

Los sistemas de información geográfica como herramienta en los estudios limnológicos

Caso de aplicación en un lago somero en ambiente de llanura, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Geographical information systems as a tool in limnological studies

An applied case study in a shallow lake of a plain area, Buenos Aires province, Argentina.

Recibido para evaluación: 30 de Marzo de 2009
Aceptación: 1 de Julio de 2009
Recibido versión final: 29 de Julio de 2009

Orlando Mauricio Quiroz Londoño¹
Asunción Romanelli²
Daniel Emilio Martínez³
Emilia Bocanegra⁴

RESUMEN

Comprender el funcionamiento hidrológico y la interacción de los diferentes cuerpos de agua en un área específica es un tema esencial a la hora de planificar el uso racional del recurso hídrico. El objetivo de este trabajo es realizar un aporte en el ámbito metodológico, al evaluar la aplicación conjunta de métodos hidrológicos-limnológicos y de SIG en el estudio de lagos someros, y profundizar en el conocimiento del comportamiento hidrológico de los humedales en ambientes de llanura, tomando como área piloto la laguna La Salada en la Llanura Interserrana Bonaerense. La misma es una laguna somera, permanente y arreica con una extensión de 5,78 km². En este trabajo se aplican metodologías y herramientas ofrecidas por los SIG para establecer la evolución y el estado de este humedal. Utilizando el Modelo Digital de Terreno del área, se elaboraron perfiles topográficos que muestran la relación entre esta laguna y los cuerpos de agua cercanos, y se realizó el análisis multitemporal de los parámetros morfométricos. Se diseñó una malla de muestreo para establecer la batimetría de la laguna y realizar su caracterización hidrogeoquímica e isotópica. Su composición química es homogénea tanto arealmente como en profundidad. Una variación de conductividad en profundidad, el contenido isotópico y el diagrama de Gibbs, sugieren que un proceso de evaporación domina la química del agua. Los parámetros físico-químicos permitieron establecer la aptitud del agua para distintos usos.

PALABRAS CLAVE: Hidrogeoquímica, Humedal, Isótopos, SIG, Morfometría.

ABSTRACT

The understanding of the hydrological functioning and the interaction among the different water bodies in an area is essential when a sustainable use of the hydric resources is considered. The aim of the present paper is to assess both hydrological-limnological methods and GIS as an integrated methodology applied to the study of shallow lakes, and the hydrological behavior of shallow wetlands in plain areas. La Salada is an areic permanent shallow lake with an area of 5,78 km² located near La Dulce Town (SE of Buenos Aires Province, Argentina). In this paper we applied methods and tools of the Geographical Information Systems in order to assess both, the evolution and state of the wetland. Topographic profiles, showing the relationship among the lake and the other aquatic systems, and also a multitemporal assessment of the morphometric parameters were performed by using a Digital Terrain Model of the area. A sample grid was designed to obtain bathymetric, hydrogeochemical and isotopic data. The chemical water composition is homogeneous in area and depth. Changes in the conductivity values along depth, the isotopic contents and the Gibbs diagram showed that the evaporation is the main process controlling the water chemistry. Physical-chemical parameters established water quality and uses of the lake.

KEY WORDS: GIS, Hydrochemistry, Isotopes, Morphometry, Wetland

1. *Geólogo, Especialista en SIG, Docente Investigador*
2. *Licenciada en Biología, Docente Investigadora*
3. *Doctor en Ciencias Geológicas, Docente Investigador*
4. *MSc. en Recursos Hídricos, Docente Investigadora*

Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Centro de Geológica de Costas y del Cuaternario

*qlondono@mdp.edu.ar;
ormaquiroz@hotmail.com;
demarti@mdp.edu.ar;
ebocaneg@mdp.edu.ar*

1. INTRODUCCIÓN



Si bien los cuerpos de agua continentales ocupan sólo una pequeña parte de la superficie terrestre en comparación con los grandes volúmenes de agua contenidos en los océanos, su importancia reside en el mantenimiento de la vida terrestre (Wetzel, 1981, 2001). Conocer y preservar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, corrientes y estancadas, resulta por tanto, fundamental para evitar el "deterioro" de los ecosistemas, ocasionado por algún tipo de contaminación natural y/o antrópica (Lampert y Sommer, 1997). Modelos tanto conceptuales como numéricos que den pautas sobre el funcionamiento hidrológico de estos cuerpos de agua, son esenciales para determinar usos y acciones sobre ellos.

Existe una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos que reflejan, de una u otra manera, el grado de calidad del agua y el estado trófico de ambientes acuáticos continentales. Entre ellos, pueden mencionarse los siguientes: transparencia y color del agua, cantidad de oxígeno disuelto en la columna de agua y en la interfase agua-sedimento, DBO5, concentración de nutrientes (P y N) y de clorofila a, presencia y dominancia de determinados grupos bacterianos, desarrollo de macrófitos sumergidos, biomasa algal planctónica y perifítica, estructura de las comunidades zooplanctónica y nectónica y sus interrelaciones tróficas (Quirós, 1995). A su vez, es importante conocer las características morfológicas de los ambientes acuáticos así como también de su cuenca de drenaje, lo que permite suponer cómo son las interacciones agua-sedimentos, su productividad, intercambio gaseoso, y circulación general del agua entre otros (Dangavs, 1976).

Comprender el funcionamiento hidrológico y la interrelación de los diferentes cuerpos de agua presentes en una zona específica, resulta esencial a la hora de propender por el adecuado aprovechamiento del recurso. Para lograr ésto, deben realizarse tareas que permitan recopilar, generar e integrar grandes volúmenes de datos e información, que, en la mayoría de los casos, se encuentra dispersa y en formatos diversos (analógicos y digitales).

En el sudeste de la provincia de Buenos Aires, los recursos hídricos merecen especial atención ya que las aguas subterráneas constituyen la única fuente de abastecimiento para fines urbanos, agrícolas e industriales. Las aguas superficiales conforman ríos y arroyos que si bien no son significativos desde el punto de vista de abastecimiento, lo son desde la dinámica de procesos hidrológicos. Por otra parte, los humedales, numerosos en esta zona, contribuyen al equilibrio de los sistemas físicos y biológicos a través de numerosos servicios ambientales como el ciclo de nutrientes, la regulación del clima a nivel local y regional, la regulación de flujos hidrológicos, las oportunidades educacionales y recreativas entre otros (MA, 2005).

