

MODELO DE SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

ANDRÉS RODRÍGUEZ^{1*}, MARIANA R. PAGOT¹, GERARDO D. HILLMAN¹,
 CECILIA E. POZZI¹, GONZALO E. PLENCOVICH¹, GABRIEL CAAMAÑO NELLI²,
 CLAUDIA E. ORONÁ¹, ERIO CURTO³, ENRIQUE H. BUCHER³

¹ Laboratorio de Hidráulica, Universidad Nacional de Córdoba. Avenida Filloy s/n, Ciudad Universitaria, 5016 Córdoba. * E-mail: arodrig@isrh.unc.edu.ar

² Centro de la Región Semiárida, Instituto Nacional del Agua. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. Medrano 272, 5152 Villa Carlos Paz, Córdoba.

³ Centro de Zoología Aplicada. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba. C.C. 122, 5000 Córdoba.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos numéricos son una representación matemática de los procesos hidrológicos y constituyen una herramienta muy importante para evaluar diferentes escenarios climáticos o alternativas de manejo. Esto es crucial en los humedales, cuya existencia y evolución dependen de tales procesos. En el caso de la Reserva Ramsar de Mar Chiquita, es fundamental disponer de un modelo robusto y confiable de la dinámica del agua para responder una pregunta básica de manejo: ¿qué cantidad de agua deben aportar los ríos tributarios para mantener la integridad ecológica del sistema?

Esta cuestión incluye dos aspectos igualmente críticos: a) ¿qué cantidad de agua se necesita para mantener un nivel determinado de la laguna? y b) ¿qué requisitos de cantidad y de variación del caudal son necesarios para generar pulsos de inundación en los Ba-

ñados del río Dulce, esenciales para mantener su funcionalidad ecológica?

Aunque el concepto de balance hídrico es simple, elaborar modelos matemáticos que lo reflejen no resulta fácil, sobre todo en un sistema hidrológico del tamaño y de la complejidad de Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce. Es particularmente crítica la falta de series completas de datos meteorológicos e hidrológicos, lo cual obliga a realizar extrapolaciones que agregan un factor de incertidumbre a los cálculos. En este sentido, es lamentable que la red de medición en el sistema de Mar Chiquita se haya ido deteriorando con el tiempo, por lo que su recuperación y ampliación resultan muy importantes. En la actualidad se procura recuperar esta red mediante la acción concertada del Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, de la Dirección Provincial

de Agua y Saneamiento (DIPAS) y de la Agencia Córdoba Ambiente de la Provincia de Córdoba.

En este análisis se presentan dos modelos hidrológicos desarrollados con fines diferentes. El primero de ellos es el destinado a evaluar el balance de agua dentro del sistema (Lambda 2). El segundo tiene por objeto determinar la dinámica de las inundaciones de los bañados generadas por el río Dulce (Bañados).

El modelo hidrológico Lambda 2, que aquí se describe, constituye un resumen de los avances logrados por los investigadores del LH. Mayores detalles pueden encontrarse en Hillman (1999), Pagot (1999), Hillman *et al.* (2000), Rodríguez *et al.* (2000a), Rodríguez *et al.* (2000b), Hillman (2003), Pagot (2003) y Plencovich *et al.* (2005). El modelo Bañados resume los resultados presentados por Pagot (2003).

2. MODELOS MATEMÁTICOS DE SIMULACIÓN

Un modelo de simulación es la representación matemática de la dinámica de un sistema real. Entendemos por sistema un conjunto de elementos o componentes relacionados entre sí por diferentes procesos. Hay modelos de muy variada naturaleza, que incluyen desde cambios climáticos hasta procesos fisiológicos en los seres vivos, para citar algunos.

En hidrología, los modelos de simulación son ampliamente utilizados (Viessman & Lewis 2003). Un ejemplo de un sistema hidrológico simple lo constituye un lago. Los componentes del sistema son el lago, los ríos tributarios o afluentes, los ríos que abandonan el lago o efluentes, y la atmósfera. Entre estos componentes se dan los siguientes procesos: a) entrada de agua al lago por los ríos tributarios, b) salida de agua por los ríos efluentes, c) entrada de agua por lluvia y d) salida de agua por evaporación.

Todas estas interacciones pueden ser representadas matemáticamente mediante fórmulas que expresan, dentro de un período de tiempo determinado, la can-

tidad de agua que entra al lago, la cantidad que sale y el volumen de agua que hay en él. Estas relaciones quedan, por lo tanto, formalizadas en ecuaciones.

Las ecuaciones representan la dinámica del sistema y tienen gran importancia tanto para su conocimiento como para la definición de su manejo. En el primer caso nos permiten, entre otras cosas, determinar el valor de un parámetro desconocido, despejando dicha incógnita de nuestras ecuaciones. Por ejemplo, si el volumen de agua del lago se mantiene constante, entonces sabemos que la cantidad de agua que entró y la que salió es la misma. Si además conocemos cuál fue el aporte de los ríos y de la lluvia, entonces podemos deducir cuál fue la pérdida por evaporación, aunque dicha información no esté disponible. En el caso de Mar Chiquita, no hay ríos efluentes (es un sistema endorreico), por lo que toda la salida del agua del sistema es a través de la evaporación (Fig. 1).

La segunda gran aplicación práctica de los modelos matemáticos es la técnica conocida como análisis de simulación. Es decir, conociendo la ecuación que relaciona los componentes del sistema, podemos plantearnos preguntas del tipo “¿qué pasaría si...?” Por ejemplo, en el caso del lago mencionado, podríamos preguntarnos: ¿qué pasaría si, debido al calentamiento global, la evaporación se duplicara? ¿En cuánto disminuiría el volumen –y, por lo tanto, el nivel– de nuestro lago? O también: ¿en cuánto aumentaría el agua en el lago si se produjera una crecida excepcional de un valor dado en los ríos tributarios? ¿Qué nivel de inundación tendríamos en sus riberas?

El modelo que hemos estado analizado es conocido como de tipo “balance de caja” porque desarrolla ecuaciones que, en esencia, miden el balance entre los llamados “depósitos” o “bancos” del sistema (en este caso, el agua acumulada en el lago) así como las “transferencias” dentro del sistema (cantidad de agua que entra y sale del depósito). Existen otros tipos de modelos más sofisticados, basados en análisis complejos que requieren computadoras muy poderosas.

Por ejemplo, una de las complicaciones más utilizadas en hidrología es incorporar al modelo la influencia del azar en los procesos naturales. Es decir, en lugar de considerar un valor promedio de la cantidad de lluvia que cae sobre nuestro lago, se pueden tener en cuenta las variaciones aleatorias (por azar) naturales que se dan entre distintos años. Al hacerlo, nosotros no podemos predecir con exactitud, sino dar el valor más probable de nuestra apreciación dentro de un margen de error establecido. Cuando los modelos no consideran la variación aleatoria, se los denomina determinísticos. Cuando las tienen en cuenta, se los llama estocásticos.

Dos aspectos muy importantes en la elaboración de los modelos matemáticos de simulación son la validación y la calibración. Por validación se entiende la comparación de los valores que predice el modelo con datos diferentes de los que se usaron para construirlo: por ejemplo, el valor del volumen de agua en el lago predicho por el modelo para el caso en que el caudal de los ríos tributarios se duplique, comparado con los valores reales que se dan en la naturaleza cuando tal situación ocurre. Si la predicción y la realidad muestran una coincidencia aceptable, el modelo queda validado. Si la predicción es muy distinta a la realidad, entonces el modelo no queda validado y debemos reformularlo.

Un grado menor de ajuste es el de la calibración, por el cual se realizan cambios –relativamente pequeños– en el modelo, para lograr que sus predicciones sean lo más cercanas a la realidad, también mediante la comparación de los valores predichos con los reales. Tanto la validación como la calibración requieren una enorme cantidad de datos, lo que es difícil en el caso de Mar Chiquita, ya que en muchos casos se carece de una red de estaciones de medición adecuada.

Los modelos hidrológicos constituyen, por lo tanto, herramientas dinámicas. Permiten su permanente actualización, perfeccionamiento y ajuste a medida que avanza la investigación, la adquisición de nuevos

datos y la verificación de sus predicciones (Viessman & Lewis 2003).

