

# Estudio Hidrogeológico de la Laguna de Apoyo (Nicaragua) y propuestas para su Gestión

D. Vázquez-Prada Baillet<sup>(1)</sup>, J. Ortega<sup>(2)</sup>, E. Alonso Marín<sup>(3)</sup>, D. Cerrato<sup>(4)</sup> y J. A. Sánchez Navarro<sup>(5)</sup>

(1) Geólogos del Mundo, Becario de la Federación Aragonesa de Solidaridad, año 2006-2007.  
diegovazquezprada@yahoo.es; coordinacion@amictlan.com

(2) Asociación de Municipios Integrados por la Cuenca y Territorios de la Laguna de Apoyo, Nicaragua (AMICTLAN).  
De la Iglesia Bautista, ½ cuadra al Norte, Catarina, Masaya, Nicaragua.  
jortegaf@yahoo.com, página web: www.amictlan.com

(3) Instituto Geológico y Minero de España (IGME), C/ Ríos Rosas, 23 Madrid, España  
e.alonso@igme.es

(4) Asociación de Municipios Integrados por la Cuenca y Territorios de la Laguna de Apoyo, Nicaragua (AMICTLAN).  
De la Iglesia Bautista, ½ cuadra al Norte, Catarina, Masaya, Nicaragua.  
sig@amictlan.com, página web: www.amictlan.com

(5) Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España.  
joseange@unizar.es

## RESUMEN

La laguna endorreica de Apoyo, situada en el interior de una caldera en la cadena volcánica nicaragüense, tiene varios problemas ambientales y socio-económicos entre los que destaca un continuado descenso de su nivel de agua, estimado en más de 15 metros desde 1950 y una contaminación natural de Arsénico. La diferencia entre la precipitación (de 1420 mm/año) y evaporación media anual (2017 mm/año) que recibe la laguna es el factor principal que determina la evolución de su nivel del agua, que también depende del balance de entradas y salidas de agua subterránea a la laguna. La piezometría realizada, junto con datos hidroquímicos han corroborado la existencia de una zona de ganancia de agua subterránea en su parte sur-occidental, y una zonas de pérdidas en su parte nor-oriental, todo ello en relación con el acuífero volcánico regional Las Sierras, que tiene su nivel de base en el Lago de Nicaragua al este de la laguna. El balance hídrico realizado indica un déficit de 6 hm<sup>3</sup>/año que evidencia el desequilibrio de la Laguna de Apoyo. Los estudios se realizaron con el acompañamiento de técnicos municipales y guardaparques y se presentaron a las autoridades y población propuestas para la gestión de esta singular cuenca endorreica al objeto de evitar problemas ambientales y, especialmente, de salud, como los relacionados con el uso de aguas procedentes de la Laguna, de pozos próximos a ella o los situados en la zona de salida, que presentan elevados contenidos en arsénico.

Palabras clave: arsénico, balance hídrico, endorreico, gestión del agua, laguna de Apoyo

## ***Laguna de Apoyo (Nicaragua) Hydrogeological Study and management proposals***

### ABSTRACT

*The blind drainage lake of Apoyo, located within a caldera in the Nicaraguan Volcanic Chain, suffers from several environmental and socio-economic problems among which stands out a continued decline in its water level, estimated at more than 15 meters from 1950, and a natural pollution of arsenic. Difference between average annual Precipitation (1420 mm/year) and Evaporation (2017 mm/year) over lake surface is the main factor that determines the evolution of its water levels, which also depends on outlets-inlets underground water balance. Piezometry and hydrochemistry data corroborates the existence of an underground inflow area located South-West and an underground outflow area located North-East, both in regard to the Las Sierras regional aquifer which has its base level in Nicaragua Lake, East of Apoyo Lake. Hydrogeological budget indicates an annual water shortage of 6 hm<sup>3</sup>/año, showing the Apoyo Lake water imbalance. Works have been shared and followed by municipality and government technicians and watershed management proposals were presented to the population and authorities to solve environmental and health difficulties, such as the Apoyo Lake high arsenic levels and the affection to wells located near shore and over the underground water outlet area.*

*Key words: apoyo lake, arsenic, hydrogeological budget, blind drainage lake, water management*

## **Introducción**

La Reserva Natural Laguna de Apoyo (RNLA) se localiza a 38 Km de la ciudad de Managua, capital de

Nicaragua, entre los Departamentos de Masaya y Granada. Se trata de una laguna endorreica permanente con un ecosistema muy frágil y vulnerable a las presiones ambientales que ejerce la población y el

creciente turismo en la zona. Una de la problemáticas que han levantado mayor preocupación a las municipalidades es el acusado descenso del nivel de la Laguna, de una media de unos 30 cm al año, siendo mucho más acelerado que el del resto de lagunas del país. Dada la importancia económica y ambiental de este cuerpo de agua, el espacio protegido más visitado del país, los municipios aledaños han visto la necesidad de unir sus esfuerzos para su conservación y ordenamiento, a través de la creación de una Asociación de Municipios (AMICTLAN, Asociación de Municipios Integrados por la Cuenca y Territorios de la Laguna de Apoyo, Nicaragua).

Este trabajo de investigación se orienta a comprender el funcionamiento hidrogeológico de la Laguna de Apoyo con el fin de dar pautas para el Ordenamiento Territorial y la Gestión de los Recursos Hídricos en los municipios y la Reserva Natural. Este objetivo forma parte del Programa Integral por el Ordenamiento Ambiental de Apoyo (PIXOA), proyecto de cooperación al desarrollo que está realizando Geólogos del Mundo junto a AMICTLAN gracias al cofinanciamiento de la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo.

## Metodología

Tras la revisión bibliográfica y la interpretación de datos meteorológicos, fotos aéreas, ortofotos base de datos SIG, base de datos sobre pozos perforados, etc., el estudio se realizó en dos campañas de campo; una durante la época seca (entre Marzo y Junio) y la otra durante la época lluviosa (entre Agosto y

Noviembre), donde se realizó un inventario de pozos excavados y perforados dentro y fuera del área del cráter de la Laguna de Apoyo, así como giras de campo para el reconocimiento geológico, muestreo de suelos, análisis de aguas y realización de pruebas de infiltración. En cada una de estas giras, se georeferenció la posición por medio del sistema de posicionamiento global (GPS), se rellenó una ficha para cada punto de agua, y se digitalizó la información, para generar los diferentes mapas temáticos.