En la actualidad, existen diversas herramientas computacionales que contribuyen a la realización de estudios sobre el manejo integrado de los recursos naturales; entre estas herramientas, se destacan los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que permiten analizar la variabilidad espacial y temporal de los diferentes parámetros necesarios para llevar a cabo estudios de esta naturaleza (Esteller et al., 2003). El continuo avance de los SIG permite que ellos cumplan una función importante en los estudios limnológicos- hidrológicos en lo referente al pre y postprocesamiento de datos. Esto incluye determinación de la geometría del sistema acuático, modelación de la variación de recarga con el tiempo, calibración a partir de los datos de campo, compilación de los principales parámetros limnológicos y creación de Modelos Digitales de Terreno (MDT's), entre otros. Todo lo anterior se suma a la capacidad propia de este tipo de sistemas de comparar variables y representarlas mediante gráficas de diverso tipo. De esta manera, los SIG se plantean como una de las herramientas básicas en estudios hidrológicos- limnológicos, ya que permiten, de una manera fácil y dinámica, almacenar, analizar y visualizar datos e información, así como el análisis de su comportamiento en las dimensiones espacial y temporal. Con base en los desarrollos tecnológicos en geoinformática, se ha logrado que los parámetros de forma, tanto de los cuerpos lacustres como de las cuencas que los contienen, se obtengan de forma rápida y confiable utilizando datos altitudinales de diferentes fuentes (Díaz et al., 1999).

El objetivo de este trabajo es realizar un aporte en el ámbito metodológico, al evaluar la aplicación conjunta de métodos hidrológicos- limnológicos y SIG en el estudio de lagos someros, proporcionando información ordenada en un formato homogéneo, comparable y de utilidad para

el diseño de políticas de gestión. Se propone además profundizar en el conocimiento del comportamiento hidrológico de los humedales en ambientes de llanura, tomando como área piloto la laguna La Salada en la Llanura Interserrana Bonaerense.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA

La laguna La Salada y su área de influencia se localizan en la llanura Pampeana en el límite SO de la cuenca del Río Quequén Grande (RQG), cerca a la localidad La Dulce (Nicanor Olivera), Provincia de Buenos Aires (Figura 1). Las principales actividades económicas y productivas que permiten el desarrollo regional son la agricultura y la ganadería. Esta zona es denominada desde un punto geomorfológico como "zona de divisoria de aguas con lagunas" (Martínez, 2007), caracterizada por la presencia de gran cantidad de lagunas con profundidades variables, alineadas en un cordón de aproximadamente 100 km en dirección NO-SE. Para el análisis general de esta laguna, se decidió tomar un área de 409 km², incluyendo parte del Río Quequén Grande y algunas lagunas aledañas a la misma. Las características físicas de la región, la posición topográfica y el análisis de los datos climatológicos de estaciones situadas en las proximidades, determinan que el clima es relativamente homogéneo (Deluchi et al., 1995), clasificado como subhúmedo- seco, con nulo o pequeño exceso de agua a los efectos agronómicos y conforme a su eficiencia térmica, de tipo mesotermal "B2" (Thornthwaite, 1948). En el registro pluviométrico de la región, se observan ciclos con escasas precipitaciones (periodo 1941- 1960) con alternancia de periodos de alta precipitación (a partir de 1970 hasta la actualidad). La temperatura media anual es de 14°C, (Kruse et al., 1997). La distribución areal de las precipitaciones en esta llanura presenta en general un incremento progresivo hacia el NE, alcanzando valores variables entre 640 y 1644 mm/año en los últimos 10 años. Las mayores precipitaciones se producen entre los meses de septiembre y marzo. La precipitación promedio, para el periodo comprendido entre los años de 1993 y 2005, fue calculada en 931 mm/año. Los valores de evapotranspiración potencial calculados para el mismo periodo de tiempo, aplicando el método de Thornthwaite, son estimadas en 785 mm/año (Quiroz, 2009). Geológicamente, la zona esta constituida por sedimentos Pampeanos y Postpampeanos, los cuales conforman una cubierta sedimentaria que alcanza más de 100 metros de espesor. Presentan granulometría variable, entre arenas y limos con intercalaciones arcillosas. Ocasionalmente, aparecen niveles de tosca (CaCO₃ pulverulento) y de ceniza volcánica.

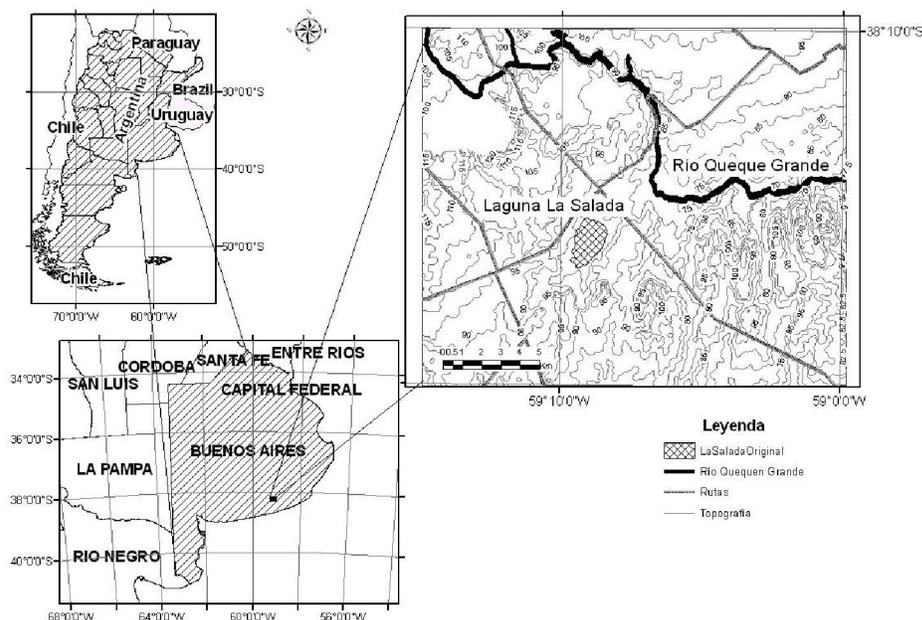


Figura 1. Localización del área de estudio.

3. METODOLOGÍA

La primera fase de este trabajo consistió en la compilación de datos e información preexistente relacionada con el recurso hídrico del área. Para ello, se visitaron las instituciones gubernamentales con jurisdicción en la zona (Comité de Cuenca del Río Quequén Grande, Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA, e intendencias de los partidos que conforman la cuenca), además de revisar la bibliografía referente al recurso. En cuanto al material cartográfico, se analizó lo siguiente: topografía, mapas políticos, hidrográficos, edáficos, geológicos e hidrogeológicos, imágenes de satélite de diferente resolución espacio temporal y fotomosaicos. Luego de reunir los datos, se procedió a su clasificación y estandarización, para su almacenamiento en una base de datos geográfica. La información cartográfica se procesó en su totalidad utilizando la herramienta de SIG ArcGis 9.2 (ESRI, 2007). A partir de imágenes de satélite ASTER y de cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000, se construyó un Modelo Digital de Terreno (MDT). Con este modelo, se delimitó la cuenca de drenaje de la laguna, se determinó la cota del espejo de agua del humedal en distintos años y se definió la relación altimétrica del mismo con los restantes cuerpos de agua. Se calcularon los principales parámetros morfométricos de la laguna (área, perímetro, longitud máxima total, ancho máximo, ancho medio, elipsidad, desarrollo de la línea de costa, profundidad máxima, profundidad media, relación entre profundidades media y máxima, y pendiente promedio) para tres períodos de tiempo diferentes:

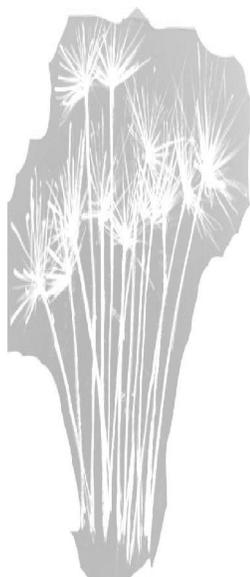
- El primero para el año 1970, utilizando la cartografía del IGM,
- El segundo, usando las imágenes ASTER del año 2002 con una resolución espacial de 15 m y, por último,
- Imágenes Landsat con resolución espacial de 27,8 m para el año 2005.