3. MODELO LAMBDA 2

Este modelo consiste básicamente en un balance de “caja” entre el agua que entra y el agua que sale del sistema por unidad de tiempo (Fig. 1), desarrollado a partir de datos climáticos e hidrológicos disponibles para el período estudiado (1967–1997). Este enfoque es el que se recomienda como paso inicial en el análisis de cualquier cuenca o sistema hidrográfico (Viessman & Lewis 2003).

La presente versión del modelo Lambda 2 (2004), es determinística; es decir, describe las interacciones de los componentes y las fases del ciclo hidrológico en términos de relaciones matemáticas fijas, sin incluir las posibles variaciones al azar de los parámetros (Fig. 1). Se espera que en futuras versiones puedan incluirse los componentes estocásticos.

En este estado de su desarrollo, el modelo no contempla los procesos de infiltración y flujo subterráneo, debido a la falta de datos confiables. En principio, se asume que las variables correspondientes no tendrían un efecto significativo, a juzgar por el informe realizado por expertos alemanes (Convenio Argentino-Alemán de Agua Subterránea 1975) y el análisis isotópico del agua de la laguna (Dapeña *et al.* 1997).

3.1. ESTRUCTURA DEL MODELO

El modelo Lambda 2 considera los siguientes componentes (Fig. 1):

- Entradas:**
- 1) Aporte de los ríos tributarios principales (ríos Dulce, Primero y Segundo).
 - 2) Precipitación pluvial sobre la laguna, los bañados y la región del río Dulce Medio.

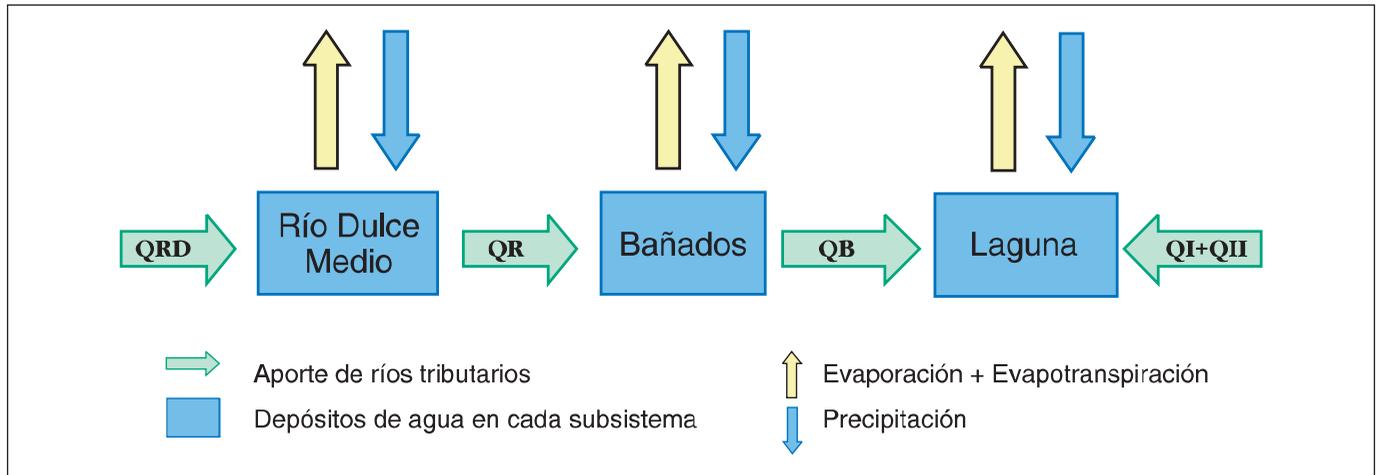


Figura 1. Diagrama esquemático de los principales componentes del sistema modelado. QRD: aporte del río Dulce; QR: aporte del río Dulce en el ingreso a los Bañados; QB: aporte de los Bañados del río Dulce; QI+QII: aportes de los ríos Primero y Segundo.

Salidas: Evaporación y evapotranspiración en la laguna y los bañados. Por evaporación se entiende el agua evaporada a partir de la superficie de cuerpos líquidos como la laguna. Se denomina evapotranspiración a la suma de evaporación más la transpiración de las plantas en áreas cubiertas por vegetación y agua, como en los bañados.

Balance: Volumen de agua en la laguna Mar Chiquita, el cual se refleja en el nivel (cota) del lago y en el grado de salinidad de sus aguas.

3.2. SUBSISTEMAS

El modelo Lambda 2 está estructurado en tres subsistemas, los que en este caso se asocian a tres subregiones geográficas: Río Dulce Medio, Bañados y Laguna Mar Chiquita (Figs. 1 y 2). De esta forma se facilita el análisis, dada la complejidad espacial, topográfica y dinámica del sistema. Cada uno de estos subsistemas fue modelado dentro del sistema global en forma secuencial, calculando el balance de los ingresos y egresos por unidad de tiempo.

Así, es posible determinar los volúmenes de agua almacenados en cada subsistema durante el período usado como unidad temporal de análisis (1967-1997) (Fig. 1).

Desde el punto de vista hidrológico, cada subsistema fue definido de la siguiente forma:

Dulce Medio: desde el dique Los Quiroga hasta la localidad de Los Telares. El caudal que abandona esta subregión (QR) a la altura de Los Telares se define como la suma del caudal erogado en el dique Los Quiroga y de la precipitación neta –precipitación (PR) menos evapotranspiración (ER)– que se produce en la región.

Bañados del río Dulce: tramo del río Dulce entre Los Telares y Paso de la Cina. El balance de volumen (ΔB) en el subsistema es función del caudal proveniente del sistema Dulce Medio (QR) más el balance entre la precipitación (PB) y evapotranspiración (EB) en la misma subregión.

Laguna Mar Chiquita: el volumen (y, por ende, el nivel y salinidad de la laguna asociada) dependen

del balance entre: a) el aporte desde el subsistema Bañados del río Dulce (QB), b) el aporte de los ríos Primero y Segundo (QI+QII), c) la precipitación sobre la laguna (PL) y d) la pérdida de agua por evaporación desde la laguna (EL). Tanto la cantidad de agua precipitada como la evaporada tuvo que ser corregida en función de los cambios del área y de la salinidad de la laguna, resultantes de las variaciones en su nivel (mientras más alto el nivel, el área ocupada por la laguna es mayor y la concentración de salinidad menor). Expresado en fórmulas, el balance hídrico de este subsistema se representa mediante la siguiente ecuación de conservación de masa líquida:

$$\Delta V = (QB + QI + QII) * \Delta T + AL*(PL-EL)*\Delta T \quad [1]$$

donde:

ΔV = variación de volumen de la laguna, QB = caudal aportado por los bañados y el río Dulce, QI = caudal aportado por el río Primero, QII = caudal aportado por el río Segundo, PL = precipitación media sobre la laguna, EL = evaporación media de la laguna, AL = área de la laguna y ΔT = intervalo de tiempo analizado (según el caso simulado, anual, semestral o trimestral).

3.3. DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE BASE

El modelo Lambda 2 fue desarrollado a partir del estudio de las relaciones entre los parámetros que lo componen para el período 1967-1997: caudales del río Dulce en Los Quiroga, caudales aportados por los ríos Primero y Segundo, precipitación pluvial, evaporación y evapotranspiración en cada subregión. Dado que la información disponible en algunos casos resultó incompleta, fue necesario estimar algunas series de tiempo utilizando inferencias estadísticas. En el Apéndice 1 se detallan las fuentes de información y los criterios y las metodologías utilizados para su procesamiento.

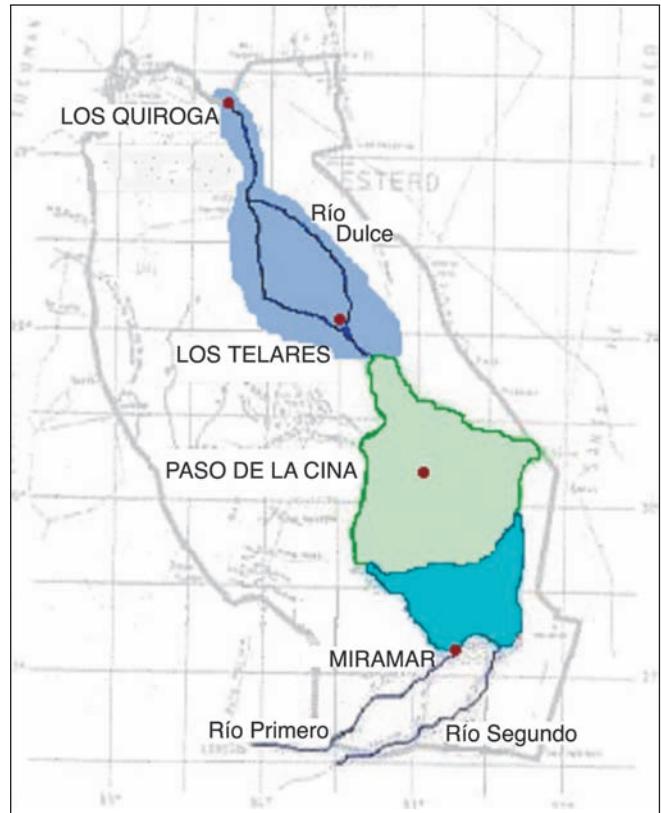


Figura 2. Subregiones que integran el modelo Lambda 2: 1) Río Dulce Medio (azul), 2) Bañados del río Dulce (verde) y 3) Laguna Mar Chiquita (celeste).