Para la realización del trabajo se ha contado con el apoyo de las Unidades Técnicas Municipales con una doble finalidad. La primera para que sirvieran como guías para localizar puntos de interés para el estudio y la segunda para que conocieran la metodología del estudio mediante su propia participación en el mismo, lo que asegura que estos funcionarios públicos locales se apropien del estudio y apliquen los resultados del mismo para la toma de decisiones en su municipio.

Los resultados se presentaron a los consejos Municipales de las 6 Alcaldías cuyo territorio conforma la Reserva Natural Laguna de Apoyo, a técnicos del Ministerio de Medio Ambiente (MARENA) y a la población que habita dentro de la Caldera (ver foto 1). A partir de las observaciones extraídas en dichas presentaciones se han redactado unas propuestas de Gestión para poder ser adoptadas por los encargados de la toma de decisiones. En posteriores trabajos del PIXOA (Programa Integral por el Ordenamiento Ambiental de Apoyo) se pretende que estas propues-

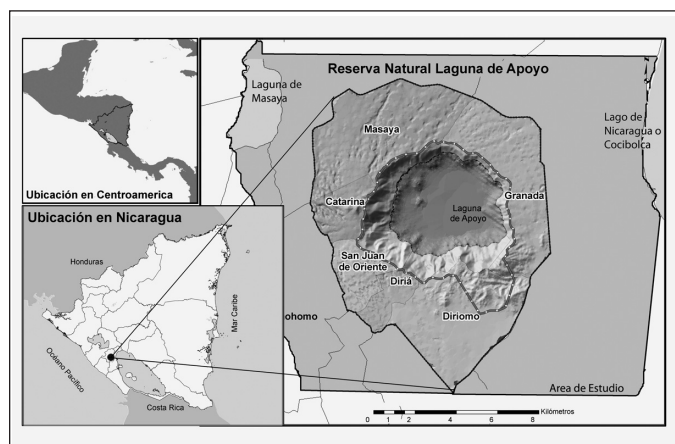


Figura 1. Situación de la Reserva Natural de la Laguna de Apoyo en Centroamérica

Figure 1. Apoyo Lake Natural Reserve location in Central America



Foto 1. Exposición de los resultados ante la población del Plan de la Laguna

Photo 1. Study results presentation for the Plan de la Laguna community

tas sean consensuadas y en su caso incluidas en Ordenanzas Municipales comunes a las seis municipalidades que comparten la Laguna.

### **Características de la subcuenca de la laguna de apoyo**

La caldera de la laguna de Apoyo, es una estructura volcánica de forma casi circular de unos 36.32 km<sup>2</sup>, en cuyo fondo se encuentra una laguna también circular de unos 6.6 km. de diámetro, con un espejo de agua de 20.92 km<sup>2</sup>. Este cuerpo de agua está situado a una cota de 68 m s.n.m. entre la laguna de Masaya al Oeste (cota 119 m s.n.m.) y el gran Lago de Nicaragua al este (cota de 31 m s.n.m). De acuerdo a la batimetría realizada por el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER-CIRA, 2006), su profundidad máxima es de 176 metros.

El nivel de agua de esta laguna ha descendido 6.18 metros durante los últimos 20 años (ver figura 2). El registro de sedimentos lacustres parecen indicar que el nivel máximo de la laguna se situó a unos 15 metros sobre el nivel actual, lo que vendría a decir, que dados los descensos registrados, ese nivel debió de registrarse hacia los años 60'. La falta de registro de sedimentos lacustres por encima de ese nivel nos hace suponer que la laguna tuvo un mayor equilibrio en el pasado.

El clima de la zona es tropical de sabana con variaciones a sub-tropical, semi-húmedo con temperaturas que varían entre los 20 y 35 °C y temperatura media de unos 23 °C. Las condiciones climáticas predominantes son estacionales, caracterizadas por una

estación seca, con un mínimo de precipitaciones en Abril (verano), y una estación lluviosa, con un máximo de precipitaciones en Octubre (invierno).

La precipitación media calculada en un periodo de 20 años, ponderada entre 4 estaciones de INETER situadas en las proximidades de la laguna de Apoyo, es de 1420 mm/año, en contraste con la evaporación media anual de 2017 mm. La Figura 3 muestra como esta diferencia se mantiene con el tiempo; como consecuencia, existe un déficit hídrico de origen climático estimado, para el periodo de registro de precipitación analizado, en unos 560 mm/año.

### **Geología y suelos**

Esta laguna cratérica se formó tras una serie de erupciones freatoplínicas que destruyeron un estratovolcán denominado Pre-Apoyo hace unos 23 000 años (Sussman, 1982). Las principales unidades geológicas del área pertenecen al Grupo Volcánico del Cuaternario que consta de materiales constituidos principalmente por pómez, cenizas, tobas compactadas, conglomerados y lavas.

Existe una importante red de fracturas radiales que tendrían su origen en el colapso del volcán Pre-Apoyo, y que actúan hoy en día como debilidades estructurales del terreno, potenciando la instalación de red de drenaje y la ocurrencia de fenómenos de inestabilidad del terreno. La ocurrencia más o menos frecuente de terremotos someros es un indicativo de que el proceso de colapso de la caldera aún no ha terminado y aún se sienten los coletazos finales de tan violento proceso.