La batimetría para el año 2007 se obtuvo a partir de la medición de la profundidad en 23 puntos diferentes dentro de la laguna, utilizando para esto una mira topográfica graduada al centímetro. De igual manera, se tomaron coordenadas en 12 puntos en el límite de la misma. Hasta la fecha no se contaba con datos batimétricos para este humedal.

Utilizando el SIG, se definió una malla de muestreo en la laguna que consistió en 23 puntos distribuidos regularmente. Se realizó una campaña de muestreo en noviembre de 2007, en la cual se tomaron 23 muestras de agua superficial y 7 en profundidad. En todos los puntos, se tomaron muestras para análisis químico y se midieron in situ los principales parámetros fisicoquímicos (T, pH, conductividad, Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales Disueltos (TDS), Potencial Redox y Salinidad). Estos últimos se determinaron a 3 profundidades diferentes (1 m, 2 m y profundidad máxima), usando para esto una sonda multipara métrica HANNA HI 9828. Se seleccionaron 7 puntos a lo largo de una transecta con dirección SO-NE, en los cuales se colectaron muestras en superficie y a la máxima profundidad para su análisis químico e isotópico (^{18}O y ^2H), utilizando para el muestreo en profundidad una botella de tipo Van Dorn. Todas las estaciones y puntos de muestreo se localizaron por medio de un GPS Garmin eTrex Vista.

Se tomaron muestras de agua para obtener en el laboratorio: alcalinidad total, nitratos, fósforo total (PT), iones conservativos (Na^+ , K^+ , Mg^{+2} y Cl^-) y dinámicos (Ca^{+2} , CO_3^{-2} , HCO_3^- y SO_4^{-2}) y dureza total. Los métodos empleados fueron: cloruros por el método de Mhor, sulfatos por turbidimetría, calcio y magnesio por titulación complejométrica con EDTA, sodio y potasio por espectrometría de llama, sílice por el método de silicomolibdato, flúor mediante el método de circonil cloruro y nitratos por el método de la brucina. Las determinaciones químicas se hicieron siguiendo la metodología detallada en APHA (1992). La información hidroquímica fue analizada mediante una caracterización estadística general y diagramas convencionales de Piper (Hem, 1992), utilizando el paquete de computación AQUACHEM 4.0 (Calmbach y Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003).

Las determinaciones isotópicas se realizaron mediante un espectrómetro láser DLT-100 Liquid-Water Isotope Analyzer, Automated Injection desarrollado por Los Gatos Research. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de Hidrogeoquímica e Hidrología isotópica del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la Universidad Nacional de Mar del Plata.



4. RESULTADOS

4.1. Generación de Base de Datos Relacional

Una geodatabase (GDB) es un modelo que permite el almacenamiento físico de la información geográfica, ya sea en archivos dentro de un sistema de ficheros o en una colección de tablas en un Sistema Gestor de Base de Datos (Microsoft Access, Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2 e Informix) (ESRI, 2008). En este caso, el modelo constó de una cobertura con topología de punto, en la cual cada lugar de muestreo se tomó como una estación con diferentes campos de información. En el diseño, se consideró además que cada una de las estaciones podría tener asociadas muchas muestras a diferentes profundidades y en diferentes fechas, característica habitual en los trabajos de hidrología. Teniendo esto en cuenta, se generó una base de datos relacional que incluyó toda la información alfanumérica que se tenía hasta la fecha y la que se esperaba generar durante el proyecto. Para construir esta base de datos, se generó un Modelo Entidad Relación (MER) utilizando el programa Power Designer V.6.1. (SYBASE, 2000). Este modelo presentó en forma esquemática las tablas, atributos y relaciones entre los distintos datos.

Después de comprobar que todas las relaciones, entidades y campos se relacionaran correctamente, evitando la redundancia y logrando una normalización adecuada de cada uno de los campos, se generó un Modelo Físico en el que se construyeron las estructuras en que se almacenarían los datos en el sistema. El Modelo Físico es el que en forma definitiva se migra a un motor de base de datos en el cual se cargan los datos en forma normalizada. Para este caso, se utilizó el software Microsoft Access 2000. Se seleccionó dicho programa debido a su compatibilidad con el software ArcGis, además de la facilidad en el manejo y la accesibilidad que esta herramienta presenta para los usuarios finales. Por último, se realizó la migración de toda la información.

Luego de obtener esta base de datos, se realizó la migración de la misma a ArcGIS, mediante la herramienta ArcCatalog, generando una GDB (de tipo personal GDB), con topología de punto a la cual se le generaron las mismas relaciones que fueron realizadas y probadas en Microsoft Access. A esta cobertura se le sumaron otras con diferentes tipos de topologías. La información se sometió a un proceso de depuración y conversión desde los formatos fuente a formatos Shape. Las coberturas iniciales fueron topografía, geología, hidrología, suelos, infraestructura vial y división política. De igual manera, se adicionaron imágenes de satélite de diferentes épocas. Todas estas coberturas se incluyeron dentro la GDB del proyecto con el sistema de coordenadas GCS Campo Inchauspe "Argentina Zona 5".

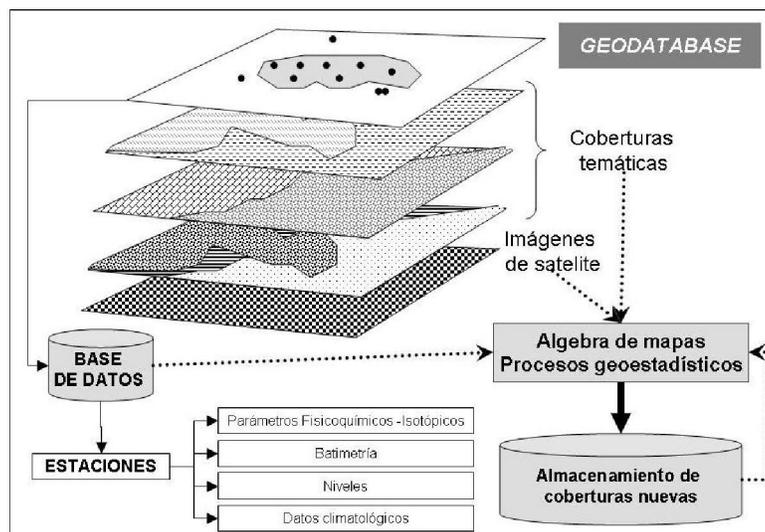


Figura 2. Modelo conceptual de la Geodatabase.