3.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

La validación de este modelo está en desarrollo (Plencovich *et al.* 2005; Pozzi *et al.* 2005). Con el objeto de obtener información complementaria que permita mejorar los resultados obtenidos hasta el presente, se amplió la red de monitoreo, que quedó conformada en la actualidad por aproximadamente 20 estaciones pluviométricas y tres instrumentos automáticos para registrar variaciones de nivel: dos instalados en el río Dulce (uno a la altura de Paso de la Cina y otro en Paso de Oscares) y el tercero en la laguna Mar Chiquita (frente a Miramar). Los parámetros temperatura, humedad, velocidad y dirección de viento son medidos en Miramar, La Rinconada y Paso de Oscares, por medio de tres estaciones meteorológicas automáticas. En Miramar, La Rinconada y Sumampa se mide la

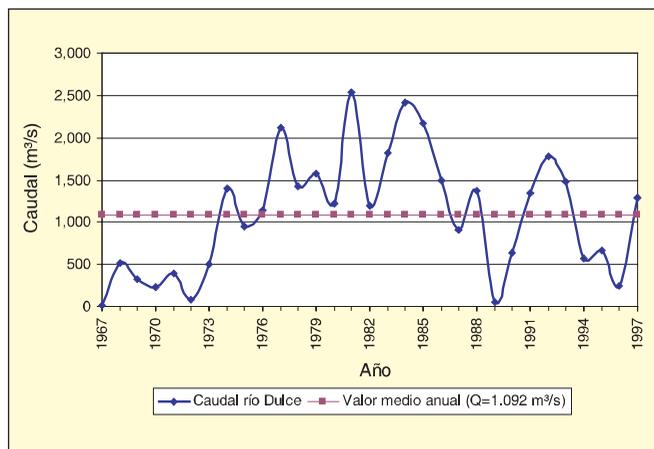


Figura 3. Caudales anuales y valor medio anual del río Dulce, erogados en el dique Los Quiroga (Santiago del Estero) en el período 1967-1997.

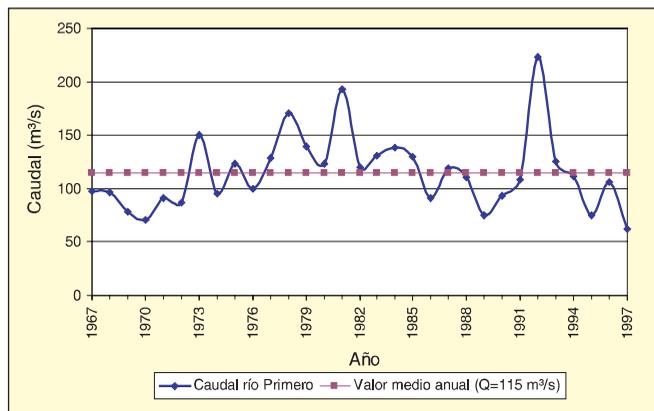


Figura 4. Caudales anuales y valor medio anual del río Primero en el período 1967-1997.

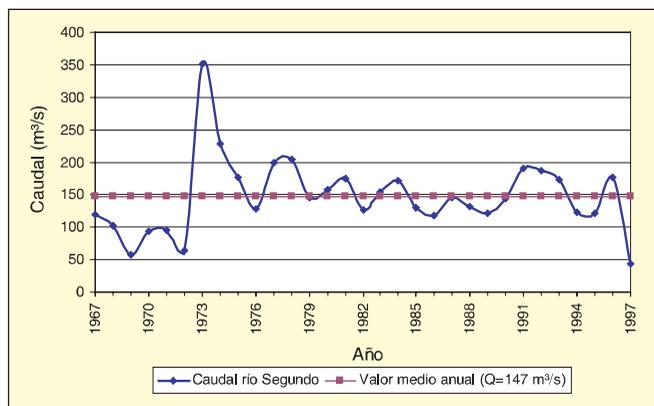


Figura 5. Caudales anuales y valor medio anual del río Segundo en el período 1967-1997.

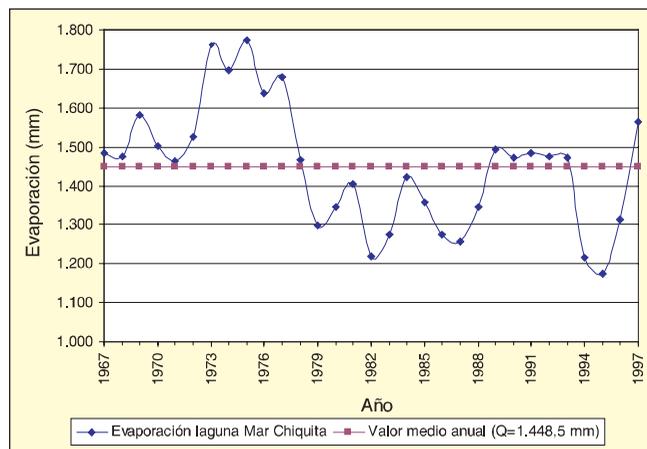


Figura 6. Evaporación anual y promedio del período 1967-1997 en la laguna Mar Chiquita.

evaporación de agua dulce con tanques clase A; en Miramar se mide además la evaporación de agua salada en tanques similares.

4. BALANCE HÍDRICO DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

4.1. INFORMACIÓN DE BASE

4.1.1. APOORTE DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS

El aporte del río Dulce al sistema modelado se calculó con los caudales erogados por el embalse Los Quiroga; los valores anuales se indican en la Figura 3. El valor medio anual para el período 1967-1997 resultó en $1.092 \text{ m}^3/\text{s}$.

El aporte conjunto de los ríos Primero y Segundo alcanzó un valor medio anual de $262 \text{ m}^3/\text{s}$ durante el período 1967-1997. Las variaciones anuales de cada uno de ellos se muestran en las Figuras 4 y 5. Se puede apreciar que ambos aportes varían en forma casi sincrónica.

4.1.2. EVAPORACIÓN

La Figura 6 muestra la serie de evaporación estimada sobre la laguna, corregida por salinidad, durante el período 1967-1997. El valor medio anual resultó $1.448,5 \text{ mm}$.

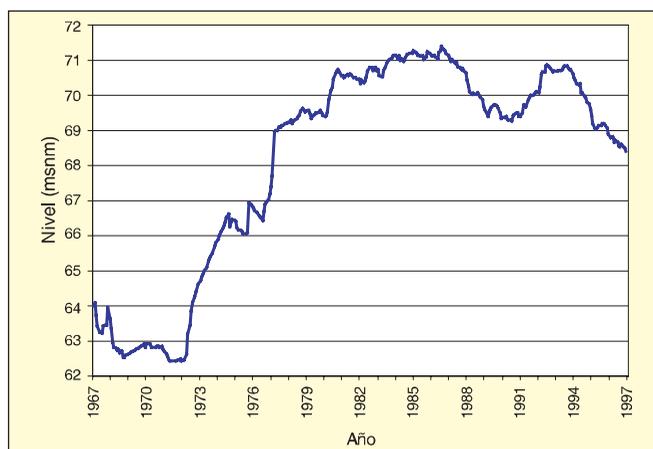


Figura 7. Niveles en la laguna Mar Chiquita para el período 1967-1997. Los valores corresponden al mes de noviembre de cada año.

4.1.3. NIVELES EN LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Los datos de niveles de la Laguna Mar Chiquita para el periodo 1967-1997 se obtuvieron compatibilizando las distintas fuentes de información (ver Apéndice 1). La serie resultante se presenta en la Figura 7.