Foto 2. Vista de la Laguna endorreica de Apoyo  
*Photo 2. Apoyo endorreic lake view*



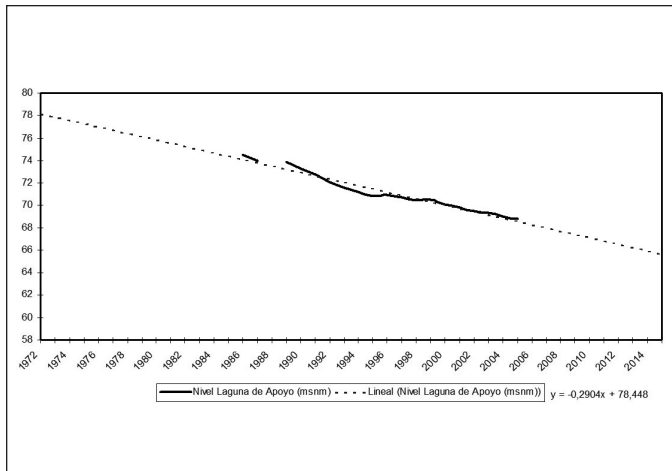


Figura 2. Curva de descenso del nivel de la Laguna de Apoyo medido por INETER (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales) desde 1988 y un dato medido por PNUD (Programa de la Naciones Unidas para el Desarrollo) en 1970

Figure 2. Apoyo Lake water level drop measured by INETER since 1988 and 1970 value measured by PNUD

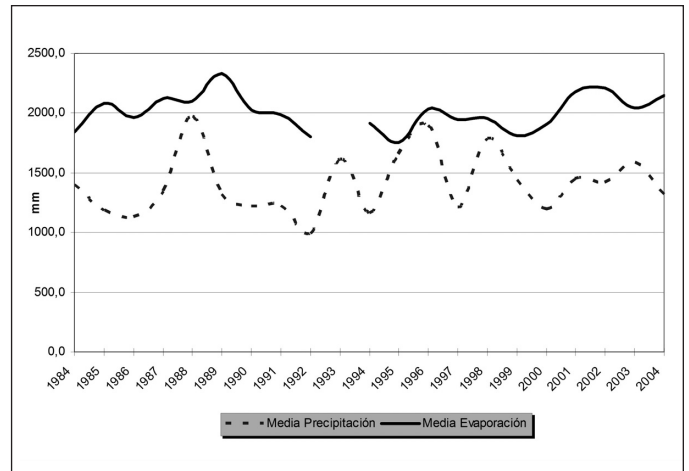


Figura 3. Curvas de la variación anual media de la Evaporación y la Precipitación (ponderado entre 4 estaciones meteorológicas de INETER situadas en la proximidades de Apoyo)

Figure 3. Evaporation and Rainfall annual variation (measured at surroundings weather station, INETER)

Los suelos de la Caldera reciben el nombre de Tierras Escarpadas (Catastro e Inventario de Recursos Naturales, 1972), están definidos como suelos de origen volcánico con contenidos moderados a altos en materia orgánica y en potasio, con concentraciones de fósforo variables, y con pendientes del terreno que suelen ser superiores al 35%. La textura de éstos es franco-arcillosa, con una capacidad de campo media de 18.7 %, punto de marchitez de aproximadamente 11% y una densidad media de las muestras de suelos analizadas de 1.35 gr/cm<sup>3</sup>.

### Hidrogeología

Se ha realizado un inventario de puntos de agua en toda la extensión de la caldera de la Laguna de Apoyo y alrededores (ver área de estudio en figura 2) localizando un total de 89 puntos, de los cuales 56 están ubicados dentro de la caldera (36 captaciones, 19 manantiales de agua no termales, y 1 manantial hidrotermal con surgencia de aguas a 60°C).

La Laguna de Apoyo está situada dentro un extenso y potente acuífero regional, definido por Krásný (1995) como Grupo Acuífero Principal, dentro del Subsistema Acuífero Granada-Tipitapa, de naturaleza volcánica, de edad Plio-Pleistocena (principalmente constituido por la Formación Las Sierras). La zona de descarga regional es el lago de Nicaragua que se sitúa a una cota de 31 m s.n.m

La Formación Las Sierras, que constituye principalmente el Acuífero Granada-Tipitapa, constituye el basamento de la Laguna de Apoyo y aflora en un punto a la orilla de la laguna, principalmente en la zona Norte a Este. El flujo general del agua subterránea presenta una dirección SW-NE desde las zonas altas de la Meseta de Carazo hasta el Lago Nicaragua (PROYECTO CEE-ALA., 1992; Krásný, 1995).

Se ha hecho un seguimiento de los niveles piezométricos en los puntos inventariados, tanto en la caldera como en su entorno y con ello se ha realizado el mapa piezométrico de la Fig. 4. El mapa piezométrico del acuífero volcánico regional muestra lo siguiente:

- 1- La Laguna de Apoyo provoca una distorsión en el flujo regional, que puede estar motivada por el efecto de la intensa evaporación que se produce sobre la lámina libre de agua en la laguna, y que constituye el afloramiento de la superficie freática. Esta evaporación produce un abatimiento del nivel lo que provoca el aporte de agua del acuífero a la laguna; este efecto ya ha sido citado en otras lagunas (Sánchez et al., 1998). La elevada permeabilidad de las formaciones volcánicas hace que esa depresión de la superficie freática no genere el típico cono producto de un flujo estrictamente radial (similar al de un cono de bombeo de un pozo en explotación) sino un cono abierto por un lateral. Ello implica la existencia de un flujo lateral de agua desde el acuífero hacia la laguna por su margen occidental y desde la lagu-

na hacia el acuífero por su margen oriental que termina en el Lago de Nicaragua, como puede verse en la figura 4.

- 2- La zona de entrada de agua subterránea a la laguna procedente del acuífero volcánico de Las Sierras se produce únicamente en la parte occidental, entre las localidades de San Juan de Oriente, Diriá y Diriomo, donde se localiza el mayor número de manantiales. De todos modos hay que considerar que la principal aportación se produce directamente bajo la laguna.
- 3- La zona de salida de agua subterránea hacia el Lago de Nicaragua, se produce exclusivamente en la parte oriental de la Laguna, en una franja estimada en unos 2,7 km. Esta zona de pérdidas de agua de la laguna, se evidencia en el mapa de isoconductividades del acuífero Granada-Tipitapa (ver Fig. 5). Las líneas de isoconductividad muestran el efecto de la infiltración de aguas muy mineralizadas desde la laguna (alrededor de 5000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de conductividad) en el acuífero citado y pone de manifiesto la presencia de un lineamiento NO-SE por el que se produce un mayor flujo.

Los materiales coluviales que recubren las vertientes de la laguna constituyen un acuífero superficial con aportes significativos de recursos, dada la eleva-

da pluviometría registrada en estaciones de la zona (alrededor de 1420 mm/año de precipitación media).

