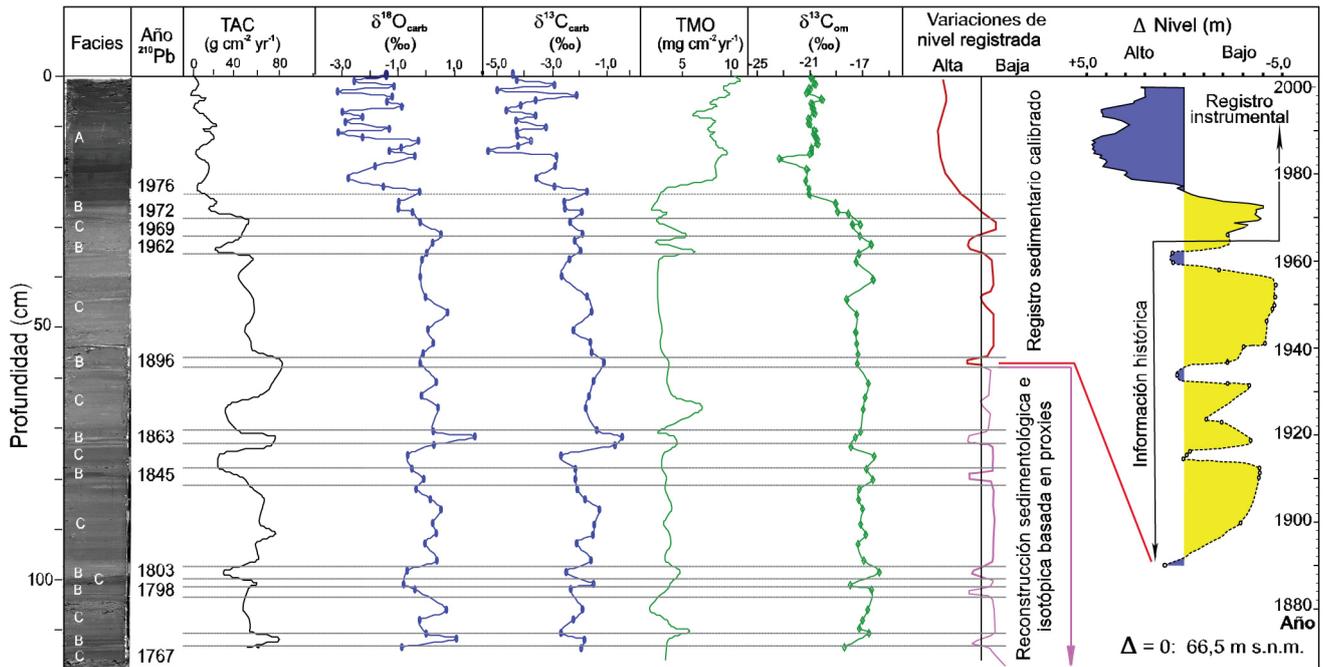
**Figura 4.** Geocronología  $^{210}\text{Pb}$  del testigo GT10-07 (laguna del Monte). a) Actividad medida del radioisótopo de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y errores asociados ( $\text{dpm g}^{-1}$ ) a lo largo del testigo. b) Perfiles edad-profundidad calculados con los modelos CRS, CIC, CFCR, SIT-sin restricciones y SIT-restringido discutidos en el texto. Marcadores estratigráficos ( $T1_{\text{GT10-07}}$ :  $1980 \pm 2$  AD;  $T2_{\text{GT10-07}}$ :  $1878 \pm 10$  AD) definidos para la región pampeana en función del análisis de multi-indicadores (Córdoba, 2012; Córdoba *et al.*, en revisión). El modelo CRS dio el marco de edades más plausible cuando se comparó con los marcadores  $T1_{\text{GT10-07}}$  y  $T2_{\text{GT10-07}}$ .

**Figure 4.**  $^{210}\text{Pb}$  chronology from core GT10-07 (Laguna del Monte). a)  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  activity and associated errors ( $\text{dpm g}^{-1}$ ) versus depth in Laguna del Monte core. b) Depth-age profiles obtained using CRS, CIC, CFCR, constrained SIT and unconstrained SIT models as discussed in the text. Time markers ( $T1_{\text{GT10-07}}$ : AD  $1980 \pm 2$ ;  $T2_{\text{GT10-07}}$ : AD  $1878 \pm 10$ ) are defined based on the analysis of multiproxy data (Córdoba, 2012; Córdoba *et al.*, en revisión). The CRS model gives the most plausible dates when compared with  $T1_{\text{GT10-07}}$  and  $T2_{\text{GT10-07}}$ .

C. El desarrollo de la facies B ocurre entre las facies ricas en evaporitas y las ricas en materia orgánica. Las edades  $^{210}\text{Pb}$  permiten definir claramente a esta facies, por ejemplo, en la transición entre el nivel muy bajo ocurrido hasta 1972 y el nivel alto definido desde 1977. Las variaciones en la relación Precipitación/Evaporación que controla el balance hídrico de la laguna, también controla la composición isotópica de los carbonatos autigénicos ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ) y de la materia orgánica sedimentaria ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$ ; ver Fig. 5; Piovano *et al.*, 2004). La intensa evaporación durante etapas de nivel bajo resulta en un enriquecimiento de  $^{18}\text{O}$  y  $^{13}\text{C}$  en las aguas de la laguna, y se registra con valores isotópicos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  más positivos en los carbonatos autigénicos (facies C). Por el contrario, valores más negativos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  son el resultado del aumento de agua dulce que ingresa al sistema lacustre rica en  $^{16}\text{O}$  y  $^{12}\text{C}$  (facies A). Por otro lado, valores relativamente

bajos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$  se corresponden con niveles altos de la laguna, baja salinidad, baja alcalinidad y alta productividad primaria. Durante estadios de alta salinidad y niveles bajos la producción primaria disminuye y el valor  $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$  es en consecuencia alto.

La reconstrucción de las variaciones de niveles de la laguna (Fig. 5) se inicia en un nivel de evaporitas correspondiente al año 1767 (obtenida por el modelo cronológico del  $^{210}\text{Pb}$ ), indicando una fase de nivel muy bajo como consecuencia de una gran sequía. En general, el registro de Mar Chiquita muestra una tendencia de sequías generalizadas y niveles bajos, con algunos pulsos de mayor humedad relativa de corta duración, hasta el último cuarto del siglo XX, cuando comenzó un intervalo húmedo sin precedentes. El modelo de edades indica que la facies A se habría depositado después del año 1973, durante el intervalo de balances hídricos positivos y aumento de niveles sin precedentes, asociado al importante