4.1.4. RELACIÓN ENTRE VOLUMEN, SALINIDAD Y COTA

La batimetría de la laguna se indica en la Figura 8. El relieve, en general, es muy plano, con un suave declive, y alcanza las profundidades máximas en la porción centro-sur, al norte de la localidad de Miramar. Durante el período de estudio, los niveles mínimo y máximo alcanzados fueron: 64,1 msnm, en 1972 y 71,4 msnm, en 1987, respectivamente, lo que implica 7,30 m de diferencia.

La información disponible sobre batimetría, volumen y salinidad permitió estimar la relación entre volumen y salinidad de la laguna (Fig. 9). Por ejemplo, para volúmenes de la laguna cercanos a 5 km³, la salinidad alcanza los 75 g/L y en rangos mayores, con volumen cercano a 24 km³, la salinidad disminuye a 29 g/L.

4.1.5. RELACIÓN ENTRE EL APORTE DEL RÍO DULCE Y EL VOLUMEN DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

Los caudales promedio del río Dulce entrantes en el subsistema Laguna Mar Chiquita fueron calculados mediante la resolución del balance hídrico propuesta

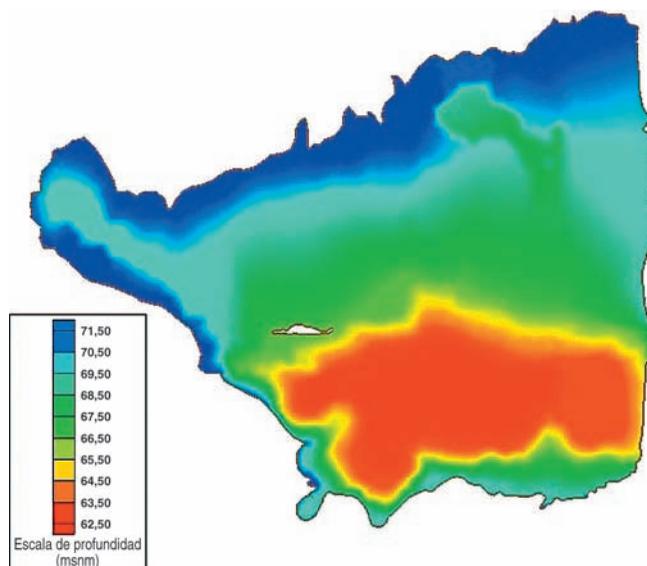


Figura 8. Batimetría de la laguna Mar Chiquita entre los niveles de 61 y 72 msnm (Pozzi *et al.* 2005). El color rojo corresponde a las áreas más profundas y el azul, a las menos profundas. La escala indica cotas batimétricas en msnm.

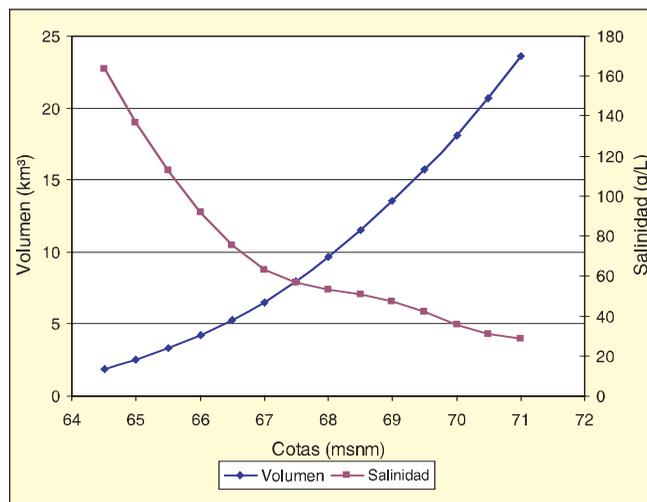


Figura 9. Relación entre las variaciones de volumen y salinidad con respecto al nivel de la laguna Mar Chiquita.

en la ecuación [1] durante el período de estudio. El valor del caudal del río Dulce requerido para mantener determinado nivel de la laguna se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$QB = (\Delta V * \Delta T + AL * (PL-EL)) - QI - QII \quad [2]$$

donde: QB: caudal del río Dulce a determinar en el ingreso a la laguna (incógnita), ΔV : variación del volumen de la laguna en el tiempo asociado, AL: área de la laguna, T: tiempo, PL: precipitación media sobre la laguna, EL: evaporación media de la laguna, QI: caudal del río Primero y QII: caudal del río Segundo.

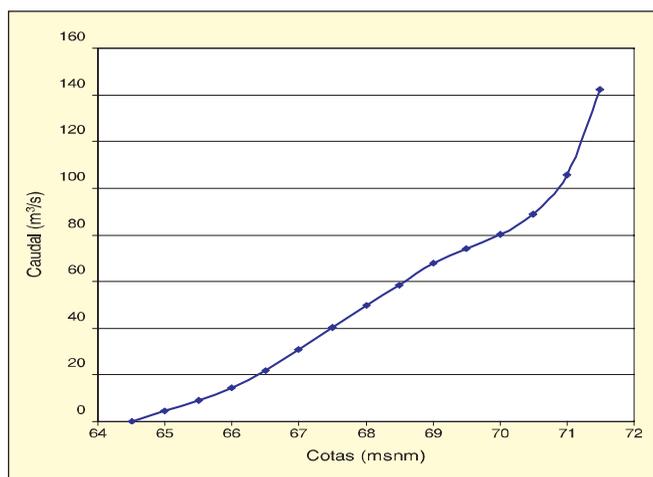


Figura 10. Caudales medios mensuales del río Dulce requeridos para mantener distintos niveles (cotas) de la laguna Mar Chiquita.

Tabla 1. Balance hídrico anual para distintos niveles de la laguna Mar Chiquita.

Variables	Nivel		
	Alto	Medio	Bajo
Nivel (H) (msnm)	70	68	66
Área (A) (km²)	5.540	3.606	1.889
Salinidad (S) (g/L)	40	69	120
Evaporación (E) (mm/año)	1.412,5	1.394	1.355
Precipitación (P) (mm/año)	777	603	563
Caudal tributarios QI+II+RD (hm³/año)	36	22	11

A partir de esta ecuación, es posible calcular el caudal del río Dulce necesario para mantener un nivel determinado de la laguna. Asimismo, de ese cálculo puede derivarse el volumen de la laguna esperable para distintos niveles, de acuerdo con la relación mencionada en la sección anterior (4.1.4). Para ello se usó la relación nivel-volumen, determinada mediante funciones teóricas calibradas (Hillman 2003). Los valores estimados para distintos niveles de la laguna se indican en la Figura 10. En la Tabla 1 se presenta el balance hídrico anual estimado para tres niveles de la laguna (definidos como: Alto, Medio y Bajo). Se observa que siempre la evaporación media es mayor que la precipitación media, lo que determina un déficit hídrico. En otras palabras, el nivel de la laguna es mantenido fundamentalmente por los aportes de sus ríos tributarios (Primero, Segundo y Dulce).

4.2. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

El modelo Lambda 2 puede utilizarse para analizar posibles situaciones derivadas de intervenciones humanas. Una de las amenazas más críticas a considerar es la posibilidad de que se produzca una reducción significativa del aporte del río Dulce, en función de una extracción de agua cada vez mayor en sus cursos medio y superior destinada a consumo humano, agrícola e industrial. Esta extracción puede afectar el sistema de la Reserva de Mar Chiquita de dos formas: en primer término, provocando un descenso de las aguas de la laguna y, en segundo término, interrumpiendo los pulsos de inundación anual esenciales para la dinámica de los Bañados del río Dulce (ver capítulo 8).

En este sentido, el Convenio de Participación de las aguas del río Dulce entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y Córdoba, en vigencia desde 1977, autoriza a las dos primeras a retener caudales significativos (Apéndice 2). Esto implica que si estas provincias derivaran todo el caudal acordado, Tucumán tendría derecho a retener hasta un 32% del caudal y Santiago del Estero debería dejar escurrir un 22% de lo recibido (menos pérdidas naturales).

Aunque el acuerdo no es claro y da lugar a distintas interpretaciones, puede estimarse, en principio, que el río Dulce entraría en Córdoba con un caudal reducido al 15% del original en Tucumán. Por ejemplo, si el caudal de entrada a Tucumán es 100 (unidad arbitraria), luego Tucumán libera 68 que recibe Santiago del Estero. Santiago del Estero liberaría entonces 15 (es decir el 22% de 68). En consecuencia, Córdoba recibe solo 15 unidades de las 100 originales (15%).