### Hidroquímica

El carácter hidroquímico de las aguas subterráneas que se relacionan con la Laguna de Apoyo se puede dividir en tres grupos (Tabla 1, Figura 5):

- **Grupo 1:** Aguas bicarbonatadas sódico-cálcicas y bicarbonatadas cálcico-sódicas ( $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ ;  $\text{HCO}_3\text{-Na-Ca}$ ) de baja conductividad eléctrica (menor a los 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

A este grupo pertenecen las aguas del acuífero de Las Sierras no influenciadas por la filtración de agua de laguna de Apoyo, tanto dentro como fuera de la caldera donde se ubica la laguna. También pertenecen a este grupo las aguas de la Laguna de Masaya (que tiene un carácter más magnésico), y del Lago Nicaragua. El quimismo de este agua es el resultado de la disolución, tras un tránsito relativamente corto en el acuífero, de rocas volcánicas.

De forma general se puede afirmar que estas aguas entran normalmente dentro de los límites de potabilidad que marcan las normas de referen-

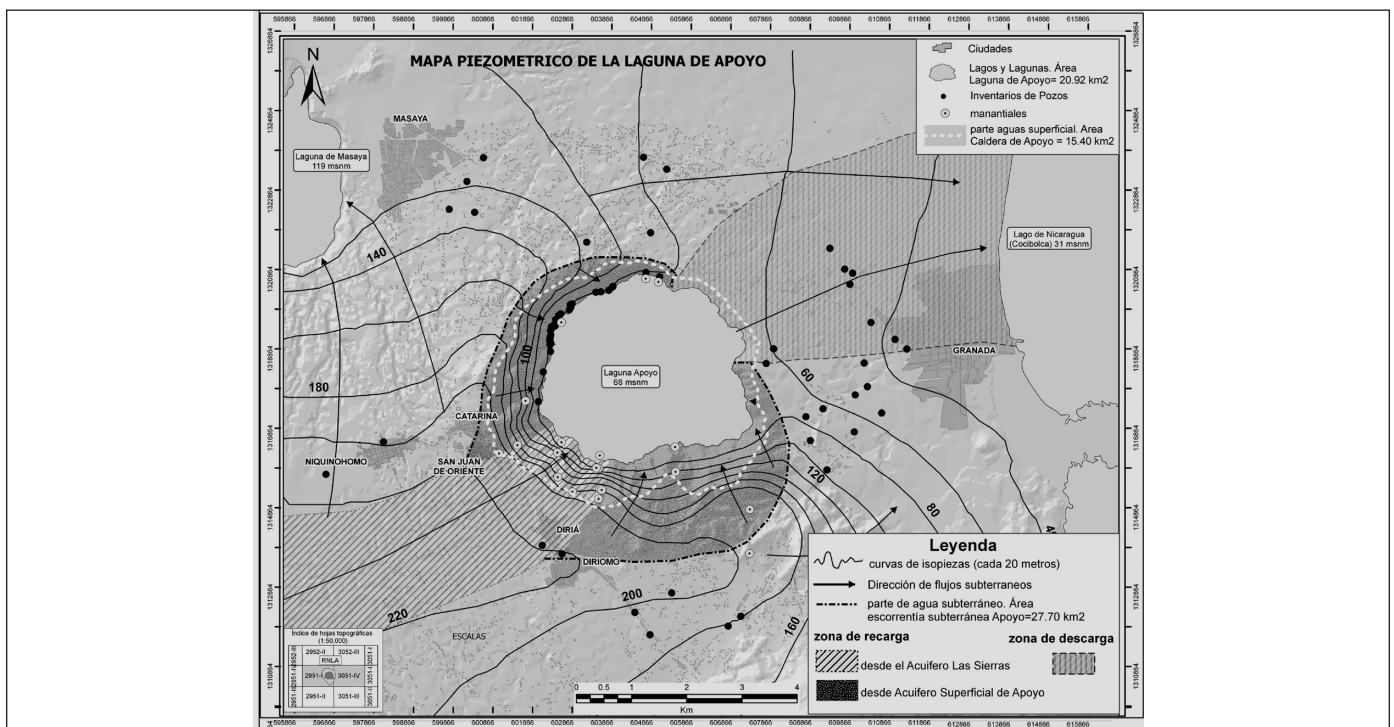


Figura 4. Mapa piezométrico de la Laguna de Apoyo y su entorno  
Figure 4. Piezometry map around Apoyo Lake

	Carácter químico	Sistema Acuífero	Tipo y localización	Puntos de agua
<b>Grupo 1</b>	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na HCO <sub>3</sub> -Na-Ca	Acuífero Las Sierras	Pozos alrededor de cráter de Apoyo	P18°, P55°
	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	Acuífero Superficial de Apoyo	Manantiales de Apoyo	F12*
	HCO <sub>3</sub> -Ca-Mg	A. Las Sierras	Laguna de Masaya	P09 y P71
	HCO <sub>3</sub> -Ca-Na	A. Las Sierras	Lago Cocibolca	LM'
<b>Grupo 2</b>	Cl-Na	A. de Apoyo	Laguna de Apoyo	LA*
	Cl-SO <sub>4</sub> -Na	Acuífero de Apoyo	aguas termales de la orilla a la laguna	F04*
<b>Grupo 3</b>	Cl-HCO <sub>3</sub> -Na	Mezcla A. Superficial y Laguna de Apoyo	Algunos pozos cercanos a la Laguna	P13 y P65
		Mezcla Acuífero de Apoyo y A. Las Sierras	Pozos entre Apoyo y cocibolca, al Nor-Este de Granada cuidad	P74
*CIRA / UNAN-Managua - en publicación. ° 2004 - Alcaldía de Catarina (AMCA) - Geólogos del Mundo ' F. Parello et al, (en revisión de publicación)				

Tabla 1. Grupos hidroquímicos de la Sub-Cuenca de Apoyo y alrededores  
Table 1. Hydrochemistry groups for the Apoyo watershed and surroundings

cia para Nicaragua - Normas CAPRE (1994), aunque faltarían por realizar en cada caso los análisis bacteriológicos y de elementos químicos menores. Igualmente, su uso para riego, ganadería e industria parece adecuado.