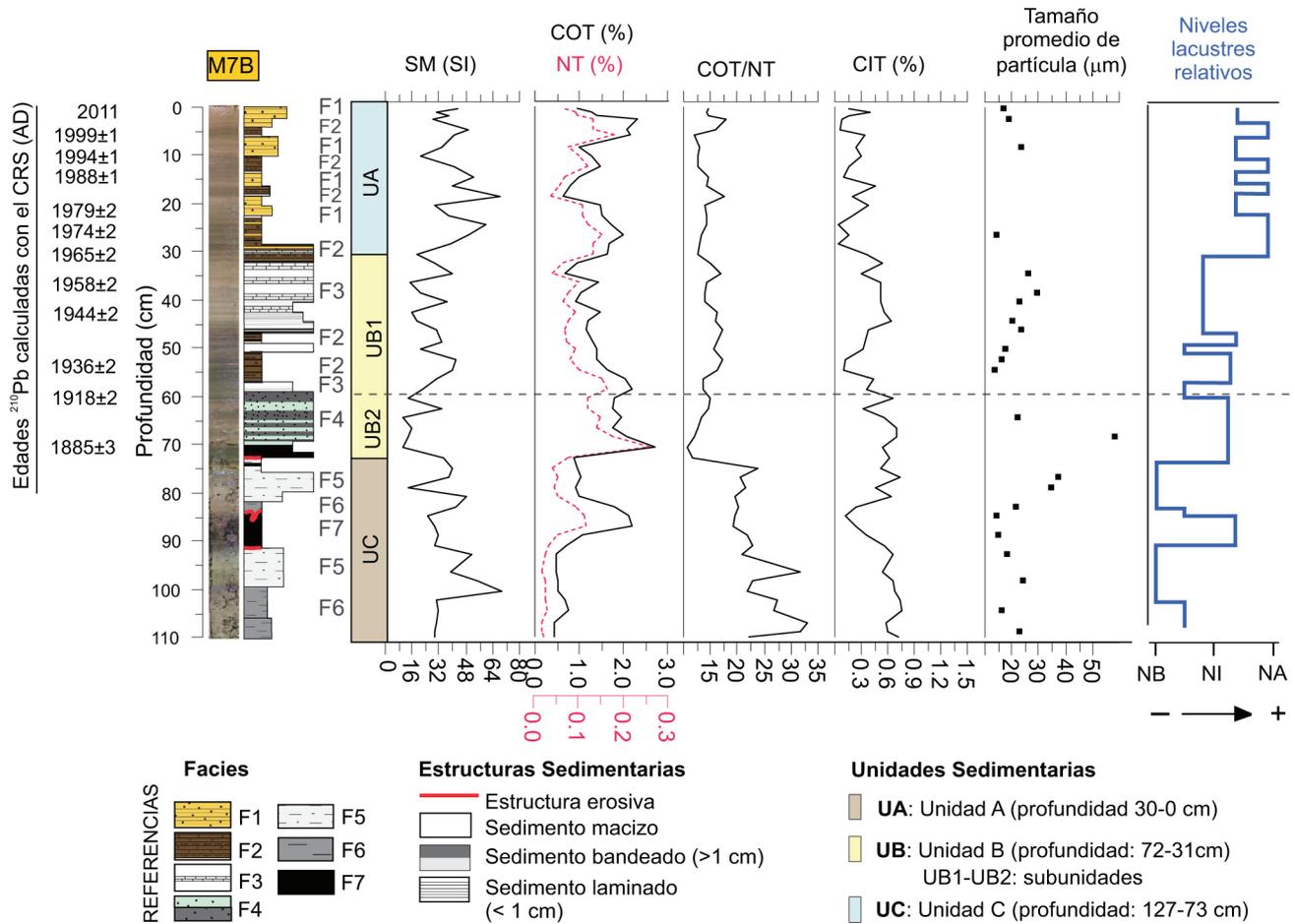


**Figura 5.** Facies y modelo cronológico del registro paleohidrológico de Mar Chiquita. La facies A corresponde al nivel alto, B a niveles transicionales y C a niveles bajos. TAC: Tasa de acumulación de carbonatos, TMO: Tasa de acumulación de materia orgánica. Los datos isotópicos están expresados en la notación delta ( $\delta$ ) con referencia a VPDB, *carb*: carbonato y *om*: materia orgánica. El registro sedimentario del período 1894-2000 está calibrado a la curva de fluctuaciones documentadas expresadas como desviaciones de una cota promedio (0: 66,5 m s.n.m.). La reconstrucción del registro de niveles lacustres anterior a 1894 está basada en la aplicación del modelo de multi-indicadores propuesto para el sistema (tomado de Piovano *et al.*, 2002, 2004). **Figure 5.** Sedimentary facies and  $^{210}\text{Pb}$  chronologies of the Laguna Mar Chiquita paleohydrological record. Facies A corresponds to the high water-level, facies B to transitional water-levels and facies C to low water-level. TAC: Carbonate accumulation rate, TMO: organic matter accumulation rate. Isotopic data are expressed in delta notation ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$ ), *carb*: carbonate and *om*: organic matter. The sedimentary record of the period 1894-2000 is calibrated to documented lake-level curve expressed as deviations from an average height (0: 66.5 m a.s.l.). The reconstructed lake-level record before AD 1894 is entirely based on the developed sedimentary model (modified from Piovano *et al.*, 2002; 2004).

incremento en las precipitaciones regionales de la década de 1970. Los resultados obtenidos a partir del registro instrumental y paleolimnológico de Mar Chiquita muestran que este sistema lacustre es un buen sensor de los cambios en el balance hidrológico asociados a la variabilidad climática de baja y alta frecuencia, representativa de una amplia región de latitudes medias de Argentina.

**Laguna Melincué (Fig. 1).** El registro paleolimnológico de Melincué (Testigo M7B; Fig. 6) permitió reconstruir los cambios ambientales y de nivel que experimentó la laguna desde 1830 AD, como respuesta a las variaciones en el balance hídrico regional (Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015). El marco cronológico construido a partir de las mediciones de  $^{210}\text{Pb}$  permitió calibrar el registro sedimentario

y los diferentes indicadores sedimentológicos, geoquímicos e isotópicos frente a datos instrumentales. Siete facies sedimentarias fueron definidas, las cuales representan las fluctuaciones que experimentó la laguna entre niveles muy bajos a bajos, bajos a intermedios e intermedios a altos (Fig. 6). La distribución y asociación de las facies reconocidas a lo largo de la secuencia dio lugar a la definición de tres unidades sedimentarias, las cuales representan diferentes etapas en la evolución de la laguna (Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015). La Unidad C está compuesta por limos grises, macizos, compactos, pobres en materia orgánica y con elevada susceptibilidad magnética. Esta unidad se habría depositado previamente a  $\sim 1870/80$  AD, y se ha interpretado como el depósito de un ambiente lacustre efímero con desarrollo de niveles bajos a extremadamente

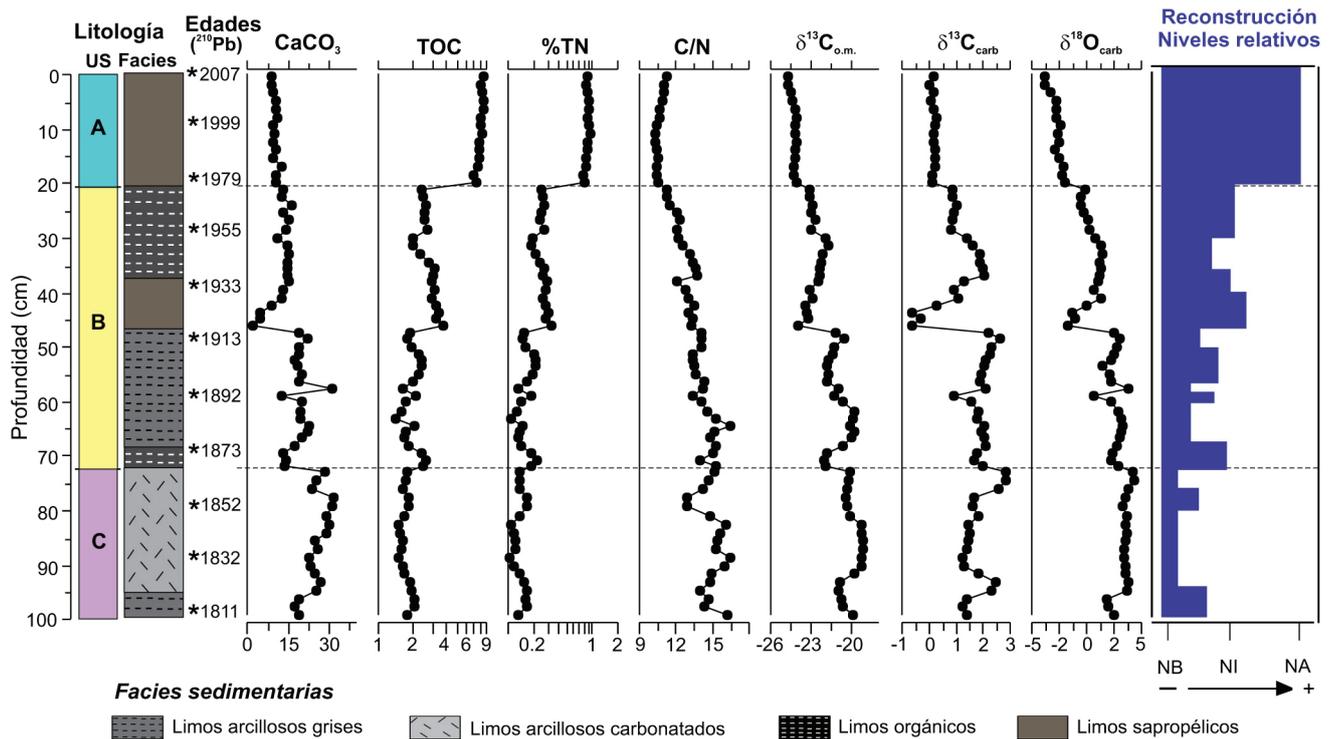


**Figura 6.** Modelo sedimentológico y cronológico del registro paleohidrológico de Melincué (testigo M7B; tomada de Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015). Incluye (de derecha a izquierda): cronología, facies sedimentarias (F), unidades sedimentarias (U), variables sedimentológicas, geoquímicas e isotópicas y estimación de los cambios relativos en el nivel de la laguna (NB: Nivel bajo; NI: Nivel intermedio; NA: Nivel alto). SM: Susceptibilidad Magnética (SI); TOC: carbono orgánico total (%); TN: nitrógeno total (%); TIC: carbono inorgánico total (%). Facies: F1 limo medio ocre, de laminación difusa, rico en materia orgánica; F2: limo medio a fino, pardo oscuro, finamente laminado, rico en materia orgánica; F3: limo medio, gris claro, finamente laminado, rico en materia orgánica, con carbonatos; F4: limo grueso claro y oscuro, bandeado, rico en materia orgánica con carbonatos; F5: limo grueso a medio, gris, macizo y compacto, altamente magnético, con carbonatos; F6: limo gris claro, macizo y compacto con carbonatos y con materia orgánica; F7: Fango negro, macizo, rico en materia orgánica.