En consideración a lo que antecede, el manejo de la cuenca del río Dulce, en función de la preservación de la dinámica ecológica de la Reserva de Mar Chiquita, plantea al menos las siguientes preguntas básicas:

- 1) ¿Cuál es el efecto esperable de distintos niveles de extracción de caudales del río Dulce, previo a su entrada en la Reserva?
- 2) ¿Cuáles son los caudales del río Dulce necesarios para mantener un nivel determinado de la laguna Mar Chiquita?
- 3) ¿Cuáles son los requerimientos del aporte del río Dulce (cantidad y distribución temporal) para mantener los pulsos anuales de inundación en los Bañados del río Dulce?

En función de estos interrogantes, se realizaron simulaciones a partir del modelo hidrológico Lambda 2, que se describen a continuación.

4.3. ENFOQUE METODOLÓGICO

La simulación se realizó para períodos semestrales entre los años 1967 y 1997, considerando dos niveles constantes de extracción de caudal en el río Dulce de 10 y 20 m³/s. Al seleccionar estos valores, se simuló la posibilidad de derivaciones o trasvasamiento de cuenca, situación que se contempló en el proyecto llamado “Canal Federal” durante los años 1997-1998 (Universidad Nacional de Córdoba 1998). Estos caudales de trasvase significan entre el 10 y el 20% del

módulo histórico del río en el límite entre Tucumán y Santiago del Estero.

La simulación contempló los siguientes pasos:

- 1) Se estimaron los caudales ingresantes en Mar Chiquita a través del río Dulce, requeridos para mantener los volúmenes de la laguna observados durante el período de estudio, despejándolos de la ecuación [1] (ver sección 3.2) y manteniendo todas las otras variables del modelo con los mismos valores históricos del período, usados en la elaboración del modelo (nivel de la laguna, precipitación, evaporación y aportes de los ríos Primero y Segundo). De esa forma, al alimentar el modelo con la serie calculada para el río Dulce, se obtiene una curva de niveles de la laguna que es coincidente con los valores reales del período analizado.
- 2) Para simular el efecto de reducciones del caudal del río Dulce por extracción aguas arriba, se elaboraron, a partir de esta serie estimada, otras dos series. En la primera, se redujo el caudal mensual (simulando extracciones) en 10 m³/s ($Q_{ext} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$). En la segunda, la reducción fue de 20 m³/s ($Q_{ext} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$).
- 3) El paso siguiente consistió en alimentar el modelo Lambda 2 con los datos de estas dos series, con el fin de estimar el efecto que estas extracciones habrían tenido, de haberse implementado, sobre el nivel y el volumen de Mar Chiquita durante el período de análisis (Fig. 11).
- 4) Para establecer los caudales del río Dulce necesarios para mantener determinados niveles de la laguna, se utilizó la ecuación [2] (ver sección 4.1.5), dejando constantes los demás parámetros (Tabla 2). Se dio especial importancia a los niveles de cota de 68 m y 66 m, correspondientes respectivamente a niveles de salinidad de 50 g/L (umbral entre condiciones meso e hipersalinas) y 100 g/L (umbral entre las condiciones hipersalina e hipersalina extrema).

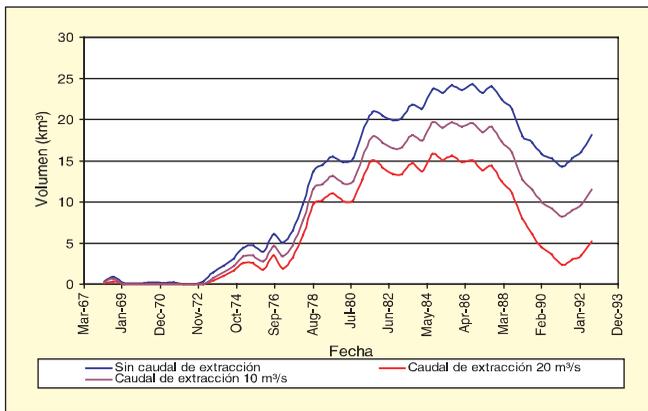


Figura 11. Simulación (mediante el modelo Lambda 2) del efecto que habrían tenido extracciones del río Dulce de caudales de 10 y 20 m³/s sobre el volumen de la laguna Mar Chiquita. Se aprecia por ejemplo que con extracciones de 20 m³/s el volumen apenas habría alcanzado los 15 km³. Estos resultados son todavía preliminares y serán ajustados en futuras versiones del modelo.

Tabla 2. Caudales del río Dulce necesarios para mantener distintos niveles (cotas) de la laguna Mar Chiquita y salinidad estimada para cada nivel.

Cota (msnm)	Caudal (m ³ /s)	Salinidad (g/L)
71,5	142,2	25
71,0	105,7	30
70,5	89,0	34
70,0	80,3	40
69,5	74,1	45
69,0	67,8	52
68,5	58,3	60
68,0	49,7	69
67,5	40,3	79
67,0	30,7	91
66,5	21,9	104
66,0	14,6	120
65,5	8,9	137
65,0	4,6	156
64,5	0,1	181

- 5) Para evaluar la intensidad y la distribución temporal del aporte requerido para mantener las inundaciones, se utilizó la información que se describe al analizar el subsistema Bañados del río Dulce (Sección 5.3).
- 6) En todos los casos, los cálculos fueron realizados sobre la base del período semestral, por lo que los resultados obtenidos deberán ser interpretados como las condiciones que deben satisfacerse dentro de ese lapso.

4.4. EFECTO DE LA EXTRACCIÓN DE AGUA DEL RÍO DULCE SOBRE LA LAGUNA

En la Figura 11 se observa el efecto simulado que distintos niveles de extracción (10 y 20 m³/s) habrían tenido sobre el volumen de la laguna durante el período modelado. Es evidente que, dependiendo de la cantidad extraída, el volumen y el nivel habrían sido bastante inferiores al registrado en dicho período. Las principales diferencias se aprecian en las etapas de mayor volumen, durante el período 1980-1990, lo que indica que a mayor volumen de agua en la laguna los efectos de extracción son más notables, debido principalmente a que se trata de una laguna poco profunda (con un promedio de 10 m en la parte central-sur) y de gran extensión areal.

A los fines prácticos del manejo, se calcularon los caudales del río Dulce requeridos para mantener en equilibrio distintos niveles de la laguna, que se presentan en la Tabla 2. Esta tabla puede usarse como una ayuda práctica para evaluar el efecto de los cambios en el régimen hídrico del río Dulce y sus consecuencias sobre la laguna Mar Chiquita. Para cada nivel de la laguna, se indica el valor del caudal del río Dulce necesario para mantener dicho nivel estable. Si el río Dulce recibe un caudal menor al indicado durante 3 meses continuos, el nivel de la laguna decrece; por el contrario, si recibe un caudal mayor, la laguna tiende a subir. Por ejemplo, para mantener la laguna estable en la cota de 69 m, (considerada límite para la supervivencia del pejerrey con una salini-

dad asociada de 47 g/L) el valor de caudal requerido es de 67,8 m³/s. Vemos que si el caudal promedio del río Dulce volviera a tener el promedio del período estudiado (66 m³/s), entonces el nivel correspondiente de la laguna estaría entre las cotas de 68,5 y 69 m, lo que probablemente comprometería la permanencia del pejerrey en la laguna (ver capítulo 12).

La Tabla 2 también puede usarse para calcular el efecto de las reducciones de caudal resultante de la extracción de agua del río Dulce. Por ejemplo, si la laguna estuviera en un nivel estable de 69 m y en un momento dado se redujera el aporte del río Dulce en un 40% (yendo del valor de 67,8 m³/s a 40,68 m³/s), entonces el nivel esperado de la laguna se ubicaría apenas por encima de la cota de 67,5 m, es decir, que habría una caída de nivel de 1,5 m.

Este análisis se extendió al registro de volúmenes de la laguna Mar Chiquita. Los resultados para escenarios de simulación de extracción de agua de 10 y 20 m³/s, respectivamente, se presentan en la Figura 11.