- **Grupo 2:** Aguas clorurada sódicas (Cl-Na), con abundantes sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Se trata de las aguas

de la laguna de Apoyo, que presentan una gran salinidad (alrededor de los 5.000 µS/cm). En su estudio sobre la laguna de Apoyo, los investigado-

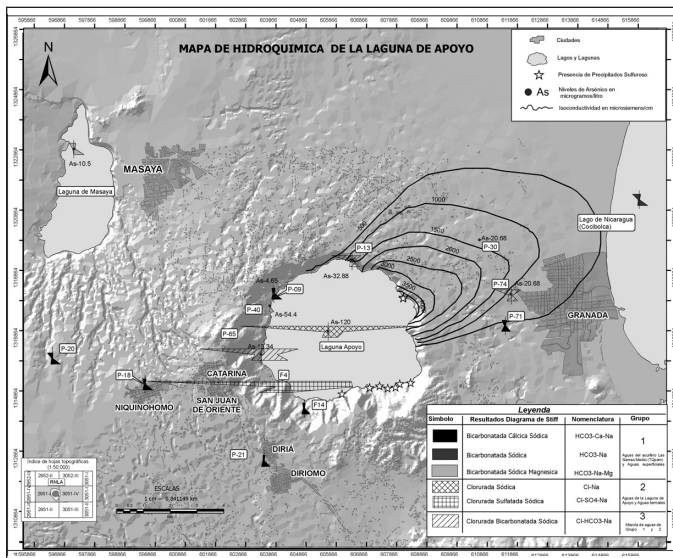


Figura 5. Caracterización hidroquímica de las agua relacionadas con la Laguna de Apoyo y ocurrencia de hidrotermalismo  
Figure 5. Apoyo lake related waters Hydrochemistry characterization

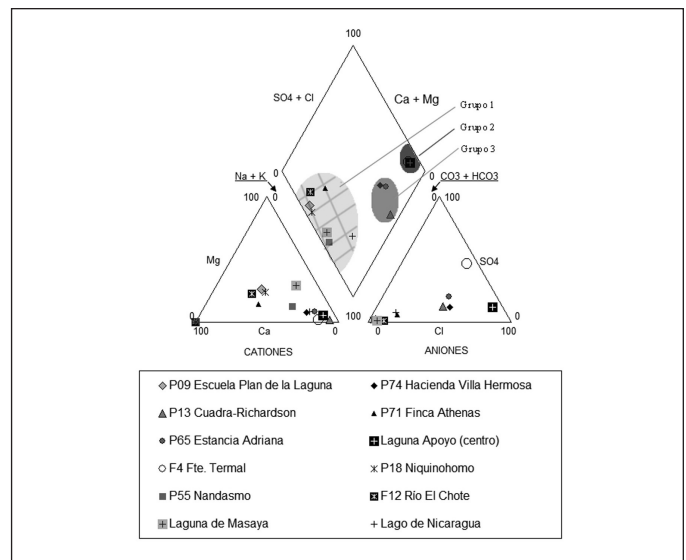


Figura 6. Diagrama de Piper para los análisis recopilados y delimitación de los Grupos Hidroquímicos. Los análisis químicos de los puntos F4, F12, Laguna de Apoyo y de Masaya, son parte del trabajo que CIRA-UNAN-Managua (en publicación) está realizando actualmente en la zona  
Figure 6. Piper diagram for the water analyses and hydrochemical groups. F4, F12 and Apoyo and Masaya Lake analyses are part of CIRA-UNAN-Managua non published work

res del CIRA-UNAN-Managua (2005) detectaron que desde que analizaron por primera vez esta agua en 1969 las concentraciones iónicas han ido aumentando, e interpretaron ese aumento de salinidad como consecuencia de la disminución del nivel de la Laguna. Dentro de este grupo se encuentran también las aguas hidrotermales que son otro factor importante que causa la salobridad de Apoyo. Se han detectado al menos 11 puntos en los que las aguas termales cargadas en sales fluyen hacia la Laguna.

Este grupo hidroquímico presenta valores muy elevados de Cloro, Sodio, Potasio, Sulfatos y de Arsénico, por lo que bajo ningún caso pueden ser utilizadas para consumo humano. Su alta salinidad y concentración en sodio lo hace inutilizable para riego.

- **Grupo 3:** aguas cloruradas bicarbonatada-sódicas resultado de la mezcla entre ambos grupos. Se trata de las aguas localizadas en los pozos cercanos a la Laguna que presentan intrusión salobre, los situados en la zona de influencia de las aguas infiltradas de la laguna en el acuífero de Las Sierras y en algunos casos, como en el del pozo P-65, con una temperatura de 39 °C, algún grado de hidrotermalismo.

Son aguas con valores intermedios de salinidad que normalmente presentan valores ligeramente por encima de lo que marca la norma CAPRE (1994). Tras la alerta levantada tras el conocimiento de los altos niveles de Arsénico presentes en la Laguna de Apoyo (Pararello et al, 2008) se han realizado varios análisis de Arsénico en pozos con aguas encuadradas en este grupo revelando la existencia de varios puntos con altas concentraciones de este elemento (ver figura 7).

El agua de este grupo puede usarse para riego pero con muchas precauciones, sobre todo en casos de salinidad alta.

### El uso del agua en la caldera de la Laguna de Apoyo

Actualmente existe una comunidad, el Plan de la Laguna, formada casi exclusivamente por cuidadores de fincas que empezaron a habitar la zona con la construcción de las primeras quintas de verano en los años 70. El total de viviendas, en su mayoría quintas de veraneo, es aproximadamente 190, y existen un complejo turístico con 64 villas y otros 8 Hoteles de menor magnitud.

Se estima que la población permanente residente en el Cráter de Apoyo es de 350 personas y la afluencia turística anual de aproximadamente 20.000 perso-

nas (según estimaciones de los distintos hoteles). Asumiendo un valor de 120 l/persona/día el consumo de agua total de los residentes permanentes, cuidadores y residentes de quintas, (los valores promedio asignados por la Empresa Nicaragüense de Agua y Alcantarillado -ENACAL- para estas zonas está entre 115 y 160 l/día) y de 300 l/persona/día el de los turistas (el PNUD -2006- dio cifras de consumo de 400 l/día en Costa Rica, pero asumimos que el consumo es algo menor en esta zona), habría un consumo diario aproximado de 58,500 litros o de 21,330 m<sup>3</sup> por año. Varios inversionistas están presentando proyectos para realizar grandes urbanizaciones, por lo que el consumo de agua en la zona podría aumentar considerablemente en poco tiempo.