Este SIG se diseñó como de tipo abierto con el objetivo de poder introducir nuevas coberturas de información. La única restricción para adicionar una cobertura es poseer el mismo sistema de georeferenciación. Para la identificación de las diferentes estaciones de muestreo, se diseñó un código único y un código adicional para cada muestra (código de estación + fecha + profundidad). La GDB incluyó además un repositorio de mapas resultado donde se almacenaron todos los mapas procesados. Un esquema de la GDB se ilustra en la figura 2.

4.2. Modelo Digital de Terreno (MDT).

Con la información digitalizada de las cartas topográficas a escala 1:50,000 y la información de altura obtenida de una imagen de satélite ASTER, con resolución espacial de 27,5 m, se logró realizar el modelo digital de Terreno (MDT) de la zona de influencia del humedal (Figura 3). Para generar el MDT, se utilizó la extensión 3D Analyst, generando inicialmente un modelo de Red de Triángulos Irregulares (TIN por su sigla en inglés). Los datos utilizados en la generación de este TIN fueron los valores de cotas obtenidos a partir de curvas de nivel y, en menor proporción, aquellos extraídos de las imágenes de satélite ASTER. Se adicionaron a éstos, datos batimétricos de la laguna obtenidos en la campaña del año 2007, cotas de ríos y arroyos, y las vías, éstas últimas como función de cortes topográficos suaves. Se delimitó además el área de generación del TIN a la zona que involucra la cuenca de esta laguna. Después de esto, el TIN se convirtió a un archivo raster con un tamaño de píxel de 30 m. Este MDT obtenido, a su vez, sirvió de insumo para la elaboración de los mapas de pendiente de la zona, de orientación y de iluminación del terreno, todos éstos incluidos como funciones preestablecidas en la herramienta SIG y útiles en el análisis integral del humedal. El MDT también fue utilizado para determinar la altura del nivel de agua en el humedal en cada uno de los periodos analizados, lo cual permitió la determinación del volumen de agua para los distintos años. De igual manera, a partir del MDT, se elaboraron perfiles topográficos que permitieron determinar la relación altimétrica entre la laguna y el Río Quequén Grande (Figura 3). Éstos muestran la laguna La Salada en una posición topográfica más elevada que las demás lagunas y que el Río Quequén Grande, lo que hidráulicamente establece el carácter influente de la misma.

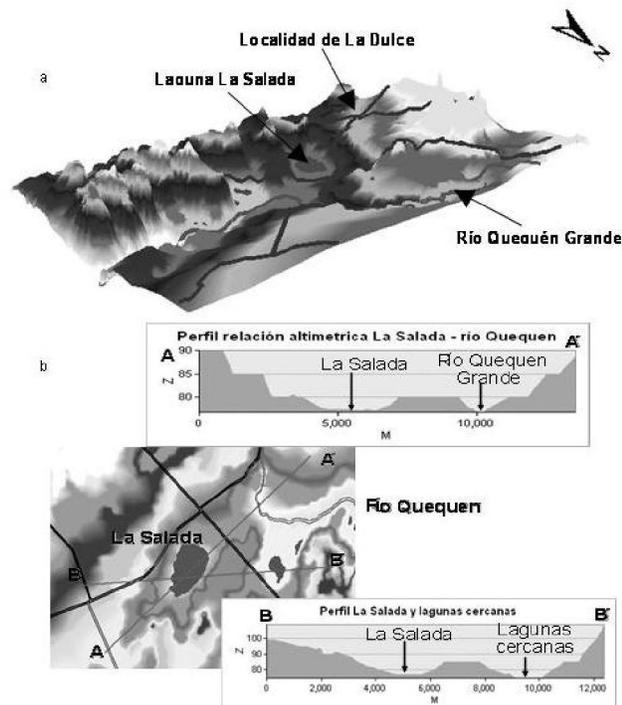
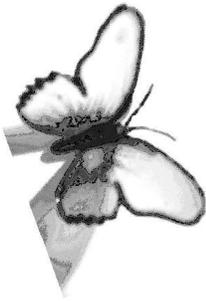


Figura 3. a. Modelo Digital de Elevación. Exageración altimétrica 100X b. Perfiles topográficos del área de influencia.

4.3. Batimetría

Para el año 2007, La Salada presentó una profundidad uniforme de 2,80 m y un volumen de 8,58 hm³. (Figura 4). Con la información batimétrica de la laguna, la topografía de la zona y la información obtenida a partir de imágenes de satélite, se calculó el volumen de agua para tres periodos diferentes. Para lograr esto, se utilizó un proceso preestablecido en la herramienta SIG que calcula áreas y volúmenes entre dos superficies con formato raster. Las superficies utilizadas fueron la topografía del fondo de la laguna definida en la campaña de muestreo de 2007 y el contorno del cuerpo de agua definido a partir de las imágenes de satélite para los distintos años. Al no poseer la batimetría para los diferentes años, se asumió que el fondo de la laguna permaneció constante en el tiempo. Para obtener el nivel del espejo de agua en cada época, se usó el valor promedio de la cota correspondiente a los puntos que conforman el contorno de la laguna. Este valor de cota fue obtenido usando el MDT y las imágenes de satélite para cada fecha. Mediante este procedimiento los volúmenes obtenidos fueron de 5,22 hm³ para el año 1970, 7,05 hm³ para el año 2002 y 7,13 para el año 2005.

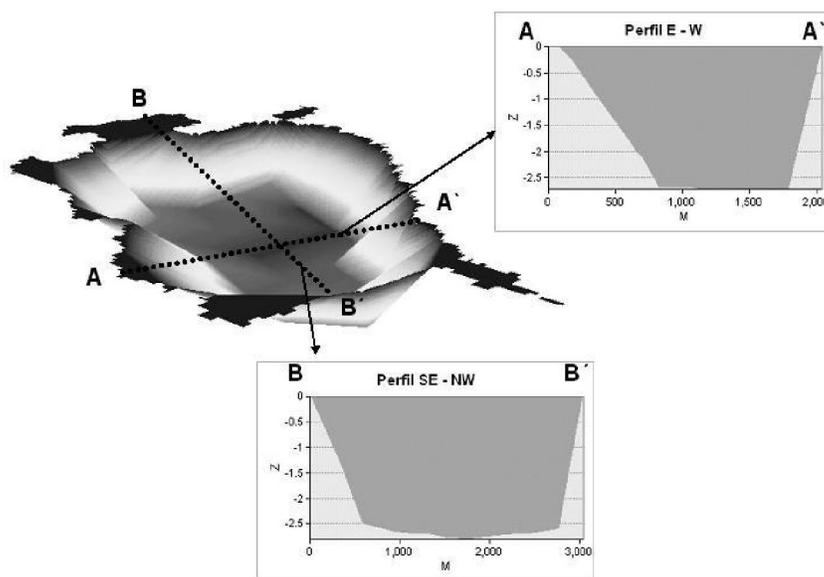


Figura 4. Batimetría de la laguna La Salada. Campaña 2007.