4.5. CAUDALES REQUERIDOS PARA LAS INUNDACIONES ANUALES

El análisis comparativo de las imágenes satelitales y de los datos hidrológicos indicó que el área inundada en los bañados comienza a crecer cuando el caudal supera levemente el valor crítico (caudal de desborde) de 90 m³/s, el cual corresponde a la capacidad máxima de transporte del cauce del río. Por lo tanto, se

considera que el caudal mínimo (Q_m) para la formación de bañados debería ser de, al menos, 110 m³/s (superando aproximadamente un 20% al caudal de desborde). Este valor constituye una primera aproximación, el cual deberá ser calibrado en función de análisis más detallados y con series de datos más completas. Asimismo, este análisis permitió estimar el tiempo promedio de respuesta entre el momento en que se produce el incremento en los volúmenes erogados en el embalse Los Quiroga y el crecimiento del área inundada. Este retardo osciló entre 5 y 20 días, en función del caudal erogado.

Por lo general, los bañados alcanzan su máxima extensión en el mes de mayo, con una secuencia de caudales superior a los de desborde durante alrededor de 3 meses continuos, y con la posibilidad de períodos de hasta 5 días con caudales menores. Esto asegura la cobertura de extensas áreas de inundación.

El conocimiento de este proceso de crecimiento permitió, asimismo, cuantificar el efecto retardador de los bañados en el escurrimiento del agua que ingresa a la laguna, estimado en 4 semanas aproximadamente, inferior al valor propuesto por Kanter (1935) quien, en 1930, estimaba una demora entre 6 y 8 semanas. En la Tabla 3, y de acuerdo con los resultados mencionados anteriormente, se presentan los volúmenes que deben ser erogados durante 3 meses continuos en el embalse Los Quiroga, para que los bañados alcancen ciertas condiciones en el período semestral posterior.

Tabla 3. Volúmenes del río Dulce (erogados en el embalse Los Quiroga durante 3 meses consecutivos) requeridos para alcanzar niveles crecientes de inundación y área inundada en los Bañados del río Dulce.

Volumen erogado en Los Quiroga Rango (hm ³)	Área inundada Rango (miles de ha)	Nivel de inundación
<= 100	<= 200	Bajo
100 – 1.300	200 – 280	Medio
> 1.300	> 280	Alto

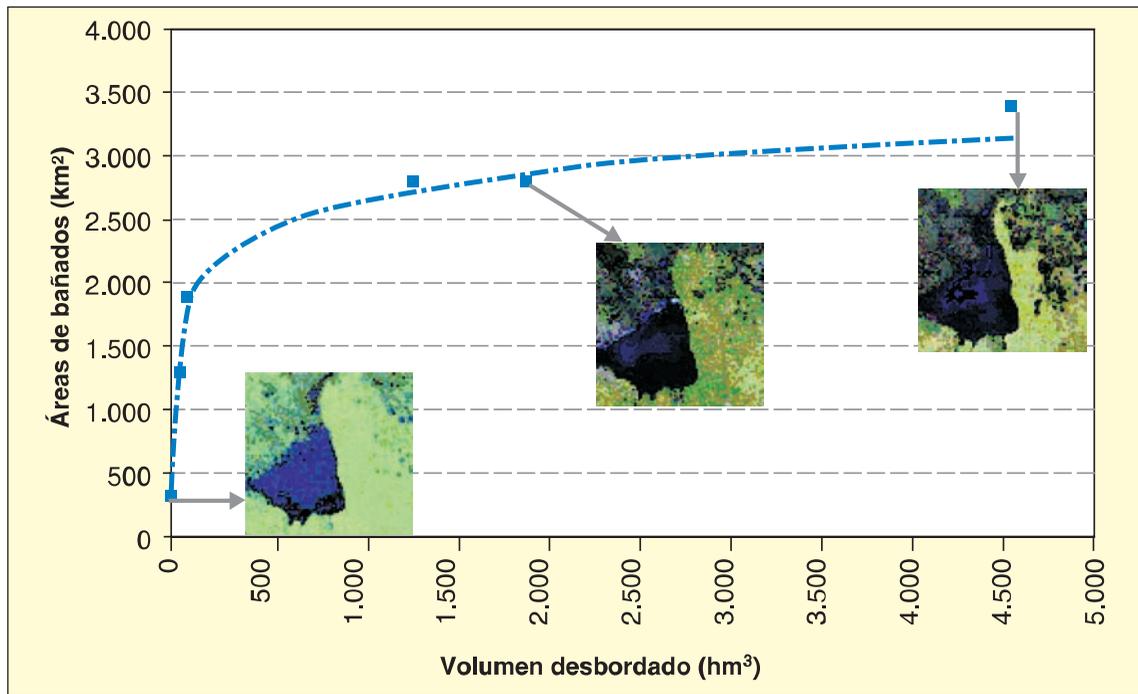


Figura 12. Relación entre los volúmenes desbordados anualmente por el río Dulce (estimados a partir de caudales medidos en el embalse Los Quiroga) y el área ocupada por las inundaciones en los Bañados del río Dulce.

5. MODELO BAÑADOS: RELACIÓN ENTRE EL ÁREA INUNDADA Y EL APORTE DEL RÍO DULCE

El subsistema Bañados es extremadamente complejo desde el punto de vista de su dinámica hidráulica, particularmente debido a las inundaciones que se expanden por el valle fluvial cuando el caudal entrante por el río Dulce supera la capacidad de conducción de su cauce.

La relación entre el área ocupada por las inundaciones en los bañados y los caudales erogados por el río Dulce aguas arriba se estableció de la siguiente forma. Durante las inundaciones ocurridas en el período analizado, se determinaron los siguientes parámetros: a) la extensión del área anegada (mediante imágenes satelitales), b) los caudales del río Dulce (erogados en Río Hondo), c) la precipitación y la evapotranspiración en el área de bañados y d) el nivel de la laguna

Mar Chiquita. Los valores correspondientes a cada parámetro fueron correlacionados para cada episodio de inundación (Pagot 2003).

Durante el período analizado (1997-2001), las inundaciones cubrieron un área variable que osciló entre 32 y 350 mil hectáreas, según los años. Se considera que el valor mínimo del área inundada corresponde a las lagunas permanentes en el subsistema analizado. El análisis del balance vertical (es decir, considerando sólo las variables de precipitación, evaporación y evapotranspiración) del sistema Bañados del río Dulce indica que el factor determinante de la extensión alcanzada por el área inundada es el aporte del río Dulce que llega a la altura de Los Telares y desborda formando los bañados. La precipitación y la evapotranspiración local, así como el nivel de la laguna Mar Chiquita, tienen una significación mucho menor (Pagot 2003).

Se define como volumen desbordado del río Dulce a aquel caudal total que supera la capacidad del cauce, el cual se estima debe superar, como mínimo, $90 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 3 meses consecutivos. A partir de este concepto, se define la relación entre los volúmenes aportados por el río Dulce y las inundaciones subsecuentes como de tipo logarítmica (Fig. 12). Para volúmenes bajos, de hasta aproximadamente 100 hm^3 , a incrementos pequeños de caudal corresponden grandes aumentos del área inundada en los bañados. Con volúmenes superiores, de hasta 1.300 hm^3 , las áreas inundadas aumentan en forma directamente proporcional a los caudales. Finalmente, para volúmenes por encima de 1.300 hm^3 , las áreas inundadas se incrementan en menor proporción, ya que las aguas alcanzan los límites del valle de inundación del río Dulce.

6. COMENTARIOS

Los resultados presentados en los trabajos de modelos hidrológicos para el sistema de Mar Chiquita y los Bañados del río Dulce han permitido lograr un avance muy significativo en nuestra comprensión de la dinámica hidrológica del sistema. Aunque posibles de ser mejorados –teniendo en cuenta que la mejora continua es una característica de esta herramienta– los resultados presentados son ya capaces de darnos elementos de juicio muy importantes para el manejo de la reserva y sitio Ramsar.

Es posible ahora ofrecer respuestas iniciales a las preguntas básicas planteadas en la introducción, relativas al caudal requerido para mantener la laguna en niveles determinados, así como la intensidad y duración del caudal de desborde necesarios para mantener distintos niveles de la inundación anual de los Bañados del río Dulce, pulso esencial para preservar su integridad ecológica (ver capítulo 21). De la misma manera, pueden deducirse los niveles y caudales a los que la laguna variaría entre condiciones de meso, hiper, y mega salinidad (debajo de 50 g/L , entre 50 y 100 g/L y por encima de 100 g/L , respectivamente), así como el caudal requerido para asegurar la supervivencia del pejerrey en la laguna.