**Figure 6.** Sedimentary model and chronological framework of the Laguna Melincué paleohydrological record (core M7B; modified from Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015). From left to right:  $^{210}\text{Pb}$  ages, sedimentary facies (F), sedimentary units (U), sedimentological and geochemical proxies and estimation of relative lake levels (NB: Low water-level; NI: Intermediate level; NA: high water-level). SM: magnetic susceptibility (SI); TOC: total organic carbon (%); TN: total nitrogen (%); TOC/TN ratios; TIC: total inorganic carbon (%), mean particle sizes (lm). Sedimentary facies: F1: Ochre, faintly laminated, organic-rich, medium silts; F2: Dark-brown, finely laminated, organic-rich, medium to fine silts; F3: Light gray, finely laminated, organic-rich medium silt with carbonates; F4: Light/dark gray, banded, organic-rich coarse silts with carbonates; F5: Gray, massive and compact, highly magnetic, medium to coarse silts with carbonates; F6: Light gray, massive and compact, silt with carbonates and organic matter; F7: Black, massive organic-rich mud.

bajos. La relación COT/NT > 20 en esta unidad indica un origen terrestre predominante de la materia orgánica (Meyers, 2003), poniendo en evidencia la baja productividad orgánica fitoplanctónica en la laguna. A partir de 1880, se registra un cambio

significativo en la secuencia sedimentaria, marcado por una abrupta disminución de la susceptibilidad magnética, del contenido de materia orgánica y de la relación COT/NT, cuya identificación permitió delimitar la base de la Unidad B (Fig. 6). Esta unidad



**Figura 7.** Modelo sedimentológico y cronológico del registro paleohidrológico de la laguna del Monte a partir del análisis del testigo GT10-07 (tomado de Córdoba, 2012). Incluye (de derecha a izquierda): Unidades sedimentarias (US), facies, cronología ( $^{210}\text{Pb}$ ), variables geoquímicas e isotópicas ( $\text{CaCO}_3$ , TOC, TN, C/N,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) y estimación de los cambios relativos en el nivel de la laguna. (NB: Nivel bajo; NI: Nivel intermedio; NA: Nivel alto). TOC: carbono orgánico total (%); TN: nitrógeno total (%); TIC: carbono inorgánico total (%). Los datos isotópicos están expresados en la notación delta (d) con referencia a VPDB, *carb*: carbonato y *o.m.*: materia orgánica.

**Figure 7.** Sedimentary facies and chronological framework of the Laguna del Monte paleohydrological record based on core GT10-07 (taken from Córdoba, 2012). From left to right: sedimentary units (US), sedimentary facies,  $^{210}\text{Pb}$  chronology, sedimentological and geochemical variables ( $\text{CaCO}_3$ , TOC, TN, C/N,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) and estimation of relative lake levels (NB: Low water-level; NI: Intermediate level; NA: high water-level). TOC: total organic carbon (%); TN: total nitrogen (%); TIC: total inorganic carbon (%). Isotopic data are expressed in delta notation (d), *carb*: carbonate and *o.m.*: organic matter.

está compuesta por limos bandeados a laminados, ricos en materia orgánica de origen mixto (lacustre y terrestre; COT/NT <14; Meyers, 2003), los cuales fueron interpretados como producto de un aumento del nivel de la laguna y la instalación de un régimen perenne de sus aguas. Este cambio ambiental-hidrológico se ha interpretado como el fin de una fase de condiciones áridas que corresponde a la PEH (etapa pre-1880 AD) y el inicio de un régimen de mayor humedad, el cual podría asignarse al inicio del Período Cálido Actual (Bird *et al.*, 2011). En el tope de la secuencia, la Unidad A está compuesta por limos medios, pardo-oscuros, ricos en materia orgánica. Una disminución de la granulometría y del contenido de carbono inorgánico caracteriza a esta unidad, la cual se ha interpretado como un depósito

de un estadio de niveles altos a intermedios en una laguna salobre perenne. Sobre la base de las edades derivadas del registro de  $^{210}\text{Pb}$ , esta unidad estaría representando las condiciones ambientales actuales del sistema lacustre, que se iniciaron como resultado del importante aumento de niveles que experimentó la laguna a finales de la década de 1970.

**Lagunas Encadenadas del Oeste (Fig. 1).** El estudio de multi-indicadores ambientales en testigos sedimentarios extraídos de tres lagunas principales del sistema (Epecuén, del Venado y del Monte) permitió reconstruir la historia depositacional de las Encadenas del Oeste correspondiente a los últimos dos siglos (Córdoba, 2012). La figura 7 muestra el registro sedimentario, los diferentes indicadores

analizados y la reconstrucción de los cambios de nivel que experimentó la laguna del Monte desde ~ 1810 AD. El análisis de las secuencias permitió la definición de un modelo depositacional para las lagunas Encadenadas del Oeste caracterizado por cuatro facies sedimentarias principales (Fig. 7). El desarrollo de un marco geocronológico basado en dataciones radiométricas de  $^{210}\text{Pb}$  permitió acotar temporalmente los principales eventos ambientales reconstruidos desde ~1810 AD y correlacionar entre sí los registros de las lagunas. Tres unidades sedimentarias principales caracterizan diferentes estadios en la evolución de las Encadenadas del Oeste (Fig. 7). La Unidad C, por ejemplo, está compuesta fundamentalmente de limos arcillosos carbonatados, con los porcentajes de carbonato más altos y los más bajos de materia orgánica. Exhibe los valores más positivos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ , consistentes con un ambiente sometido a una alta tasa de evaporación efectiva y balances hídricos fuertemente negativos ( $P < E$ ). Los valores de la relación C/N, en general mayores a 20, y más positivos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$  sugieren un predominio de materia orgánica de origen terrestres a lo largo de la unidad (Meyer, 2003). Esto indicaría una baja producción primaria debido fundamentalmente a condiciones de aguas altamente salinas y alcalinas. Esta unidad se ha interpretado como el depósito de un ambiente de laguna efímera somera, sujeta a ciclos de desecación-inundación. Según las edades obtenidas por  $^{210}\text{Pb}$ , la depositación de esta unidad se habría extendido hasta la década de 1870. Sobreyaciendo a la Unidad C se presenta la Unidad B, compuesta de facies de limos arcillosos grises con intercalaciones de limos orgánicos, cuya principal característica es el contenido intermedio de carbonatos, presentando además una clara tendencia hacia valores más negativos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ , los cuales indican un ingreso progresivo de agua dulce al sistema (enriquecida en  $^{12}\text{C}$  y  $^{16}\text{O}$ ) y niveles lacustres relativamente más altos y aguas menos concentradas. El aumento relativo de TOC, sugiere un progresivo aumento de la productividad primaria y la depositación de materia orgánica de origen lacustre bajo condiciones de menor salinidad. En ese sentido, los valores intermedios de la relación C/N y de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$  señalan un origen mixto de la materia orgánica (lacustre y terrestre; Meyer, 2003). El  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  muestra una señal ligeramente más negativa, respecto a la unidad C, indicando que si bien los balances hídricos en el

sistema continúan siendo deficitarios, el aumento de la humedad efectiva permitiría la instalación de una laguna permanente de niveles bajos. La Unidad B representaría entonces el establecimiento de una laguna perenne somera, de niveles relativamente bajos a intermedios, fluctuantes y con pulsos de niveles altos de corta duración. La base de esta unidad registra un importante cambio hidrológico y ambiental en la década de 1870 AD, a partir del cual las lagunas cambian de sistemas efímeros a perennes. La Unidad A, ubicada en el techo de la secuencia, se caracteriza por un aumento significativo de la materia orgánica, exhibiendo el contenido de TOC más alto del registro y los valores más bajos de carbonato, sugiriendo aguas de menor salinidad relativa, que favorecieron notablemente el incremento de la producción primaria en las lagunas. Los valores de la relación C/N ( $< 11$ ) y comparativamente más negativos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$  confirman el origen predominantemente lacustre de la materia orgánica (Meyers, 2003). Los registros isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$  más negativos están asociados a balances hídricos comparativamente más positivos debido al ingreso de agua isotópicamente enriquecida en  $^{12}\text{C}$  y  $^{16}\text{O}$ . Las condiciones ambientales de la Unidad A se asocian al de una laguna perenne, somera, de niveles relativamente altos que se correspondería con las condiciones ambientales actuales de las lagunas Encadenadas del Oeste, luego del dramático aumento de niveles que experimentó el sistema a finales de la década de 1970.

## DISCUSIÓN

### Interpretación de los indicadores sedimentológicos y geoquímicos en las lagunas pampeanas

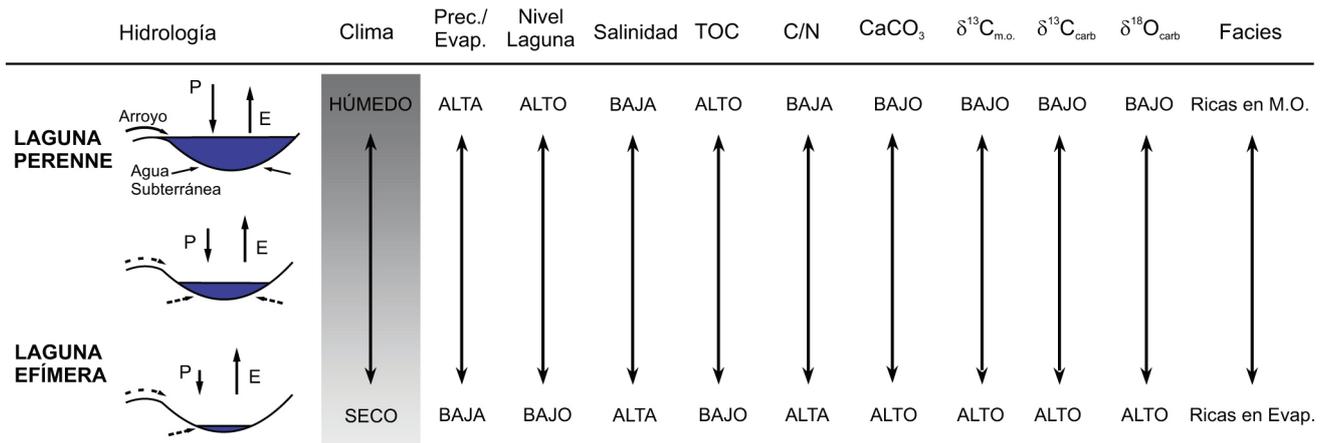
Las reconstrucciones efectuadas muestran que las variaciones de facies están reguladas por cambios importantes en el balance hidrológico de las lagunas (eventos húmedos y secos) vinculados con la variabilidad hidroclimática de la región. Los indicadores analizados en los registros que permiten establecer que los factores principales que controlarían la sedimentación en las lagunas estudiadas son el balance hidrológico regional, la salinidad y composición del agua, y los aportes clásticos y de materia orgánica desde la cuenca. El balance hidrológico directamente asociado a la dinámica de las precipitaciones controla en