4.4. Cálculo Multitemporal de Parámetros Morfométricos

Esta laguna posee forma irregular, alargada y orientada en sentido N-S. Su contorno está bien definido, con costas bajas de suave pendiente hacia la laguna. No existen barrancas en la misma y una parte de su perímetro está recubierto por suelo y pastizales. El lecho lagunar se encuentra en la cota 77,5 msnm. El análisis multitemporal de los parámetros morfométricos permitió caracterizar y comparar el desarrollo de la laguna para los años 1970, 2002 y 2005 (Tabla 1). Los parámetros analizados fueron: Área (S), Perímetro (P), Longitud máxima total (LMT), Ancho máximo (AM), Ancho medio (AMd), Elipsidad (E) y Desarrollo de la línea de costa (D), Profundidad Máxima (Z_{max}), Profundidad Media (Z_{media}), Relación entre Z_{media} : Z_{max} (R) y Pendiente Promedio (Figura 5).

Tabla 1. Principales parámetros morfométricos de la laguna La Salada, para los años 1970, 2002 y 2005.

Parámetros	Fórmula	Año 1970	Año 2002	Año 2005
Área (km ²)		3,08	5,96	6,09
Perímetro (km)		7,57	17,05	14,57
LMT (km)		2,62	4,07	4,11
AM (km)		1,52	2,16	2,17
AMd (km)	S/LMT	1,17	1,46	1,48
E	LMT-AM/LMT	0,42	3,54	3,58
D	$P/2\sqrt{\pi S}$	1,22	1,97	1,68
Z _{max} (m)		2,28	2,68	2,69
Z _{media} (m)	V/S	1,69	1,18	1,17
R	Z _{media} /Z _{max}	0,74	0,44	0,43
Pendiente media	$\pi^{0.5} Z_{max} / S^{0.5}$	2,33	1,94	1,93

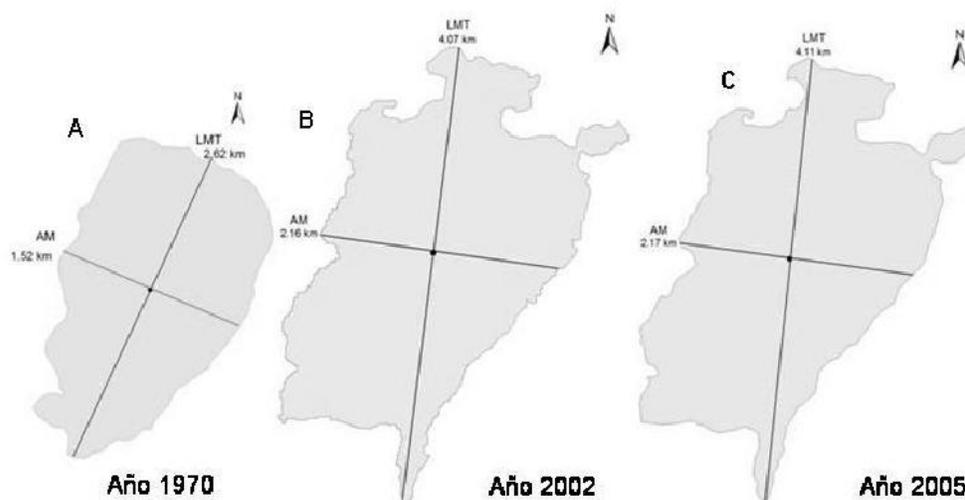


Figura 5. Geoforma, AM y LMT de la laguna La Salada para diferentes años (A. 1970 - B. 2002 Y C. 2005).

4.5. Caracterización Hidroquímica e Isotópica

La composición química de esta laguna es de tipo Na-CO₃-HCO₃-Cl, presentando gran homogeneidad tanto arealmente como en profundidad. Como puede observarse en el diagrama de Piper (Figura 6), todas las muestras se agrupan en el extremo sódico del triángulo catiónico, y son de tipo HCO₃-Cl en su composición aniónica. Según su salinidad es considerada como oligohalina (Madden et al., 2008), además es fuertemente alcalina con valores de pH que oscilan entre 9,40 y 9,73, y con una conductividad eléctrica media de 6766,81 μ s/cm. Los parámetros fisicoquímicos medidos a diferentes profundidades, muestran un aumento de temperatura hacia la parte más superficial (Figura 7). En el caso de la conductividad eléctrica, se observa un rango menor de conductividades a mayor profundidad.

Los datos estadísticos de los iones mayoritarios y los principales parámetros fisicoquímicos determinados en esta laguna se muestran en la tabla 2. Los valores de $\delta^{18}O$ y δ^2H encontrados en las muestras de laguna indican aguas enriquecidas en estos isótopos con referencia al estándar internacional SMOW. Los mismos se ubican sobre una línea de evaporación que tiene como origen la composición media del agua subterránea de la zona. Los valores promedio son de $\delta^{18}O$ y δ^2H son de 1,14‰ y 9,25‰ respectivamente. Los resultados se ilustran en la figura 8 junto con datos isotópicos de precipitación, de agua subterránea y muestras procedente del RQG (Martínez et al., 2007).

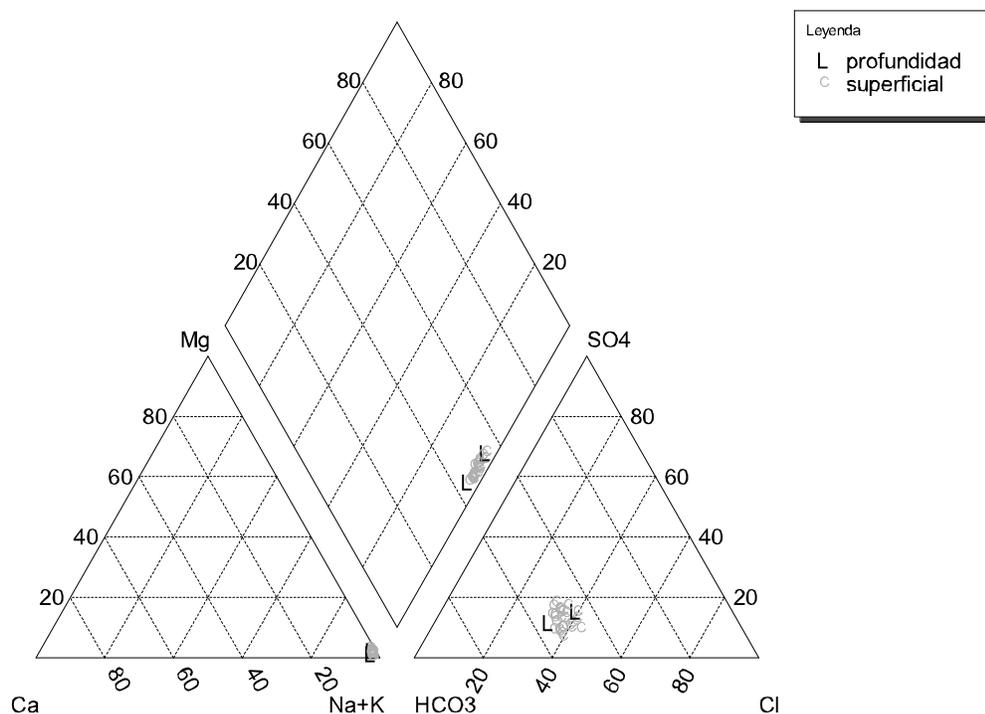


Figura 6. Principales parámetros físico-químicos de la laguna La Salada.