La estimación de los pulsos de agua requeridos en la entrada del río Dulce al sistema para asegurar la inundación anual de los bañados es otro avance importante. Con este enfoque, se plantea un nuevo criterio para el manejo hidrológico de los humedales, ya que tradicionalmente se ha procurado controlar o eliminar las inundaciones, sin considerar que en ciertos casos constituyen un componente fundamental de esos ecosistemas (ver capítulo 21). Es indudable que el hecho de contar con cifras concretas facilitará las medidas de gestión interprovincial, destinadas a un manejo más eficiente y sustentable de la cuenca del río Dulce por parte de las provincias que lo comparten.

APÉNDICE 1

Se detallan a continuación el origen de la información utilizada y su procesamiento estadístico y de modelación para las variables consideradas en el modelo. En todos los casos, se consideró el ciclo anual hidrológico partiendo de julio de un año a junio del siguiente.

1. NIVEL, VOLUMEN Y SALINIDAD DEL AGUA DE LA LAGUNA MAR CHIQUITA

El nivel de agua de la laguna se obtuvo a partir de mediciones disponibles desde el año 1967 hasta el presente. Los datos originales fueron ajustados para corregir cambios en el valor cero de la escala de referencia, debido a los desplazamientos de la escala que tuvieron lugar durante dicho período a causa de las inundaciones. Se utilizaron valores medios mensuales para corregir cambios puntuales de nivel debido a la acción del viento (*wind setup*).

Los volúmenes correspondientes a distintos niveles del agua en la laguna se calcularon a partir de la batimetría determinada por el Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida (CIHRSA) (1977 y 1979), completada mediante análisis de imágenes satelitales obtenidas entre los años 1998 y 2004.

Los valores de salinidad utilizados en el análisis corresponden a determinaciones no sistemáticas, disponibles para el período de estudio (ver capítulo 5).

2. APORTES DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS

El volumen ingresado al subsistema Río Dulce Medio, a la altura del embalse Los Quiroga, fue establecido a través del análisis de series de caudales medios mensuales en el embalse Río Hondo, para el período comprendido entre marzo de 1967 y febrero de 2000 (Fuentes: DIPAS y Agua y Energía Eléctrica - AyEE). Asimismo, se utilizaron datos de caudales diarios erogados en el embalse Río Hondo y aforos, a la altura de Los Telares, correspondiente al año 1982. Dicha

información fue obtenida a partir de informes de movimientos de embalse (Hillman 1999). En el embalse Los Quiroga, se analizaron mediciones de caudales diarios desde febrero de 1975 hasta octubre de 1997, provistos por la Universidad Nacional de Santiago del Estero (Pagot 1999). La serie resultante se basó en los datos de DIPAS y fue interpolada con los datos del embalse Río Hondo mediante correlaciones estadísticas.

Los caudales mensuales aportados a Mar Chiquita por el río Primero fueron determinados a partir de mediciones en la sección de aforos Río Primero, ubicada aproximadamente 75 km aguas arriba de la laguna (fuentes: DIPAS, AyEE). Los aportes del río Segundo se obtuvieron a partir de series de mediciones diarias en la sección de aforo Campo Plujunta, ubicada aproximadamente 15 km aguas arriba de la laguna (Fuentes: DIPAS, AyEE). Los datos faltantes del período analizado 1967-1997 fueron completados por interpolaciones realizadas mediante correlación múltiple con caudales medidos en secciones aguas arriba y precipitaciones en la cuenca.

3. PRECIPITACIÓN

3.1. ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS UTILIZADAS

Se listan las estaciones pluviométricas usadas en la región del río Dulce Medio y en los bañados, agrupadas por provincias. Se incluye además información de los períodos en los cuales se dispone de datos para cada una de ellas.

Santiago del Estero: Va. San Martín (1934/96), Va. Atamisqui (1948/96), Herrera (1948/96), Pinto (1948/96), Salavina (1970/88), Va. Unión (1974/96), Brea Pozo (1969/96), Sol de Julio (1989/96), Palo Negro (1978/96), Los Telares (1948/88), Ojo de Agua (1948/96), Barranca (1990/96), Sumampa (1948/95).

Córdoba: Puesto de Castro (1963/90), Gutenberg (1934/97), Candelaria Norte-Eufrasio Loza (1937/89), La Rinconada (1964/89), Las Arrias (1934/97), Sebastián Elcano (1934/97), Va. de María de Río Seco (1937/68), Paso de la Cina (1970/73), Obispo Trejo (1970/73), San Francisco del Chañar (1937/68).

Santa Fe: San Guillermo (1955/96), Tostado (1960/92), Selva (1948/78), Ceres (1955/94), Suardi (1955/92), Independencia (1960/92).

En los casos en los que se carecía de datos por un intervalo mayor a 2 meses consecutivos para una estación dada, se los estimó mediante una correlación con series próximas, obtenidas con anterioridad a este trabajo (Pagot 1999). Cuando se trataba de un solo mes faltante, su valor fue estimado asignándole el valor medio mensual de la misma serie.

Debido a la poca pendiente y a la escasez de estaciones meteorológicas en el área de los bañados, se generaron tres series de lluvia media areal, agrupando las localidades y atribuyéndoles peso por el método de polígonos de Thiessen. Los sectores de cada grupo y los coeficientes de peso resultaron de la siguiente manera:

- Sector Norte: Villa San Martín, Villa Atamisqui y Brea Pozo. Coeficiente de ponderación: 0,05836.
- Sector Centro: Los Telares, Herrera, Salavina, Sumampa, Ceres, Selva, Palo Negro, Paso de la Cina, Sol de Julio, Villa Unión, Gutenberg y Pinto. Coeficiente de ponderación: 0,55720.
- Sector Sur: Sebastián Elcano, Obispo Trejo, Eufrasio Loza, Las Arrias, La Rinconada, San Guillermo y Suardi. Coeficiente de ponderación: 0,38444 (variable en función del nivel de la laguna Mar Chiquita).

Los tres conjuntos tienen baricentros dentro de los límites de los bañados, definidos con imágenes satelitales (Pagot *et al.* 2000).

3.2. PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN DE BAÑADOS DEL RÍO DULCE

La lluvia sobre la región del río Dulce Medio y bañados se estimó usando datos de 22 estaciones pluviométricas. Según su distribución espacial, las estaciones se agruparon en tres series de lluvia media areal, según lo descrito en la sección anterior. La serie de precipitación definitiva en la zona de bañados es la suma ponderada de series parciales, teniendo en cuenta el valor relativo del área ocupada por cada uno de los grupos (Pagot 1999).

3.3. PRECIPITACIÓN EN LA LAGUNA MAR CHIQUITA

La precipitación en la laguna se estimó a partir de 23 series pluviométricas de estaciones ubicadas en el contorno de la laguna, agrupadas en ocho sectores cardinales. El cálculo de la lámina media areal (P) (Universidad Nacional de Córdoba 1998), realizado mediante la técnica de polígonos de Thiessen, consideró coeficientes de peso variables para cada estación, teniendo en cuenta el área ocupada por la laguna, según los distintos niveles que tuvo durante el período analizado.

El cálculo de la precipitación media areal (PL) considera la influencia relativa de las estaciones con datos disponibles ubicadas en octantes, según los sectores cardinales, en función del área ocupada por la laguna para tres escenarios característicos, mediante la siguiente expresión:

$$PL = \phi_N(b) P_N + \phi_S(b) P_S + \phi_E(b) P_E + \phi_O(b) P_O + \phi_{SE}(b) P_{SE} + \phi_{SO}(b) P_{SO} + \phi_{NE}(b) P_{NE} + \phi_{NO}(b) P_{NO}$$

verificando con los coeficientes de distribución ϕ que $\sum \phi_i = 1$, indicando el subíndice (i) cada punto cardinal y valuados por medio de polígonos de Thiessen.

Para calcular las precipitaciones efectivas en el espejo de agua de la laguna, se realizaron los siguientes cálculos:

- 1) Precipitación media anual histórica para cada sector.

- 2) Coeficientes de distribución de precipitaciones ϕ .
- 3) Área de lámina efectiva sobre el espejo de agua de la laguna.