El agua utilizada en el abastecimiento procede de 34 pozos excavados artesanalmente, dos perforados con maquinaria y una pequeña represa para captar un manantial. Igualmente más del 50% de las quintas tienen bombas dentro de la Laguna para su extracción, circunstancia que viola la ley general del medio ambiente, Ley 217 de Nicaragua (ver foto 2).

El agua superficial de la Laguna de Apoyo se utiliza básicamente para riego de jardines, abastecimiento urbano (aunque no para consumo), como lavadero y como abrevadero de ganado (uso cada vez menor), mientras que el agua subterránea se utiliza básicamente como abastecimiento urbano (incluyendo consumo humano) y también para riego de jardines.

A pesar de que la ley (NTON 05 002-99, y el Decreto 33-95) establecen que ningún agua residual o aguas grises puede ser vertida a la laguna cratérica, prácticamente ninguna quinta tiene el sistema de tratamiento adecuado.

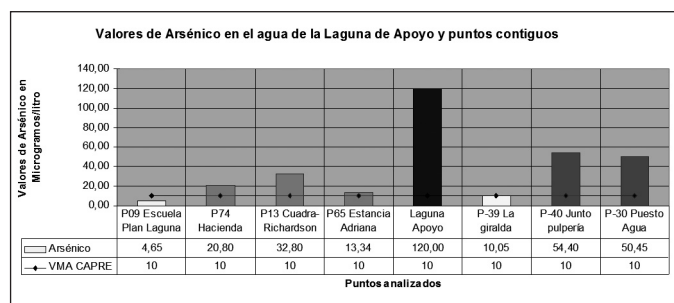


Figura 7. Valores de Arsénico, medidos en µg/l, en algunos puntos de agua de la zona de estudio. Los valores en blanco están por debajo de lo recomendado por CAPRE (1994) para el consumo humano, los demás, en grises, lo sobrepasan. El dato de la Laguna de Apoyo proviene del estudio de Pararello *et al.* (2008)  
 Figure 7. Arsenic values, measured in µg/l, for some water sites. Values in white show under CAPRE recommendation values for human drinking; while others, in greys, are over CAPRE (1994) value. Apoyo data come from Pararello et al. (2008)





Foto 3. Extracción ilegal de agua directamente de la Laguna de Apoyo  
*Photo 3. Illegal Direct water draw from Apoyo Lake*

La Laguna de Apoyo también tiene un gran uso recreativo debido a la transparencia de aguas. Desgraciadamente se han introducido en numerosas ocasiones lanchas a motor y motos acuáticas dentro del cuerpo de agua endorreico provocando una creciente contaminación por hidrocarburos (actividad regulada en la NTON 05 002-99).

### **Balance hídrico de la Laguna de Apoyo**

El balance hídrico, aplicado al cuerpo de agua de la Laguna de Apoyo, con un área actual de 20.92 km<sup>2</sup> pretende cuantificar las entradas y salidas del sistema e igualar la diferencia entre ambas a la variación en el almacenamiento para un período de tiempo determinado. El intervalo de tiempo utilizado ha sido de abril de 1986 a abril 2006, es decir, una serie de 20 años. Los resultados obtenidos en el balance hídrico de suelos así como un claro modelo conceptual del funcionamiento del sistema, son elementos claves para la realización del balance final.

Entradas-Salidas=Variación en el almacenamiento+Error

#### **Entradas**

- **Precipitación directa** sobre la lámina de agua libre de la laguna (20.92 km<sup>2</sup>) se estima en 29,71 hm<sup>3</sup>/año, a partir de los valores medios anuales de los observatorios de las localidades de Catarina, Masatepe, Masaya y Granada, otorgando doble peso a la estación de Catarina por ser la más próxima al área de estudio.

- **Precipitación sobre la vertiente interna de la caldera.** Al tratarse de una cuenca endorreica el total de precipitación útil alimentaría a la laguna. Así, la **escorrentía superficial** dentro la caldera (área de 15.40 km<sup>2</sup>) se ha estimado en unos 5,80 hm<sup>3</sup>/año y el valor promedio de la **infiltración efectiva** en unos 2.16 hm<sup>3</sup>/año, para este último caso se ha considerado únicamente el área de la caldera que recarga a la laguna, de 27.70 km<sup>2</sup> (y no el área de la caldera por donde se produce la salida hacia el Lago Nicaragua). Este último valor corresponde al aporte subterráneo hacia la Laguna de Apoyo del Acuífero coluvial y aluvial libre de la zona baja de la caldera.

El balance hídrico de suelos se ha calculado conjugando dos métodos: el método empírico de Thornwaite y el método del número de curva del Soil Conservation Service, (1975) revisada por US National Research Conservation Center (1986) para determinar qué porcentaje de la lluvia genera escorrentía.

Para el desarrollo de estos dos métodos se ha utilizado la hoja de cálculo EASYBALANCE 3.0 (Vázquez y Castro).

Para la elaboración del balance y hallar el agua disponible para ser recargada al acuífero se dispone de la siguiente información obtenida mediante diferentes ensayos de campo y laboratorio, ver tabla 2 (ensayos de infiltración mediante el método Porchet, Capacidad de Carga -CC- y Punto de Marchitez Permanente -PMP-, medidas en laboratorio)

- **Aportación subterránea desde el acuífero regional** estimada en 3.9 hm<sup>3</sup>/año, valor obtenido de considerar una transmisividad media 235.35 m<sup>2</sup>/día, una sección de flujo de 3.04 km de anchura, deducida del mapa piezométrico y un gradiente hidráulico de 0.015.

#### **Salidas**

- **Evaporación directa** desde lámina de agua de la Laguna (20.92 km<sup>2</sup>) estimada en 42.20 hm<sup>3</sup>/año. A partir de los datos de las estaciones meteorológicas de Catarina, Masatepe, Masaya y Granada.
- **Pérdidas subterráneas desde la Laguna de Apoyo hacia el Lago de Nicaragua** calculada en 5,4 hm<sup>3</sup>/año. El valor se ha obtenido considerando una transmisividad media de 1250 m<sup>2</sup>/día un gradiente hidráulico de 0,0044 y un ancho de sección (2.708 km) obtenidos del mapa de piezometría. El valor de la transmisividad procede de los datos aportados por INETER y ENACAL en los pozos cercanos a la laguna y a los obtenidos por Espinoza (1999) de algunos pozos de la ciudad de Granada.