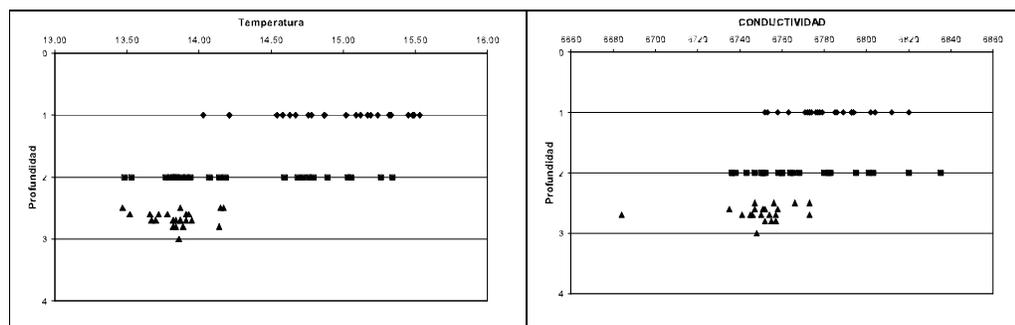
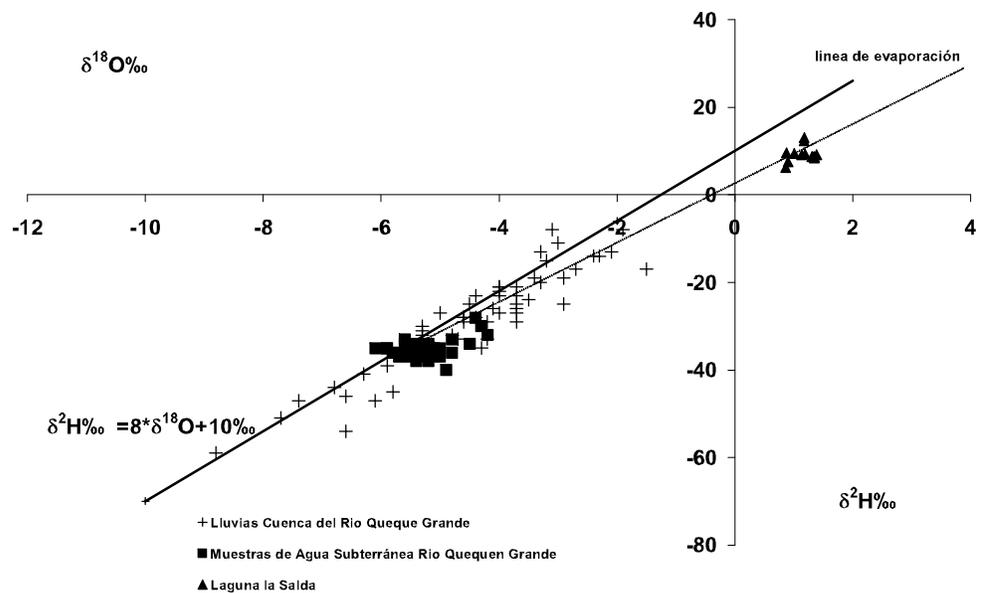


Figura 7. Variación de la temperatura y conductividad del agua en función de la profundidad.

Tabla 2. Parámetros estadísticos que caracterizan el agua de la laguna La Salada

Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Media	Desv Std	Coef. Desv
Na	mg/l	2036,6	2970,0	2642,3	191,5	7,2
K	mg/l	10,3	52,0	29,7	7,6	25,5
Ca	mg/l	16	45,1	27,2	6,7	24,6
Mg	mg/l	8,28	54,2	28,0	9,6	34,3
Cl	mg/l	1033,1	1595,5	1243,3	128,0	10,3
HCO3	mg/l	2479	3260,1	2907,6	195,0	6,7
CO3	mg/l	1154,6	1765,9	1475,5	128,2	8,7
SO4	mg/l	305	872,2	597,9	143,6	24,0
TEMP	°C	13,5	15,5	14,7	0,6	4,1
pH		9,61	9,7	9,7	10,8	111,7
Cond. Elec.	µS/cm	6000	6280,0	6121,4	78,6	1,3
Dureza total	mg/l	117	276,6	184,8	31,9	17,2
Alcalinidad	mg/l	4007,24	4686,4	4383,1	140,9	3,2

Figura 8. Contenido isotópico de la laguna La Salada y su relación con agua de diferentes fuentes en la zona de la cuenca del Río Quequén Grande.



Para explicar el origen de la composición química de esta laguna, se puede analizar el diagrama de Gibss (Figura 9), donde se representa en forma gráfica sólidos totales disueltos (TDS) en función $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$. De acuerdo a la ubicación de los puntos en este diagrama, es posible determinar qué tipo de fenómeno es el responsable de las características del agua. En este sistema acuático, el proceso de precipitación- evaporación (predominio de sodio y valores elevados de TDS) define la composición química del mismo. Al no haber puntos en la zona inferior derecha, con valores bajos de TDS y alta relación $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$, se puede inferir que la precipitación atmosférica no influye en la composición química de esta laguna. De igual manera, el proceso de meteorización de rocas de la cuenca de drenaje (predominio del Ca^{2+} y valores medios de TDS) tampoco explica el origen de la composición química de estas aguas.

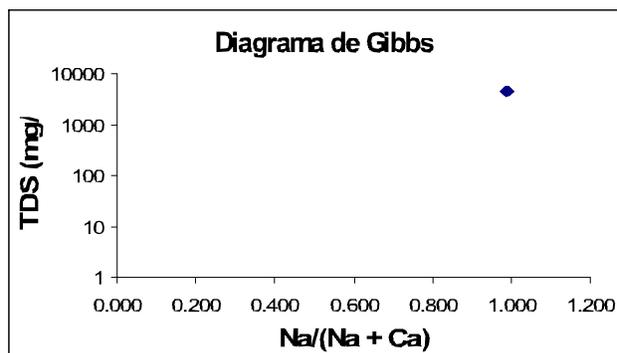


Figura 9. Distribución de las muestras de agua de la laguna en base al Diagrama de Gibbs.

5. DISCUSIÓN

A partir de 1970 hasta la actualidad, se ha registrado un incremento regional en la precipitación, que se refleja en la morfometría de la laguna, con el incremento de los valores de sus parámetros morfométricos. Se puede observar el aumento en todos los parámetros en los años 2002 y 2005, debido esencialmente al aumento areal. La misma ha aumentado su superficie en 2,88 km² y 3,01 km² respectivamente, en comparación con el año 1970. Para 2005, en general, se obtuvieron los máximos valores de estos parámetros con respecto a las fechas restantes. Es importante resaltar que las lagunas pampásicas son lagos de llanura, muy poco profundos y es por esta razón que su hidrología es altamente dependiente de las precipitaciones in situ (Quirós et al., 2002).