consecuencia la salinidad y composición química del agua regulando la precipitación de las fases minerales evaporíticas (por ej., carbonatos, sulfatos y cloruros). Por otro lado, regula el desarrollo de diferentes tipos de organismos (productividad primaria), generalmente condicionados por la composición iónica de las aguas de estos sistemas altamente variables, y en algunos casos extremadamente salinos (como es el caso de Mar Chiquita y Epecuén). Así, la variación de salinidad, asociada al cambio de niveles, controla los flujos de energía, de nutrientes, productividad primaria y de precipitación de minerales evaporíticos en este tipo de sistemas lacustres (Reati *et al.*, 1997; Piovano *et al.*, 2002; da Silva *et al.*, 2008; Córdoba, 2012; Coianiz *et al.*, 2015), lo que resulta finalmente en la depositación de facies ricas en materia orgánica durante niveles relativamente más altos (estadios de laguna perenne), o ricas en evaporitas durante niveles relativamente más bajos o de desecación (estadios de laguna efímera).

La mayoría de los factores que afectan la sedimentación en este tipo de lagunas someras (por ej., profundidad, composición del agua, concentración de solutos, productividad primaria, salinidad, biota, etc.) responden a condiciones intrínsecas y propias de cada sistema, los cuales desempeñan un papel importante y dan lugar a cambios verticales y laterales de facies, que en general son relativamente abruptos, como los observados también en otros sistemas lacustres (Eugster y Kelts, 1983; Valero-Garcés y Kelts, 1995; Birks y Remenda, 1999; Valero-Garcés *et al.*, 1999; Morellón *et al.*, 2008). Por ejemplo, un aumento gradual de la salinidad puede cambiar bruscamente la población de algas y el ciclo de nutrientes en una laguna; un aumento de la productividad primaria puede generar condiciones de anoxia en el fondo durante su descomposición y el predominio de facies laminadas con mayor contenido orgánico. En este sentido, para cada cambio importante en las condiciones ambientales de una laguna y en particular de su cuenca (por ej., uso del territorio, vegetación, etc.), puede corresponder un cambio en las tasas o en el tipo de sedimentación. De esta manera, las secuencias sedimentarias de cada laguna refleja reacciones específicas a estos cambios, que se registran de diferente manera en los sedimentos.

Las variaciones estratigráficas de los diferentes indicadores en los tres sistemas estudiados permi-

ten efectuar inferencias paleohidrológicas e interpretaciones paleoambientales y reconstruir los cambios de nivel en las lagunas e inferir condiciones climáticas pasadas (Fig. 8). La composición isotópica de los carbonatos ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ) y de la materia orgánica ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$ ), así como los contenidos elementales y su relación (TOC, TN, C/N), y los componentes mineralógicos y sedimentológicos, resultan ser los indicadores más sensibles que permiten en su análisis conjunto reconstruir la evolución de los ambientes de depositación en los tres sistemas lacustres (estadios de laguna perenne, laguna efímera). Por ejemplo, los valores comparativamente más negativos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{m.o.}}$  en general se relacionan con períodos o fases de expansión y aumento de nivel de las lagunas bajo un clima húmedo (mayor humedad efectiva), mientras que los valores más positivos constituyen un proxy para fases de contracción y caída de nivel de agua de los sistemas, alta salinidad, señalando en consecuencia condiciones climáticas secas o de mayor aridez relativa. Esta respuesta de las lagunas pampeanas está asociada fundamentalmente a la relación precipitación/evaporación, la cual regula la composición isotópica de las aguas y del  $\text{CO}_2$  disuelto, cuya interacción finalmente queda registrada en la composición isotópica de los carbonatos precipitados y de la materia orgánica generada dentro de las lagunas (producción primaria; Piovano *et al.*, 2004). El elevado contenido de materia orgánica sedimentaria (altos valores de TOC y TN) y bajo porcentaje de evaporitas (fundamentalmente de carbonatos), asociado a estadios de niveles altos, es el resultado de la alta actividad biológica durante fases de baja salinidad (Reati *et al.*, 1997; Piovano *et al.*, 2002; da Silva *et al.*, 2008). Durante estos estadios se observa una significativa participación de la fracción clástica en la constitución de los sedimentos indicando que durante balances hídricos positivos el ingreso de sedimentos por aporte fluvial es importante. En particular, las relaciones isotópicas más positivas de los carbonatos indican que su precipitación ocurrió a partir de agua enriquecida en  $^{16}\text{O}$  y en  $^{12}\text{CO}_2$  disuelto, como resultado de un gran aporte de agua dulce proveniente de las precipitaciones y de los ríos durante períodos de balances hídricos positivos (Piovano *et al.*, 2004; Córdoba, 2012). La composición isotópica de la materia orgánica refleja, además, la composición isotópica del  $\text{CO}_2$  disuelto



**Figura 8.** Modelo conceptual de la evolución hidrológica de una laguna pampeana desde condiciones efímeras a perennes indicando la relación de los procesos actuantes con respecto a los cambios en el balance hídrico (desarrollo de un sistema perenne durante excesos hídricos y de un sistema efímero durante déficit hídrico). Cada uno de los estadios desde perenne a efímera se caracteriza por un tipo de facies y proxies característicos. La magnitud de las flechas indica el predominio de P (precipitación) o E (evaporación). Las líneas continuas indican mayor aporte fluvial y de agua subterránea, mientras que las líneas de punto muestran aportes comparativamente bajos. Evap: evaporación; TOC: carbono orgánico total; M.O: materia orgánica.

**Figure 8.** A conceptual model of Pampean lakes hydrological evolution ranging from ephemeral (negative hydrological balances) to perennial conditions (positive hydrological balance). The influence of main acting processes is linked to hydrological variability. Each hydrological stage is characterized by distinctive sedimentary facies and proxies. P-E arrows indicate precipitation (P) vs. evaporation (E) balance; the relative length of the arrows indicates the predominance of either P or E. Higher river runoff and groundwater inputs are indicated by solid arrows, whereas dotted arrows indicate comparatively low inputs. Evap: evaporation; TOC: total organic carbon; M.O: organic matter.

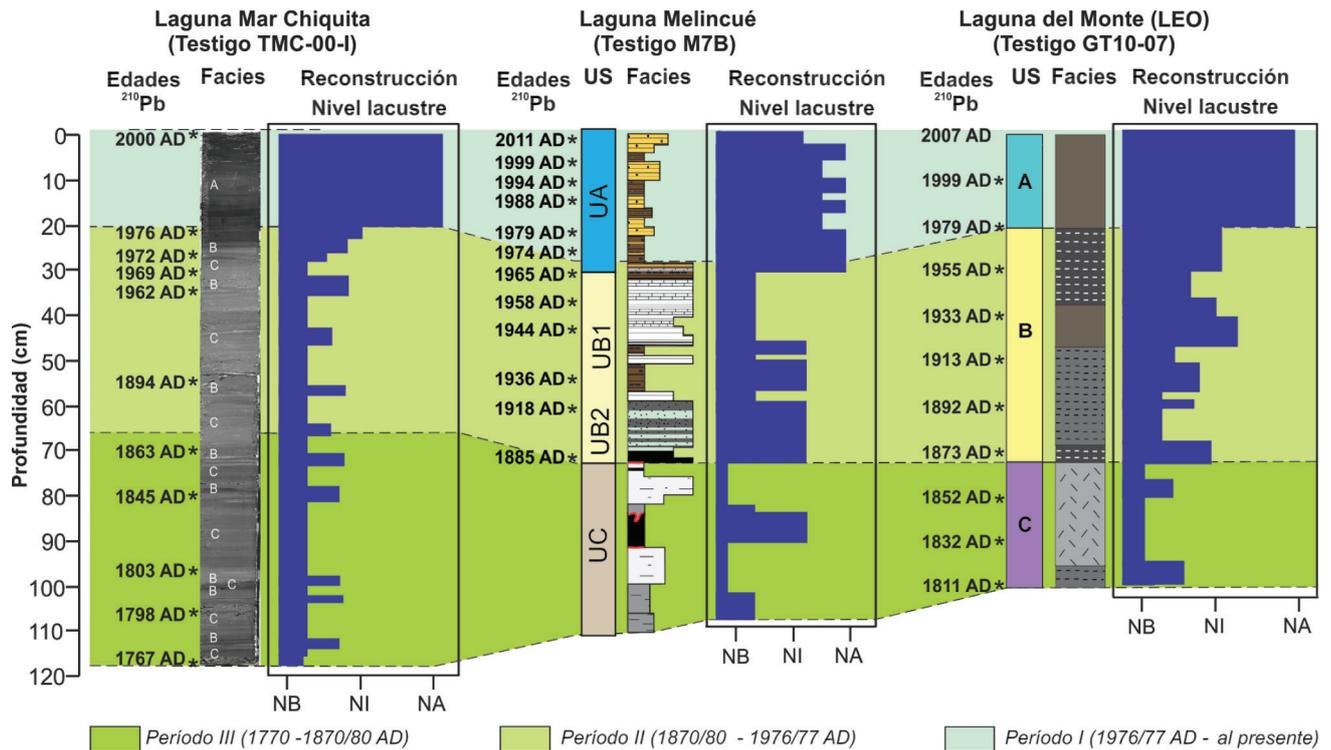
en el agua, empobrecido en <sup>13</sup>C, y es concordante con el predominio de la precipitación sobre la evaporación (P>E) (Piovano *et al.*, 2004). Durante balances hídricos negativos (P < E) caracterizados por períodos con niveles bajos y salinidad elevada de las aguas, hay un aumento en la tasa de acumulación de carbonatos y se registra en los sedimentos mediante el desarrollo de niveles de evaporitas y facies de limos carbonatados. Durante estos estadios la baja acumulación de materia orgánica es el resultado de una actividad biológica limitada por la alta salinidad (Reati *et al.*, 1997; da Silva *et al.*, 2008). La intensa evaporación conduce a un enriquecimiento progresivo del agua en <sup>18</sup>O y <sup>13</sup>C, que es reflejado por la composición isotópica más positiva de los carbonatos autigénicos. El efecto combinado de un *pool* de carbono inorgánico disuelto, rico en <sup>13</sup>C, y una elevada alcalinidad induce al plancton a utilizar HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> como fuente de carbono (Hollander y McKenzie, 1991) y vuelve más positiva la relación δ<sup>13</sup>C de la materia orgánica con respecto a las fases de niveles altos de las lagunas. El aumento en el aporte de agua dulce con respecto a la fase de nivel