CARACTERÍSTICAS DEL SUELO	Tierras escarpadas
Cap. Campo	0,187
Humedad Inicial	0,11
Espesor suelo (m)	0,5
P.M.P.	0,11
VALOR LAMINACIÓN (mm)	170
Reserva Útil (mm)	10,40
Reserva Inicial (mm)	0,00
Densidad aparente	1,35

Tabla 2. Características del suelo "Tierras Escarpadas" de la caldera de la Laguna de Apoyo utilizadas para el balance hídrico de suelos  
 Table 2. Apoyo caldera soil characteristics input of the soil water balance

Balace	Precipitación directa	Infiltración en caldera	Escorrentía superficial	Escorrentía subterránea	Total
<b>Entradas</b>	29.71	2.16	5.80	3.93	41.60
	<b>Evaporación directa</b>		<b>Extracciones</b>	<b>Escorrentía subterránea</b>	<b>Total</b>
<b>Salidas</b>	42.20		0.02	5.41	47.63
				Déficit	6.03
				Descenso niveles	6.28
				Error de cierre	-0.25

Tabla 3. Resumen componentes del balance hídrico (expresado en hm<sup>3</sup>/año)  
 Table 3. Hydrogeological Water budget components resume (in hm<sup>3</sup>/year)

- **Extracciones de agua de la laguna y bombeo de pozos dentro del cráter**, estimadas en 0,021 hm<sup>3</sup>/año, actualmente no son relevantes en el balance.

Un resumen del balance puede verse en la Tabla 3, que muestra un desequilibrio entre las entradas y salidas de agua al acuífero, circunstancia que se evidencia con el continuado descensos de nivel de agua de la laguna.

En la figura 8 la variación mensual acumulada del nivel de la Laguna de Apoyo (medido en volumen de agua) se relaciona con el balance Precipitación-Evaporación. Las variaciones estacionales en el volumen de agua en la laguna están claramente ligadas al balance precipitación-evaporación; si bien la tendencia general a descender el nivel (o el volumen) de agua en la laguna está atenuado por balance entre las entradas y salidas de agua procedentes del acuífero regional y local que no llega a compensar el déficit provocado por el factor climático.

El nivel de la laguna seguirá bajando hasta que los aportes de agua subterránea compensen el déficit

precipitación-evaporación (que irá disminuyendo conforme disminuya la superficie de lámina libre de la laguna) y las salidas subterráneas hacia el Lago Nicaragua (cuanto más bajo esté el nivel de la laguna menor será el gradiente de salida subterránea hacia el Este y por tanto menor el caudal).

### Conclusiones

La laguna endorreica de Apoyo, situada en el interior de una caldera en la cadena volcánica nicaragüense, registra un continuado descenso de su nivel de agua, estimado en más de 15 metros desde 1950. Con una extensión de aproximadamente 6.6 km de diámetro y 176 metros de profundidad (según datos batimétricos de INETER y CIRA, 2006) la laguna se sitúa a 68 m s.n.m., entre la Laguna de Masaya (119 m s.n.m.) y el Lago de Nicaragua (31 m s.n.m.).

La diferencia entre la precipitación que recibe la laguna, unos 1420 mm/año, y la evaporación, unos 2017 mm/año, provocaría por si solo un descenso

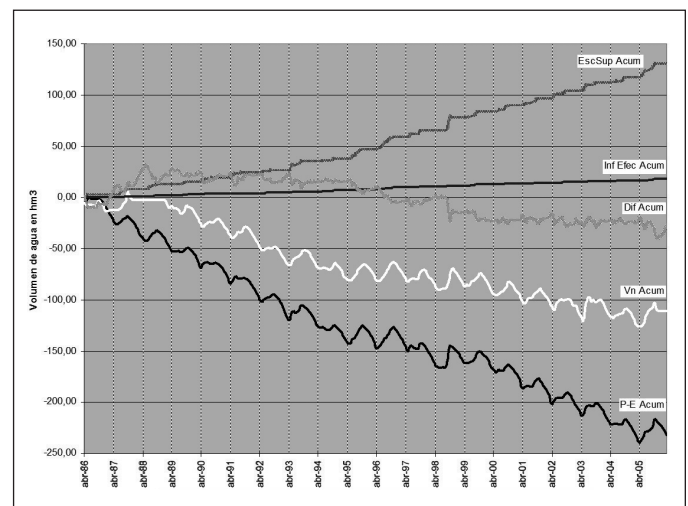


Figura 8. Variación acumulada del nivel de la Laguna de Apoyo (en hm<sup>3</sup>) en relación a las componentes del balance hídrico de cuerpo de agua entre 1986 y 2006. P-E = Precipitación-Evaporación; Vn = Variación del Volumen de de agua en la laguna de Apoyo EscSup= Escorrentía Superficial en la caldera; Inf Efec= Recarga el acuífero libre por la Infiltración Efectiva dentro de la caldera y Dif= La diferencia entre las curvas marca el balance entre entradas subterráneas y las salidas subterráneas  
 Figure 8. Apoyo Lake water level accumulated variations (in hm<sup>3</sup>) in relation with the components of the Lake water balance between 1986 and 2006. P-E = Rainfall-Evaporation; Vn = Apoyo Water level variation; EscSup= Runoff within the caldera; Inf Efec= Recharge of the free aquifer and the Lake by the infiltration in the caldera; D = Difference between lake inlets (surface runoff and underground water recharge) and outlets (underground water outlet)

anual medio de más de 50 cm., lo que pone en evidencia que la evolución de su nivel del agua depende básicamente del factor climático, que se ve atenuado parcialmente por el balance de entradas y salidas de agua subterránea a la laguna.

La piezometría realizada ha corroborado la existencia de una zona de escasa ganancia de agua subterránea en la parte occidental de la laguna, estimada en 3.9 hm<sup>3</sup>/año, y una zona de pérdidas en su parte oriental, estimada en 5.4 hm<sup>3</sup>/año, todo ello en relación con el acuífero volcánico regional denominado de Las Sierras, que tiene su nivel de base en el Lago de Nicaragua, al este de la Laguna.