La pendiente promedio representa cuan abrupta es la forma de un laguna (Quirós, 2004), pues relaciona en última instancia su área y profundidad (Rodríguez et al., 2001). Para 1970, este valor fue el 16,7 % mayor que en 2002 y 2005, mostrando un mayor desarrollo de la laguna en profundidad. En 1970 la relación S/V fue menor que en los otros dos años considerados, indicando un menor desarrollo en área en relación al volumen. Tanto la pendiente promedio como la relación S/V se ven afectados por las bajas profundidades en sus costas de suave pendiente.

Las mayores diferencias en los parámetros analizados se encuentran en las profundidades máximas y medias así como en el volumen de agua almacenada. En 2002 y 2005, el nivel de agua de la laguna fue mayor y en consecuencia, la profundidad máxima de la misma se vio incrementada en relación al año 1970 en 0,40 y 0,41 m, respectivamente. Sin embargo, la Z_{media} fue menor en estos años determinando una forma más homogénea del cuerpo de agua. Considerando el valor obtenido del desarrollo de la línea de costa para el humedal en los tres períodos, puede observarse que en el año 1970, el cuerpo de agua posee una forma más circular tendiendo en los años recientes a una forma más irregular.

El análisis realizado a esta laguna deja planteados algunos interrogantes con respecto al comportamiento hidrológico de la misma. Uno de los aspectos más importantes es la relación que la laguna La Salada tiene con otras lagunas y con el Río Quequén Grande. Las diferencias altimétricas entre los distintos cuerpos de agua superficial establecen un carácter influente de esta laguna. Por su parte, el análisis de los parámetros morfométricos muestra un aumento en el tamaño de la laguna en los últimos años, indicando un mayor aporte del sistema hídrico a la laguna, tanto superficial como subterráneamente. Los valores de conductividad tomados a diferentes profundidades sugieren un aporte de agua desde el lecho, lo cual sumado al régimen de precipitación- evapotranspiración y la mínima escorrentía en esta zona de llanura definen al agua subterránea como principal fuente de recarga de esta laguna. Sin embargo, debe considerarse que el aumento de conductividad detectado puede deberse a la disminución en profundidad de la temperatura, dada la correlación positiva existente entre estos dos parámetros (Hem, 1992).

Las características químicas permiten determinar que la laguna se clasifica como de tipo oligohalina, de composición química homogénea y de acuerdo a criterios de la OECD (Lampert y Sommer, 1997), puede considerarse hipereutrófica, debido a los valores de PT detectados en sus aguas (siempre $> 100 \mu\text{g/l}$), presentando solamente algún tipo de estratificación en los valores de temperatura. Los valores de conductividad, sumados al contenido isotópico y al análisis del diagrama de Gibbs muestran que el agua contenida en este cuerpo de agua es el resultado del proceso de evaporación. Lo anterior conlleva a establecer que el agua de la laguna es el resultado en mayor porcentaje de agua subterránea sometida a este proceso.

El exceso de sodio en la composición química del agua de la laguna puede ser explicado si se tiene en cuenta que los sedimentos Pampeanos cobran especial importancia en la composición química del agua. Las arcillas ricas en sodio son componentes mayoritarios del loess Pampeano. Cuando el agua subterránea (principal fuente de recarga) que contiene iones calcio alcanza las lagunas, se produce un proceso de intercambio iónico, en el cual los iones Ca^{2+} del agua son intercambiados por los iones Na^+ de las arcillas. Este intercambio catiónico explica las desviaciones observadas en el patrón de Gibbs (Díaz y Colasurdo, 2008). Un monitoreo de agua subterránea en la zona, tanto de niveles piezométricos como hidroquímico e isotópico permitiría definir de una manera más adecuada el modelo hidrológico de esta laguna, y además establecer la influencia de esta laguna en el acuífero y viceversa.

Los muestreos en humedales generan un gran volumen de información, que debe ser analizada e interpretada de manera integral. Dicho análisis puede ser mucho más productivo si lo relacionamos con el comportamiento y la distribución de las diferentes variables en el espacio y su variación temporal. Los SIG resultan en este proceso una herramienta muy funcional. Entender que la capacidad de los SIG va más allá de una simple representación gráfica y entenderlos como una secuencia de actividades tendientes a generar, almacenar y administrar datos e información de un proyecto, permite aprovechar al máximo las potencialidades de este tipo de sistema. Esto redundará en la calidad de los datos y consecuentemente en la calidad de los proyectos que utilizan el sistema para su ejecución. Una de las ventajas que tiene la implementación de estos sistemas, es asegurar la integridad y el almacenamiento de los datos teniendo en cuenta el componente temporal, lo que da la opción de comparar de manera directa la evolución de diferentes parámetros, convirtiéndose en una herramienta útil para la gestión de estos cuerpos hídricos.

La organización y estructuración de la información tanto alfanumérica como digital en estudios hidrológicos-limnológicos permite aprovechar de una manera eficiente las diversas herramientas de análisis geográfico y estadístico incorporadas en los SIG. Todo esto permite generar información relevante tendiente al planeamiento y al manejo del recurso hídrico.

6. CONCLUSIONES

El uso del agua de la laguna como fuente de abastecimiento para consumo humano estaría restringido, salvo que sus aguas fueran sometidas a tratamiento convencional. Las principales limitaciones se deben a que los parámetros químicos del agua superan los valores permitidos de pH, Cloruros, Sulfatos y TDS (CAA, 1990). De igual manera, los altos valores de sodio y la elevada conductividad indican que la calidad del agua de esta laguna no es apta para la irrigación de cultivos. El uso de la laguna para baño o consumo animal se ve limitado como consecuencia de los elevados valores de pH (Sager, 2000).

Los parámetros morfométricos obtenidos a partir de información de diversas fuentes cartográficas reflejan de manera adecuada el régimen de precipitación que se da en la zona. No obstante, las características químicas y los diferentes análisis efectuados en las muestras de agua de la laguna demuestra poca incidencia de la precipitación atmosférica en las características fisicoquímicas de la misma. Análisis y modelaciones hidrogeoquímicas serían adecuados para entender la relación entre laguna- acuífero- agua lluvia.

El desarrollo de una metodología SIG permite manipular de manera conjunta información de diversa índole, que en este caso, permitió establecer lineamientos y bases para el



entendimiento del comportamiento hidrológico de la laguna La Salada, al igual que dar pautas para estudios posteriores que permitan completar el modelo hidrológico. El análisis integral de la información compilada y generada durante la elaboración de este trabajo ofrece datos importantes para empezar a comprender el funcionamiento hidrológico de este humedal.