bajo se observa como una tendencia hacia valores más negativos en las relaciones isotópicas de los carbonatos y la materia orgánica.

Todas estas observaciones son resumidas en un esquema conceptual en la figura 8. La integración del resultado de los diferentes indicadores proxies y los cambios en las facies sedimentarias proporcionan una sólida base para la interpretación de los registros paleolimnológicos estudiados que puede extrapolarse para analizar otros archivos lacustres pampeanos.

### El registro paleohidrológico pampeano: desde la Pequeña Edad de Hielo (PEH) al siglo XXI

El marco geocronológico elaborado a partir de dataciones radiométricas de <sup>210</sup>Pb en los registros paleolimnológicos (Piovano *et al.*, 2002, 2004; Córdoba, 2012; Guerra, 2015; Guerra *et al.*, 2015; Córdoba *et al.*, en revisión), permitió correlacionar entre sí los testigos sedimentarios de los tres sistemas y definir el patrón regional y temporal de los principales eventos ambientales ocurridos desde



**Figura 9.** Correlación entre los archivos paleolimnológicos de los tres sistemas estudiados y períodos paleoambientales reconocidos en la evolución de las lagunas desde la PEH hasta la actualidad. Se indican en cada testigo las edades de <sup>210</sup>Pb en profundidad. Para otras referencias ver figuras 5, 6 y 7.

**Figure 9.** Correlation between paleolimnological archives from the studied lake systems and recognized paleoenvironmental stages in the lake evolution from LIA up to the present. <sup>210</sup>Pb ages are indicated for each sedimentary depth. More legends as in figures 5, 6, and 7.

1770 AD (Fig. 9). La secuencia de cambios ambientales y paleohidrológicos reconstruidos a partir del análisis conjunto de facies y distintos indicadores sedimentológicos, mineralógicos y geoquímicos, permitió identificar en los registros tres períodos caracterizados por condiciones paleoambientales distintivas en la evolución de las lagunas desde el final de la Pequeña Edad de Hielo hasta la actualidad (Fig. 9). Las reconstrucciones obtenidas son también comparadas con aquellas efectuadas a partir de fuentes históricas (Prieto y Herrera, 2001, 2009). Los períodos definidos son los siguientes:

**Período III: Finalización de la PEH (ca. 1750/70 AD - 1870/80 AD).** Las reconstrucciones paleohidrológicas de las lagunas indican que dentro de una tendencia de sequías generales para este período pueden inferirse condiciones comparativamente más húmedas hacia finales del siglo XVIII (Fig. 9). El registro paleolimnológico se inicia en un nivel de evaporitas, claramente identificable en la base del

testigo de Mar Chiquita (Fig. 5), el cual según las edades obtenidas por el modelo cronológico del <sup>210</sup>Pb corresponde al año ~1767 AD. Estas evaporitas, formadas por halita, yeso y calcita, indican una fase de nivel muy bajo como consecuencia de una gran sequía. Información histórica indica que la fase de déficit hídrico y de niveles bajos habría alcanzado durante este tiempo una magnitud significativa y se habría extendido por más de tres décadas a lo largo de una amplia región de Argentina (Prieto y Herrera, 2009). En particular, en la década de 1780-90 se registró un pico máximo de sequías en el centro, oeste y noroeste de Argentina, según datos históricos (Prieto y Herrera, 2009). Durante el año 1789 AD, la escasez hídrica se manifestó notablemente en Catamarca, Tucumán, Salta y Jujuy, en combinación con un invierno muy frío y con frecuentes incendios (Prieto y Herrera 2001, 2009). Crónicas históricas indican que durante el año 1779, un fuerte colonial fue construido entre dos pequeños cuerpos de agua en el lugar en donde se ubica la laguna Melincué (Azara,

1837; Gatti, 2010) indicando una importante fase de retracción de la laguna y niveles extremadamente bajos, que generó la división de la laguna en dos cuerpos menores. Las situaciones de déficit hídrico o sequías fueron muy frecuentes durante el último cuarto del siglo XVIII y comienzos del XIX, lo que es sugerido en el mapa de Gerónimo Matorras, tomado del Archivo General de Indias (Dussel y Herrera, 1999). Este período de niveles bajos, déficit de agua y bajas temperaturas se correspondería con la fase final de la PEH, fluctuación climática caracterizada por un enfriamiento global entre 1400-1850 AD (Villalba *et al.*, 1998; Jones *et al.*, 2001; Wanner *et al.*, 2008). En la región Pampeana, la PEH fue también reconocida por Cioccale (1999) en función de datos históricos, indicando la existencia de dos pulsos fríos durante los siglos XV y XIX. El primero se extendió desde el siglo XV hasta finales del siglo XVI, mientras que el segundo pulso, más frío que el anterior, tuvo lugar entre el siglo XVIII y el comienzo del siglo XIX. Tonello y Prieto (2010) infieren para los últimos 500 años cal AP un marcado descenso en los valores de la precipitación en el SO de la llanura pampeana, mientras que Stutz *et al.* (2010) proponen un descenso de la temperatura acompañado de un régimen hidrológico altamente variable en el sector SE de la región pampeana. Similares condiciones hidroclimáticas fueron también reconocidas a partir del estudio de asociaciones faunísticas pampeanas (Tonni *et al.*, 1999) y en diferentes registros paleolimnológicos de lagunas bonaerenses (Laprida y Valero-Garcés, 2009; Laprida *et al.*, 2009) y del sur de Uruguay (Bracco *et al.*, 2005; García-Rodríguez *et al.*, 2009), resaltando la magnitud regional del impacto de la PEH en las latitudes medias de Sudamérica. Estos resultados están apoyados también por datos geomorfológicos e históricos los cuales indican condiciones áridas durante la llegada de los españoles sobre las que se intercalan períodos cortos de aumento de lluvias (Politis, 1984; Tonni *et al.*, 1999; Deschamps y Tonni, 2007).

Los registros paleolimnológicos muestran condiciones comparativamente más húmedas hacia finales del siglo XVIII y los primeros años del siglo XIX (Fig. 9). Esta fase fue seguida, nuevamente, por balances hídricos negativos y condiciones de sequía, en particular durante la primera mitad del siglo XIX (Prieto y Richard, 1991). Entre los años 1827 y 1832 AD, ocurrió un episodio de extrema aridez que fue documentado muy bien por Darwin (1860) en su viaje

por el centro de Argentina, al cual denominó “*The Great Drought*”. Esta “Gran Seca” fue la responsable de la muerte masiva de ganado, cuyos restos se han encontrado en los registros paleontológicos (Tonni *et al.*, 2008; Piovano *et al.*, 2009). En el registro de Mar Chiquita y las Encadenadas del Oeste, se reconocen niveles con evaporitas para este intervalo de tiempo, reflejando niveles lacustres extremadamente bajos y condiciones regionales de aridez (Piovano *et al.*, 2002; Córdoba, 2012). En contraste, la segunda mitad del siglo XIX, se caracteriza por condiciones más húmedas y un aumento de la frecuencia de inundaciones (Moncaut 2003; Piovano *et al.*, 2009), pero siempre bajo condiciones de balances hídricos predominantemente negativos. De esta manera, las reconstrucciones paleohidrológicas de las secuencias indican que en general durante la finalización de la PEH predominaron condiciones áridas a lo largo de la región Pampeana reflejadas por los niveles bajos a extremadamente bajos de las lagunas, con episodios de fases lacustres de niveles intermedios de menor duración. La PEH se habría extendido en esta región hasta el año ~ 1870/80 AD, momento que es indicado por el pasaje de sistemas lacustres efímeros a perennes. El patrón de reconstrucciones paleolimnológicas de las lagunas es compatible con la obtenida de estudios dendrocronológicos en el área de la cuenca alta del río Dulce, donde Villalba *et al.* (1998) proponen fluctuaciones del balance hídrico a partir de cambios en los anillos de crecimiento de los árboles. La definición cronológica propuesta para la finalización de la PEH entre ~ 1870/80 AD concuerda también con lo planteado por Villalba (1994) para Patagonia norte.