Esta zona de salida de agua subterránea desde la laguna de Apoyo al Lago de Nicaragua se evidencia también por la hidroquímica, en donde se registra una mezcla de agua entre las aguas salobres de Apoyo y las aguas dulces del acuífero regional. Las curvas de isoconductividad evidencian la existencia de una zona preferente de circulación de las aguas que seguramente esté relacionada con una falla.

El balance hídrico realizado ha permitido estimar el déficit anual de agua en la laguna en unos 6 hm<sup>3</sup>/año, lo que supone una situación de desequilibrio natural, responsable tanto del continuado descenso del nivel de agua en la laguna como de su elevado contenido en sales. El hidrotermalismo registrado también influye en su salobridad; reportándose igualmente altas concentraciones de Arsénico en la Laguna de Apoyo (CIRA, 2005). Debido principalmente a la influencia del agua de la Laguna en varios pozos, algunos de los cuales son utilizados para abastecer a la población, éstos no cumplen con las normas establecidas para el consumo humano (normas CAPRE -1994- y WHO -2004-).

Se han realizado un conjunto de propuestas para la adecuada gestión de esta laguna, enfatizando las propuestas de regulación del uso de agua y la salud. En ese sentido, se destaca la necesidad del control de la extracción de agua subterránea dentro del cráter, y la prohibición de la captación de agua directamente de la laguna. Se propone que el abastecimiento de agua potable a la comunidad del Plan de la Laguna se realice desde una zona externa al cráter.

Se debería prohibir utilizar el agua de la laguna para cualquier uso que no sea el recreativo, dado el peligro que supone el riego, abastecimiento y otras prácticas para la salud y el ecosistema.

Es necesario un seguimiento continuado de niveles de agua tanto en la laguna como en los pozos y sondeos próximos, así como obtener datos meteorológicos más directos y continuados para poder avanzar en el conocimiento del volumen de entradas y salidas de agua a la laguna.

El correcto abastecimiento en agua potable, sobre todo de comunidades aledañas al cráter debe ser una prioridad para elevar las condiciones de vida y para evitar impactos ambientales en la Reserva Natural Laguna de Apoyo.

Se considera necesario ampliar la información sobre el contenido en arsénico de las aguas subterráneas en la zona de influenciada de la laguna y en la zona situada al este de la misma, en especial en los pozos para abastecimiento de la municipalidad de Granada.

Finalmente este estudio va a servir de base para establecer una zonificación territorial dentro del Programa de Cooperación al Desarrollo PIXOA (Programa Integral por el Ordenamiento Ambiental de Apoyo).

### Agradecimientos

Este trabajo no se podría haber realizado sin la beca concedida sobre Cooperación al Desarrollo de la Federación Aragonesa de Solidaridad, financiada por el Gobierno de Aragón (España); la ayuda prestada por la Asociación de Municipios Integrados por la Cuenca y Territorios de la Laguna de Apoyo de Nicaragua (AMICTLAN), Geólogos del Mundo y la Agencia Catalana de Cooperación al Desarrollo (ACCD), y el apoyo del Centro de Investigación de Recursos Acuáticos de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua-Managua (CIRA-UNAN-Managua) y del Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER). Igualmente se agradece a Pedro Lucha y María de Marco sus comentarios.

### Referencias

- CAPRE, 1994. *Normas de Calidad del Agua para Consumo Humano*. Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centro América, Panamá y República Dominicana. San José, Costa Rica.
- Catastro e Inventario de Recursos Naturales. 1972. Levantamiento de suelos de la región del pacífico de Nicaragua. Volumen I, II, III. Managua.
- CIRA-UNAN-Managua 2005. Informe sobre el Lago de Apoyo: Limnología, Calidad de Agua, Hidrogeología e Hidrogeoquímica.
- CIRA-UNAN-Managua. 2007. *Segundo Informe sobre el Lago de Apoyo*. Centro de Investigación de Recursos Acuáticos, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua, Nicaragua. En prensa.
- Disposiciones para el control contaminación provenientes de aguas residuales, domésticas, industriales y agropecuarias. 1995. Decreto 33-95. *La Gaceta Oficial n° 118, 26-06-1995*.

- Espinoza, M. 1999. *Estudio Hidrogeológico del acuífero de Granada*. Inédito.
- Krásný J. 1995. *Hidrogeología de la Zona Pacífica de Nicaragua*, Servicio Geológico Checo - INETER. Informe interno.
- INETER-CIRA-UNAN-Managua. 2006. *Batimetría de la Laguna de Apoyo*. Inédito.
- Ley General del Medio Ambiente de Nicaragua. 1996. Ley 217. *La Gaceta Oficial*, n° 105, 6-6-1996.
- Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON) n° 05 002-99, Control Ambiental en Lagunas Cratélicas. 1999. *La Gaceta Oficial* n° 153, 15-08-2000
- Parello, F. Aiuppa, A. Calderon, H. Calvi, F. Cellura, D. Martinez, V. Militello, M., Vammen, K. Vinti. D. 2008. Geochemical characterization of shallow and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Applied Geochemistry, Volume 23, Issue 4, Pages 914-931*
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2006. *Informe Anual 2006: Un aliando confiable para el desarrollo*.
- PROYECTO CEE-ALA. 1992. Estudio de Reconocimiento Hidrogeológico de la Meseta de San Marcos - Carazo. Inédito
- Sánchez, J.A.; Pérez, G. ;Coloma, P.; y Martínez, F.J. 1998. Combined effects of groundwater and aeolian processes in the formation of the northernmost closed saline depressions of Europa, in Aragon (north-east Spain) *Hydrological Processes*, 12, 813-820
- Soil Conservation Service, 1975. *Urban hydrology for small watersheds. Technical release*. No.55 U.S. Depart of Agriculture. National Research Conservation Center)
- Sussman, D. 1982. *The Geology of Apoyo Caldera, Nicaragua*, Dartmouth College, Hanover, New Hampshire. Inédito
- World Health Organization (WHO). 2004. *Guidelines for Drinking-water Quality. Volume 1 Recommendations*. 3<sup>era</sup>. Edición. Geneva.

Recibido: enero 2008

Aceptado: abril 2008