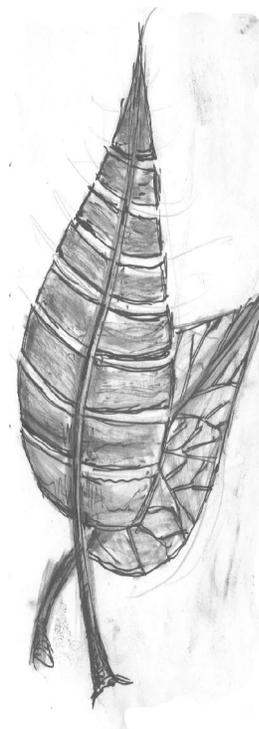
La creación de este tipo de sistemas permite evaluar la variación de parámetros tomados en diferentes épocas, y además la integración y comparación de información de lagunas similares. Utilizar un mayor número de imágenes de satélite con igual resolución temporal puede mejorar mucho este tipo de análisis, aportando información sobre el comportamiento de la laguna ante diferentes escenarios climáticos. El análisis de imágenes de satélite de diferentes épocas, sumado a la información contenida en cartas topográficas, permitió establecer la evolución morfométrica de esta laguna. Todo lo anterior sumado a los MDT's y procesamientos cartográficos facilitados por los SIG permiten inferir datos importantes en la historia hidrológica de humedales en ambientes de llanura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) proyecto CRP "Isotopic techniques for assessment of hydrological processes in wetlands". Agradecen también al Comité de Cuenca del Río Quequén Grande por el apoyo en las etapas iniciales de este trabajo, y al técnico químico, Sr. Gustavo Bernava, quien realizó los análisis de iones mayoritarios. Agradece especialmente al Técnico Hidrógrafo Angel Ferrante por su importante colaboración en las campañas de muestreo.

BIBLIOGRAFÍA

- American Public Health Association, APHA. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater, Ed. 18.
- CAA-Código Alimentario Argentino, 1990. Disponible en internet: http://www.alimentosargentinos.gov.ar/programa_calidad/Marco_Regulatorio/CAA/CAPITULOXII.htm
- Dangavs, N.V., 1976. Descripción sistemática de los parámetros morfométricos considerados en las lagunas pampásicas. *Limnobiós* 1 (2): pp 35-59.
- Deluchi, M., Laurencena, P., Varela, L y Kruse, E., 1995. Caracterización hidrológica regional de la llanura interserrana, provincia de buenos aires. Primera Etapa. Jornadas de comunicaciones científicas de la facultad de ciencias naturales y Museo.
- Díaz, E., Mamado, K., Iturbe, A., Esteller, V. y Reyna, F., 1999. Estimación de las características fisiográficas de una cuenca con la ayuda de SIG y MEDT: Caso del curso alto del Río Lerma, Estado de México. *Ciencia Ergo Sum*, (6) 2: pp. 124-134.
- Díaz, O. y Colasurdo V., 2008. El agua revela sus secretos. Química de las lagunas pampeanas. En: *Espejos en la llanura. Nuestras lagunas de la región pampeana*. Grosman F. (ed.).UNCPBA, Tandil, Argentina, pp. 47-64
- Esteller, M. V., Quentín, E. y Díaz-Delgado C., 2003. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, (2) 1: pp.17-30.
- HEM, J. D., 1992. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters. U.S.G.S. Water-Supply Paper 2254, fourth printing, 263 P..
- ESRI, Environment System Research Institute, 2007. Home page:<http://www.esri.com>.
- ESRI, Environment System Research Institute, 2008. Home page:<http://www.esri.com.es>.
- Kruse, E; Laurence, P. Deluchi, M y Varela, L., 1997. Caracterización de la red de drenaje para la evaluación hidrológica en la región interserrana (provincia de Buenos Aires). En actas, I Congreso Nacional de Hidrogeología y III Seminario Hispano - Argentino sobre temas actuales de hidrología



- subterránea. Bahía Blanca, Argentina. pp.133 -145.
- Lampert, W. and Sommer U., 1997. Limnoecology. The ecology of lakes and streams. Oxford Univ. Press. New York. Oxford, 382 P.
- MA, Millennium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis. Millennium Ecosystem Assessment report to the Ramsar Convention. World Resources Institute, Washington, DC.
- Madden, C. J., Goodin K., Allee R., Bamford D. y Finkbeiner M., 2008. Clasificación Ecológica Estandarizada Costera y Marina - Versión III: La clasificación de referencia para hábitats marinos para la Red Temática de Ecosistemas IABIN. National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce. 36 P. Disponible en internet: www.csc.noaa.gov.
- Martinez, G., 2007. Mapeo geomorfológico con imágenes Landsat 7 y Radarsat 1 en la cuenca del río Quequén Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Congreso de la Asociación española de Teledetección. Mar del Plata, Argentina.
- Martinez, D.E., Dapeña, C., Betancur, T., Panarello, H.O., Quiroz, O.M. and Massone H.E., 2007. Environmental Isotopes In The Water Cycle In The Catchment Of The Quequen Grande River, Argentina. International Symposium on Advances in Isotope Hydrology and its role in Sustainable Water Resources Management, (IHS-2007), Proceedings, Vol. 1: pp. 381-388. Viena, Austria.
- Quirós, R., 1995. Fish effects on pelagic-trophic relationships in a comparative lake study. *Lake and Reservoir Management* 11: pp. 291-298.
- Quirós, R.; Rosso, J.J.; Rennella, A.; Sosnovsky, A. y Boveri, M., 2002. Estudio sobre el estado trófico de las lagunas pampeanas. *Interciencia*, 27: pp. 584-591.
- Quirós, R., 2004. Sobre la morfología de las lagunas pampeanas. Documento de Trabajo del Área de Sistemas de producción Acuática N°3, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, 16 P.
- Quiroz, L., O, M., 2009. Hidrogeología e Hidrogeoquímica de las Cuencas de los Arroyos Tamangueyú y El Moro Provincia de Buenos Aires. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. En prensa.
- Rodríguez-Rodríguez, Cruz-Pizarro, M., Cruz-San Julián, L., Benavente Herrera, J. J. y Almécija Ruiz, J. C., 2001. Caracterización limnológica de dos lagunas saladas del sur de la península Ibérica. *Limnetica* 20(2): pp. 233-243.
- Sager, R., 2000. Agua para Bebida de Bovinos .INTA E.E.A San Luis. Reedición de la Serie Técnica N° 126. <http://www.produccion-animal.com.ar/>.
- SYBASE, 2000. POWER DESIGNER V.6.1. Case tool. WorlWide.
- Thortwaite, C.W., 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical review* 38, pp. 55-94.
- U.S. Department of Interior. Disponible em internet: <http://www.water-research.net/hardness.htm>
- Cambalach y Waterloo Hydrogeologic, 2003. Water Quality Data Analysis, Plotting, y Modeling; Aquachem User's Manual v.4.0., Co-Developed by Lukas Calmbach and Waterloo Hydrogeologic, Inc., United States of America, 276 P.
- Wetzel, R.G., 1981. Limnología. Ed. Omega, Barcelona, 679 P.
- Wetzel, R.G., 2001. Limnology. Lake and River Ecosystems. 3rd Edition. Academic Press, San Diego, 1006 P.