**Período II: Desde la PEH hasta el gran salto hidroclimático del Siglo XX (ca. 1870/80 AD – 1976/77 AD).** Este período está caracterizado por un incremento sostenido de la humedad efectiva en la región, que se refleja en un incremento generalizado en los niveles alcanzados por las lagunas a partir de la segunda mitad del siglo XIX (1870/1880 AD; Fig. 9). En particular entre 1870-1880, los registros paleolimnológicos muestran un aumento principalmente en el contenido de materia orgánica, como así también en otros indicadores ambientales, revelando un importante aumento de niveles lacustres y en consecuencia un descenso de salinidades. Este aumento de niveles es coetáneo con un importante pulso húmedo en el sudeste de

Sudamérica, el cual generó en el año 1877-1878 AD importantes inundaciones a lo largo de la cuenca del Plata. En particular, el río Paraná incrementó su caudal notablemente inundando las ciudades y pequeñas localidades ubicadas en sus orillas. Este pulso húmedo que generó un aumento importante de los caudales del Paraná es considerado el tercero en magnitud registrado en la cuenca del Plata en los últimos dos siglos (Aceituno *et al.*, 2009). Este aumento de las precipitaciones está también registrado en las series instrumentales de las primeras estaciones meteorológicas que iniciaron sus mediciones en nuestro país durante el siglo XIX (por ej., estaciones Corrientes, Goya, Córdoba, Buenos Aires y Bahía Blanca).

Durante este periodo, los sistemas lacustres presentaron agua la mayor parte del tiempo, mostrando una marcada variabilidad interanual e interdecadal. El marco geocronológico desarrollado mediante el  $^{210}\text{Pb}$  permitió correlacionar los sedimentos depositados en las diferentes lagunas con el registro instrumental e histórico (precipitaciones, alturas limnimétricas y salinidades). A lo largo de este período, las fases de niveles lacustres altos y bajos reconstruidas a partir del análisis paleolimnológico (Fig. 9) son, en general, sincrónicas y en fase con respecto a la variabilidad de los valores de la precipitación en la región pampeana (Fig. 2). Los resultados aportan pruebas concluyentes sobre el control que ejercen las precipitaciones sobre el balance hídrico de los sistemas y en consecuencia sobre su dinámica física, química y biológica. Si bien se reconoce un predominio de niveles relativamente bajos a intermedios asociados a anomalías negativas en las precipitaciones hasta la década de 1970, se registran varios episodios de corta duración de niveles extremadamente bajos entre 1890-1913 AD y 1928-1939 AD. Este último período de extrema sequía, que se corresponde con el *Dust Bowl Pampeano* (Viglizzo y Frank, 2006; Tripaldi *et al.*, 2013), está muy bien representado en el registro de las lagunas Encadenadas del Oeste (Córdoba, 2012). Por el contrario, niveles relativamente altos se asocian con anomalías positivas en las precipitaciones entre 1870-1880, 1915-1927 y 1940-1949 AD.

**Período I: El pulso “Hiper-húmedo” del Siglo XX (ca. 1976/77 AD - hasta el presente).** Este período incluye al gran cambio hidrológico que se produjo en el sudeste de Sudamérica a finales de la década

de 1970 (Boulanger *et al.*, 2005; Pasquini *et al.*, 2006; Piovano *et al.*, 2009). Durante este período, el incremento extraordinario de las precipitaciones en la región generó un aumento significativo de los niveles y extensión de las lagunas, las cuales alcanzaron los valores máximos reconstruidos desde la PEH. La presencia de facies ricas en materia orgánica en la parte superior de las secuencias, con los valores más altos de TOC y buen ajuste cronológico a partir del  $^{210}\text{Pb}$ , constituye un elemento distintivo de estos sistemas pampeanos, y se ha interpretado como el registro del notable cambio hidrológico que tuvo lugar a fines de la década de 1970 (Piovano *et al.*, 2002, 2004 y 2009; Córdoba, 2012; Stupar *et al.*, 2014; Guerra *et al.*, 2015; Córdoba *et al.*, en revisión). El aumento en el contenido de materia orgánica sedimentaria estaría relacionado con el aumento de la productividad primaria que habría tenido lugar en los sistemas inmediatamente después del año 1977/78, como respuesta a la disminución de salinidad durante los importantes “saltos” de niveles experimentados por todas las lagunas ( $\Delta$  nivel de la laguna: + 2,6 m en Epecuén y + 2,8 m en Venado y del Monte; + 7,0 m en Mar Chiquita; + 2,6 m en Melincué; Fig. 3). Este incremento de las precipitaciones en el sudeste de Sudamérica (Compagnucci *et al.*, 2002; Boulanger *et al.*, 2005; Garreaud *et al.*, 2009), estaría relacionado con una intensificación del Sistema Monzónico Sudamericano durante el verano austral generado por un debilitamiento de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur y una intensificación del transporte meridional del vapor de agua desde la Amazonia mediante la Corriente en Chorro de Capa Baja hacia la región subtropical de Argentina (Compagnucci *et al.*, 2002; Vera *et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2009). Este comportamiento estaría fuertemente influenciado por anomalías negativas en las temperaturas del Atlántico tropical (Seager *et al.*, 2010). Sin embargo, a partir del período 2003-2005, los registros instrumentales muestran un notable descenso de las precipitaciones que es reflejado en las lagunas con caídas importantes de niveles (Fig. 3). Algunos estudios muestran que este reverso hidrológico podría estar asociado a una variación reciente de la temperatura en el Atlántico tropical que estaría provocando un cambio en el régimen de precipitación en el sudeste de Sudamérica (Seager *et al.*, 2010), posiblemente hacia condiciones similares a las que tenía la región antes de la década de 1970.

## CONSIDERACIONES FINALES

Las reconstrucciones paleohidrológicas y paleoambientales obtenidas a partir de los registros paleolimnológicos de las lagunas Mar Chiquita, Melincué y Encadenadas del Oeste permiten definir importantes variaciones hidroclimáticas a una escala temporal mayor que la proporcionada por el registro instrumental. La comparación de las principales fases hidrológicas reconstruidas en los tres sistemas para los últimos ~ 250 años permite definir tres episodios hidroclimáticos principales a lo largo de la transecta analizada. Los resultados muestran una marcada variabilidad ambiental de los sistemas lacustres y condiciones hidrológicas contrastantes (por ej., déficit hídrico y sequías extremas durante la finalización de la Pequeña Edad de Hielo vs condiciones “hiper-húmedas” en los últimos ~ 40 años), ligados principalmente a las fluctuaciones en el balance hidrológico (relación precipitación/evaporación), las cuales controlan la salinidad y química de las aguas, la actividad biológica y los aportes tanto clásticos como de materia orgánica alóctona desde la cuenca de drenaje. Los cambios en el régimen de precipitación, asociados a la dinámica del Sistema Monzónico Sudamericano, son los principales responsables de esta gran variabilidad sedimentológica, geoquímica e hidrológica registrada en los archivos paleolimnológicos de las lagunas.

De esta manera, las secuencias pampeanas representan archivos detallados de los cambios hidroclimáticos que se sucedieron en el centro de Argentina desde la Pequeña Edad de Hielo hasta el presente. Estos son imprescindibles para conocer tanto la variabilidad climática a escala regional en el sudeste de Sudamérica, como la dinámica y respuesta de estos sistemas lacustres frente a diferentes condiciones ambientales y climáticas. Así, los resultados obtenidos permiten perfeccionar los modelos planteados sobre la variabilidad hidroclimática pasada en las regiones ubicadas hacia el E-SE de la Diagonal Árida Sudamericana y aportan información crucial para descifrar la actividad del Monzón Sudamericano en su zona de influencia más austral.

## Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue financiado por CONICET (PIP 2012-2014/11220110100759),

SECYT-UNC (2012-2013), FONCyT - Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT-2013-1371-Raíces), European Community's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013) under Grant Agreement N° 212492: CLARIS LPB, “A Europe-South America Network for Climate Change Assessment and Impact Studies in La Plata Basin”. Los autores agradecen a los árbitros Blas Valero-Garcés y Ana Moreno Caballud, y al Grupo Editorial por los comentarios y sugerencias que contribuyeron a mejorar el trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceituno, P., M.R. Prieto, M.E. Solari, A. Martínez, G. Poveda y M. Falvey, 2009. The 1877–1878 El Niño episode: Associated impacts in South America. *Climatic Change* 92:389-416.
- Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. En W.M. Last y J.P. Smol (Eds.), *Tracking environmental change using lake sediments. Volume 1: Basin analysis, coring and chronological techniques*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht:171-201.
- Appleby, P.G., 2008. Three decades of dating recent sediments by fallout radionuclides: a review. *The Holocene* 18:83-93.
- Azara, F., 1837. Diario de un reconocimiento de las guardias y fortines, que guarnece la línea de frontera de Buenos-Aires para ensancharla. Buenos Aires. Imprenta del Estado. 49 pp.
- Barros, V., M. González, B. Liebmann y I. Camilloni, 2000. Influence of the South Atlantic convergence zone and South Atlantic sea surface temperature on interannual summer rainfall variability in Southeastern South America. *Theoretical and Applied Climatology* 67:123-133.
- Bird, B.W., M.B. Abbott, M. Vuille, D.T. Rodbell, N.D. Stansell y M.F. Rosenmeier, 2011. A 2.300-year-long annually resolved record of the South American summer monsoon from the Peruvian Andes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:8583-8588.
- Birks, S.J. y V.N. Remenda, 1999. Hydrogeological investigation of Chappice Lake, southeastern Alberta: groundwater inputs to a saline basin. *Journal of Paleolimnology* 21:235-255.
- Boulangier, J.P., J. Leloup, O. Penalba, M. Rusticucci, F. Lafon y W. Vargas, 2005. Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Clymate Dynamics* 24:393-413.
- Bracco, R., H. Inda, L. del Puerto, C. Castiñeira, P. Sprechmann y F. García-Rodríguez, 2005. Relationships between Holocene sea-level variation, trophic development and climate change in Negra Lagoon, southern Uruguay. *Journal of Paleolimnology* 33:252-262.
- Brunetto, E. y M. Iriondo, 2007. Neotectónica en la Pampa Norte (Argentina). *Revista de la Sociedad Geológica de España* 20:17-29.
- Bruniard, E., 1982. La diagonal árida Argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica* 95:5-20.
- Carroll J. y I. Lerche, 2003. Sedimentary processes: quantification using radionuclides. Elsevier, Oxford. 272 pp.
- Carvalho, L.M., C. Jones, A.E. Silva y B. Liebmann, 2011. The South American Monsoon System and the 1970s climate transition. *International Journal of Climatology* 31:1248-1256.

- Castañedas, E. y V. Barros**, 1994. Las tendencias de la precipitación en el Cono Sur de América al Este de los Andes. *Meteorológica* 19:23-32.
- Chebli, G., M. Mozetic, E. Rossello y M. Bühler**, 2000. Cuencas sedimentarias de la llanura Chacopampeana. En R. Caminos (Ed.), *Geología Argentina*. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Anales 29, Buenos Aires, 20:627-644.
- Cingolani, C.A.**, 2005. Unidades morfoestructurales (y estructuras menores) de la provincia de Buenos Aires. En R.E. de Barrio, R.O. Etcheverry, M.F. Caballé y E. Llambías (Eds.), *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires*. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata: 21-30.
- Cioccale, M.**, 1999. Climatic fluctuations in the central region of Argentina in the last 1000 years. *Quaternary International* 62:35-47.
- Coianiz, L., D. Ariztegui, E.L. Piovano, P. Guilizzoni, A. Lami, S. Guerli y N. Waldman**, 2015. Environmental change in subtropical South America for the last two millennia as shown by lacustrine pigments. *Journal of Paleolimnology* 53:233-250.
- Compagnucci, R.H., E.A. Agosta y W.M. Vargas**, 2002. Climatic change and quasi-oscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern African region. *Climate Dynamics* 18:421-435.
- Córdoba, F.**, 2012. El registro climático del Holoceno tardío en latitudes medias del SE de Sudamérica: Limnogeología de las Lagunas Encadenadas del Oeste, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 285 pp. (Inédita).
- Córdoba, F., E. Piovano, S. Mulrow, F. Sylvestre y M. Zárate** (en revisión). <sup>210</sup>Pb sediment profiles and geochronology in shallow lacustrine systems under marked hydrological variability in the Argentinean Pampas. *Quaternary International* (en revisión).
- da Silva, L., E. Piovano, Y.P. Azevedo y N. Aquino**, 2008. Quantitative evaluation of the sedimentary organic matter in Laguna Mar Chiquita, Argentina. *Organic Geochemistry* 39:450-464.
- Darwin, C.**, 1860. A Naturalist's Voyage Round the World. The Voyage of the Beagle First Edition. Chapter VII:142-143. (The Project Gutenberg EBook, [http://www.darwingsalapagos.com/darwin\\_voyage\\_beagle/darwin\\_beagle\\_title.html](http://www.darwingsalapagos.com/darwin_voyage_beagle/darwin_beagle_title.html)).
- Deschamps J.R. y E.P. Tonni**, 2007. Aspectos ambientales en torno al primer fuerte de la frontera sur de Buenos Aires: "El Zanjón" 1745-1779. de Trabajo no. 175. Departamento de Investigaciones, Universidad de Belgrano, 24 pp.
- Dussel, P. y R.G. Herrera**, 1999. Repercusiones socioeconómicas del cambio de curso del Río Salado en la segunda mitad del siglo XVIII. En B. García Martínez y J.A. González (Eds.), *Estudios sobre historia y ambiente en América. El Colegio de México*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México: 137-149.
- Eugster, H.A. y K. Kelts**, 1983. Lacustrine chemical sediments. En A.S. Goudie y K. Pye (Eds.), *Chemical Sediments and Geomorphology*. Academic Press, London: 321-368.
- García-Rodríguez, F., E. Piovano, L. del Puerto, H. Inda, S. Stutz, R. Bracco, D. Panario, F. Córdoba, F. Sylvestre y D. Ariztegui**, 2009. South American lake paleo-records across the Pampean Region. *PAGES* 17:115-117.
- Garreaud, R.D., M. Vuille, R. Compagnucci y J. Marengo**, 2009. Present-day South American Climate (LOTRED South America). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:180-195.
- Gatti, S.**, 2010. Melincué, su historia. Editado por la Biblioteca Popular Bernardino Rivadavia, Melincué, Santa Fe, Argentina, 200 pp.
- Genta, J., G. Perez-Iribarren y C.R. Mechoso**, 1998. A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *Journal of Climate* 11:2858-2862.
- Giorgi, F.**, 2002. Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations. *Climate Dynamics* 18:675-691.
- Grove, J.M.**, 2001. The Initiation of the "Little Ice Age" in Regions Round the North Atlantic. *Climatic Change* 48:53-82.
- Guerra, L.**, 2015. Registros de la variabilidad hidroclimática del Holoceno tardío en la Llanura Pampeana Argentina: limnogeología de la laguna Melincué (33°43' S-61°28' O). Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 222 pp. (Inédita).
- Guerra, L., E. Piovano, F. Córdoba, F. Sylvestre y S. Damatto**, 2015. Hydrological and environmental evolution of the shallow Lake Melincué, central Argentinean Pampas along the last millennium. Advances in Paleohydrology Research and Applications. *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.002.
- Hollander, D.J. y J.A. McKenzie**, 1991. CO<sub>2</sub> control on carbon - isotope fractionation during aqueous photosynthesis: a paleo-pCO<sub>2</sub> barometer. *Geology* 19:929-932.
- IATASA**, 1994. Estudio de sistematización de la Cuenca del Río Salado 1<sup>ra</sup> etapa: Plan director para la Cuenca de las lagunas Encadenadas del Oeste y Cuenca Superior del Arroyo Vallimanca. Informe final. Ministerio de Obras y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires.
- IPCC**, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.), IPCC, Bern, Switzerland. Disponible en <http://www.climatechange2013.org>.
- Jacques-Coper, M. y R. Garreaud**, 2014. Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4120.
- Jones, P.D., T.J. Osborn y K.R. Briffa**, 2001. The evolution of climate over the last millennium. *Science* 292:662-667.
- Laprida, C. y B. Valero-Garcés**, 2009. Cambios ambientales de épocas históricas en la pampa bonaerense en base a ostrácodos: historia hidrológica de la laguna de Chascomús. *Ameghiniana* 46:95-111.
- Laprida, C., J. Orgeira y N. García Chaporí**, 2009. El registro de la Pequeña Edad de Hielo en lagunas pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65:603-611.
- Laprida, C., J. Massaferró, M.J.R. Mercáu y G. Cusminsky**, 2014. Paleobiocuidadores del fin del mundo: ostrácodos y quironómidos del extremo sur de Sudamérica en ambientes lacustres cuaternarios. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 21:97-117.
- Leroy S.A., S. Warny, H. Lahijani, E. Piovano, D. Fanetti y A.R. Berger**, 2010. The role of geosciences in the improvement of mitigation of natural disasters: five case studies. En T. Beer (Ed.), *Geophysical Hazards: Minimising risk, maximising awareness*. Springer, Series International Year of Planet Earth: 115-147.
- Mann, M.E., Z. Zhang, S. Rutherford, R.S. Bradley, M.K. Hughes, D. Shindell, C. Ammann, G. Faluvegi y F. Ni**, 2009. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and

- medieval climate anomaly. *Science* 326:1256-1260.
- Martínez D.E., M.A. Gómez Peral y J. Maggi**, 1994. Caracterización Geoquímica y Sedimentológica de los Fangos de la Laguna Mar Chiquita, Provincia de Córdoba: Aplicación del Análisis Multivariante. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 49:26-38.
- Meyers, P.A.**, 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry* 34:261-289.
- Mon, R. y A.A. Gutiérrez**, 2009. The Mar Chiquita Lake: An indicator of intraplate deformation in the central plain of Argentina. *Geomorphology* 111:111-122.
- Moncaut, C.A.**, 2003. Inundaciones y sequías tienen raíces añejas en la pampa bonaerense (1576-2001). En O.C. Maiola, N.A. Gabellone y M.A. Hernández (Eds.), *Inundaciones en la región pampeana*. Editorial Universidad Nacional de La Plata, La Plata: 27-47.
- Morellón, M., B. Valero-Garcés, A. Moreno, P. González-Sampériz, P. Mata, O. Romero, M. Maestro y A. Navas**, 2008. Holocene palaeohydrology and climate variability in Northeastern Spain: The sedimentary record of Lake Estanya (Pre- Pyrenean range). *Quaternary International* 181:15-31.
- Mulsow, S., E. Piovano y F. Córdoba**, 2009. Recent aquatic ecosystem response to environmental events revealed from 210Pb sediment profiles. *Marine Pollution Bulletin* 59:175-181.
- Muza M, L. Carvalho, C. Jones y B. Liebmann**, 2009. Intraseasonal and interannual variability of extreme dry and wet events over Southeastern South America and Subtropical Atlantic during the Austral summer. *Journal of Climate* 22:1682-1699.
- Nogues-Paegle, J. y K.C. Mo**, 2002. Linkages between summer rainfall variability over south America and sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate* 15:1389-1407.
- Pasquini, A.I. y P.J. Depetris**, 2007. Discharge trends and flow dynamics of South American rivers draining the southern Atlantic seaboard: An overview. *Journal of Hydrology* 333:385-399.
- Pasquini, A.I., K.L. Lecomte, E.L. Piovano y P.J. Depetris**, 2006. Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Quaternary International* 158:127-139.
- Penalba, O.C. y W.M. Vargas**, 2004. Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. *International Journal of Climatology* 24:1565-1580.
- Piovano, E., S. Damatto Moreira y D. Ariztegui**, 2002. Recent environmental changes in Laguna Mar Chiquita (Central Argentina): A sedimentary model for a highly variable saline lake. *Sedimentology* 49:1371-1384.
- 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., D. Ariztegui, F. Córdoba, M. Cioccale y F. Sylvestre**, 2009. Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka. En F. Vimeux, F. Sylvestre y M. Khodri (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: 323-351.
- Politis, G.**, 1984. Climatic variations during historical times in Eastern Buenos Aires Pampas. Argentina. *Quaternary South America and Antarctic Peninsula* 2:133-161.
- Prieto, M.R. y R. García Herrera**, 2009. Documentary sources from South America: Potential for climate reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:196-209.
- Prieto, M.R. y G. Herrera**, 2001. De sequías, hambrunas, plagas y "otras varias y continuas calamidades acaecidas en la jurisdicción de Córdoba" durante el siglo XVIII. *Cuadernos de Historia. Serie Ec. y Soc., N° 4, Secc. Art., CIFYH, UNC* 4:131-158.
- Prieto, M.R. y R. Richard**, 1991. Anomalías climáticas en la Cuenca del Plata y el NOA y sus consecuencias socioeconómicas. Siglos XVI, XVII y XVIII. *Leguas. Revista Argentina de Geografía* 1:41-103.
- Quirós, R., A.M. Rennella, M.B. Boveri, J.J. Rosso y A. Sosnovsky**, 2002. Factores que afectan la estructura y el funcionamiento de las lagunas pampeanas. *Ecología Austral* 12:175-185.
- Reati, G.J., M. Florín, G.J. Fernández y C. Montes**, 1997. The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): A little Known, Secularly Fluctuating, Saline Lake. *International Journal of Salt Lake Research* 5:187-219.
- Ringuet, R.A., A. Salibian, E. Claverie y S. Ilhero**, 1967. Limnología química de las lagunas pampásicas de la provincia de Buenos Aires. *Physis* 27:201-221.
- Robbins, J.A.**, 1978. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead. En J.O. Nriagu (Ed.), *The biogeochemistry of lead in the environment*. Wiley, New York:285-377.
- Schubert, S.D., M.J. Suarez, P.J. Pegion, R.D. Koster y J.T. Bacmeister**, 2004. On the cause of the 1930s Dust Bowl. *Science* 303:1855-1859.
- Seager, R., N. Naik, W. Baethgen, A. Robertson, Y. Kushnir, J. Nakamura y S. Jurburg**, 2010. Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century. *Journal of Climate* 23:5517-5539.
- Stupar, Y., G. García, J. Schafer, S. Schmidt, E. Piovano, G. Blanc, F. Huneau y P. Le Coustumer**, 2014. Identificación de fases portadoras y flujos de mercurio en el registro sedimentario de la Laguna del Plata, región central de Argentina *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31:104-115.
- Stutz, S., M. Borel, S. Fontana, L. del Puerto, H. Inda, F. García-Rodríguez y M. Tonello**, 2010. Late Holocene climate and environment of the SE Pampa grasslands, Argentina, inferred from biological indicators in shallow, freshwater Lake Nahuel Rucá. *Journal of Paleolimnology* 44:761-775.
- Stutz, S., M.S. Tonello, M.A. González Sagrario, D. Navarro y S.L. Fontana**, 2014. Historia ambiental de los lagos someros de la Llanura Pampeana desde el Holoceno medio: inferencias paleoclimáticas. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 21:119-138.
- Tonello, M.S. y A.R. Prieto**, 2010. Tendencias climáticas para los pastizales pampeanos durante el Pleistoceno tardío-Holoceno: Estimaciones cuantitativas basadas en secuencias polínicas fósiles partir de registros polínicos fósiles. *Ameghiniana* 47:501-514.
- Tonni, E.P., A.L. Cione y A.J. Figini**, 1999. Predominance of arid climates indicated by mammals in the pampas of Argentina during the Late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 147:257-281.
- Tonni, E.P., R.A. Bonini, A.E. Molinari, F.J. Prevosti, L.H. Pomi,**

- J.E. Carbonari y R. Huarte, 2008. Análisis radiocarbónico en una tafocenosis de la región pampeana (provincia de Buenos Aires, Argentina): Su vinculación con la Gran Seca de 1827-1832. *Intersecciones en Antropología* 9:307-311.
- Tripaldi, A., M.A. Zárate, S.L. Forman, T. Badger, M.E. Doyle y P.L. Ciccioli, 2013. Geological evidence for a drought episode in the western Pampas (Argentina, South America) during the early-mid 20th century. *The Holocene* 23:1731-1746.
- Troin, M., C. Vallet-Coulomb, F. Sylvestre y E. Piovano, 2010. Hydrological modeling of a closed lake (Laguna Mar Chiquita, Argentina) in the context of 20<sup>th</sup> century climatic changes. *Journal of Hydrology* 393:233-244.
- Valero-Garcés, B.L. y K.R. Kelts, 1995. A sedimentary facies model for perennial and meromictic saline lakes: Holocene Medicine Lake Basin, South Dakota, USA. *Journal of Paleolimnology* 14:123-149.
- Valero-Garcés, B.L., M. Grosjean, H. Schreir, K. Kelts, y B. Messerli, 1999. Holocene lacustrine deposition in the Atacama Altiplano: facies models, climate and tectonic forcing. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 151:101-125.
- Vera, C., W. Higgins, J. Amador, T. Ambrizzi, R. Garreaud, D. Gochis, D. Gutzler, D. Lettenmaier, J. Marengo, C. Mechoso, J. Nogués-Paegle, P.L. Silva Diaz y C. Zhang, 2006. Towards a unified view of the American Monsoon System. *Journal of Climate* 19:4977-5000.
- Viglizzo, E.F. y F.C. Frank, 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158:122-126.
- Villalba, R., 1994. Tree ring and glacial evidence for the Medieval Warm Epoche and the Little Ice Age in southern South America. *Climatic Change* 26:183-197.
- Villalba, R., H.R. Grau, J.A. Boninsegna, G.C. Jacoby y A. Ripalta, 1998. Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America. *International Journal of Climatology* 18:1463-1478.
- Vuille, M., S.J. Burns, B.L. Taylor, F.W. Cruz, B.W. Bird, M.B. Abbott y V.F. Novello, 2012. A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past* 8:1309-1321.
- Wanner, H., J. Beer, J. Bütikofer, T.J. Crowley, U. Cubasch, J. Flückiger, H. Goosse, M. Grosjean, F. Joos, J.E. Kaplan, M. Küttel, S.A. Müller, I.C. Prentice, O. Solomina, T.F. Stocker, P. Tarasov, M. Wagner y M. Widmannmet, 2008. Mid- to Late Holocene climatic change: an overview. *Quaternary Science Reviews* 27:1791-1828.
- Zárate, M., 2003. The Loess record of Southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22, 1987-2006.
- Zhou J. y K. Lau, 2001. Principal modes of interannual and decadal variability of summer rainfall over South America. *International Journal of Climatology* 21:1623-1644.
- Zhou, J. y K.M. Lau, 1998. Does a monsoon climate exist over South America? *Journal of Climate* 11:1020-1040.