El cálculo de los coeficientes de distribución de precipitaciones, ϕ , varía en función del área de la laguna. Estos coeficientes de peso se obtuvieron en función de la distribución geométrica de las distintas estaciones. Cada punto, representativo del sector, está ubicado en el baricentro que forma la figura inscrita por la posición de las estaciones asignadas al punto.

Los escenarios característicos se definieron en función del nivel y área alcanzados por la laguna durante el período analizado, adoptando así escenarios: pobre, medio y rico. Estos escenarios se esquematizan mediante tres imágenes satelitales adquiridas en septiembre de 1973, julio de 1987 y enero de 1997, y sobre las cuales se calcularon los coeficientes de peso (a través del método de polígonos de Thiessen). Los datos relevados de estas imágenes se resumen en la Tabla A 1.

El procedimiento para calcular la lámina efectiva precipitada sobre el espejo de agua de la laguna consistió en los siguientes pasos:

- 1) En función del nivel de la laguna, se obtienen los coeficientes de distribución para cada sector asignado.
- 2) Se aplica el coeficiente de distribución a la lluvia media anual histórica correspondiente.
- 3) Se calcula la sumatoria de las láminas precipitadas en todas las zonas.

El procedimiento descrito permite estimar la precipitación efectiva sobre el espejo de agua para cada escenario que se desee simular.

4. EVAPORACIÓN

4.1. EVAPORACIÓN EN LA REGIÓN DEL RÍO DULCE MEDIO Y LOS BAÑADOS

La serie de evaporación se calculó utilizando la expresión propuesta en Chow *et al.* (1994), adaptando la variante de Priestley-Taylor para grandes áreas. En esta variante, el balance de energía regula la tasa de evaporación combinada (E_c) con los métodos aerodinámicos (E_b), lo que da como resultado una reducción del 30% del valor de la tasa de evaporación por radiación debido a la presión de vapor, o sea

$$E_c = \alpha \cdot \Delta \cdot E_b / (\gamma + \Delta)$$

donde: Δ equivale al gradiente térmico medio de la curva de presión de saturación que vincula la temperatura con la presión de vapor; γ es la constante psicrométrica.

En general, se suele adoptar el valor 1,3 para α . Sin embargo, en virtud de la información regional disponible, se decidió modificar esta constante mediante el factor f . Este factor resulta del cociente entre las medias de dos series de evaporación de cada estación analizada: a) el valor de la medida (E_m) del tanque de evaporación multiplicado por factor de tanque igual a 0,7 para compensar las diferencias de volumen, superficie y ubicación del espejo de agua respecto del tanque (Chow *et al.* 1994) y b) el valor calculado me-

Tabla A 1. Coeficientes de distribución (ϕ) de precipitaciones en los sectores definidos para los tres escenarios propuestos.

Año	Cota [msnm]	Área [km ³]	Sector							
			NO	N	NE	E	SE	S	SO	O
1973	64,56	1264	0	0	0,075	0,3	0,03	0,67	0	0
1987	71,40	7239	0,087	0,114125	0,14125	0,285	0,027	0,24	0,1	0,0775
1997	68,80	4398	0,053	0,0895	0,126	0,314	0,04	0,36	0,074	0,0375

dian­te la expresión de Priestley-Taylor (E_c). De esta forma, se tiene que:

$$f = E_m/E_c$$

por lo que:

$$E = f \cdot E_c = f \cdot \alpha \cdot \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \cdot E_b$$

o bien:

$$E = \alpha'' \cdot \frac{\Delta}{\gamma + \Delta} \cdot E_b$$

Esta última ecuación es similar a la de Priestley-Taylor, con $\alpha'' = (1,3 \cdot E_m/E_c)$, en lugar de $\alpha = 1,3$. La misma ecuación fue aplicada a las series originales de cada estación para estimar los datos faltantes en las series originales. En la Tabla A 2 se presentan los factores α'' utilizados para cada estación con datos meteorológicos disponibles. Las estaciones seleccionadas fueron consideradas representativas de cada uno de los mismos tres sectores definidos para el cálculo de la precipitación (Norte, Centro y Sur). También en este caso se consideró variable el límite sur, debido al desplazamiento de la margen de la laguna resultante de variaciones en su nivel.

4.2. EVAPORACIÓN EN LA LAGUNA MAR CHIQUITA

En la región de la laguna Mar Chiquita se utilizó la serie estimada para el sector sur (del punto 4.1). Dado que la evaporación está afectada por la salinidad del agua (ver capítulo 5), las estimaciones de esta variable para la laguna se corrigieron mediante la siguiente ecuación:

$$E_{cr} = E \cdot f_{cp}$$

donde: E_{cr} : evaporación real; E : evaporación potencial estimada por Priestley-Taylor; f_{cp} : factor de corrección por salinidad, obtenido de la expresión $f_{cp} = 1 - \delta$, el cual oscila entre 0,7 y 1; δ : densidad específica.

Tabla A 2. Factor de corrección para estimar evaporación en los Bañados del río Dulce, indicando la estación y el sector agrupado.

Estaciones	Sector	Factor α''
Villa Atamisqui	Norte	0,61105
Gutenberg y Ceres	Centro	0,88836
Miramar y La Rinconada	Sur	0,57305

Los valores de evaporación decrecen a medida que la salinidad del agua aumenta (ver capítulo 5), lo que también incrementa su densidad específica (Chow *et al* 1994). El descenso de la evaporación se estima en un 1% cuando la densidad específica aumenta 1%. Con el aumento de salinidad, el valor de densidad puede ir desde 1,0 (agua pura) hasta valores cercanos a 1,3, cuando se alcanza el límite máximo de saturación.

A los efectos de determinar la relación entre densidad específica y concentración de sales, se correlacionaron los valores asociados a estas variables, resultando la siguiente expresión:

$$\delta = 0,0007 \times C + 1$$

donde: δ : densidad específica y C : concentración de sales (g/L).

Los valores de concentración en el agua de Mar Chiquita se calcularon considerando la relación entre los valores de masa total de sales disueltas y los volúmenes de la laguna. Algunos de los valores calculados fueron reemplazados por mediciones obtenidas en los años 1925, 1953, 1970, 1977, 1982, 1986, 1989, 1992 y 1998 en Reati *et al.* (1997) y en Universidad Nacional de Córdoba (1998).

Se asume que la concentración de sales de Mar Chiquita, expresada en peso de residuos sólidos a 110 °C, refleja aceptablemente la salinidad real. La relación entre volumen y salinidad de la laguna tuvo un alto ajuste

Tabla A 3. Coeficientes de correlación ϵ_{si}

ϵ_{si}	Valor
ϵ_{s0}	277,36398
ϵ_{s1}	-78,212443
ϵ_{s2}	10,76335
ϵ_{s3}	-0,72039
ϵ_{s4}	0,02294
ϵ_{s5}	-0,00028

($R^2 = 0,999$) a la siguiente función polinómica de quinto orden:

$$C(V) = \epsilon_{s5} \cdot V^5 + \epsilon_{s4} \cdot V^4 + \epsilon_{s3} \cdot V^3 + \epsilon_{s2} \cdot V^2 + \epsilon_{s1} \cdot V + \epsilon_{s0}$$

donde C: concentración de sales (g/L) y V: volumen de la laguna (km³). Los valores de los coeficientes de correlación ϵ_{si} (con $i = 0 \dots 5$) se presentan en la Tabla A 3.

5. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LOS BAÑADOS

En base a los tres grupos areales definidos en la sección anterior para evaporación en los Bañados, se estimaron series de evapotranspiración en las mismas estaciones donde se disponía de la información necesaria. Las series resultantes por sectores se afectaron por los mismos coeficientes de distribución areal que para estimar la precipitación en la región de bañados.

La evapotranspiración real (ETR) se determinó a partir de la evapotranspiración potencial utilizando el método de Morton (Caamaño Nelli 1999). Esta expresión considera que existe una relación complementaria, en ciertas condiciones, entre la evapotranspiración real y la potencial, de la siguiente forma:

$$ETR + ETP = ETW.2$$

donde:

ETR: evapotranspiración real de un área con capacidad de desarrollar completamente los efectos sobre la humedad y la temperatura del aire.

ETP: evapotranspiración potencial, estimada por medio de la ecuación combinada de los métodos aerodinámicos de transferencia de vapor y los de balance de energía (Custodio & Llamas 1976).

ETW: evapotranspiración de ambiente húmedo, la que ocurriría si la superficie suelo-planta estuviese saturada y no hubiera límite en la disponibilidad de agua para evapotranspirar. Este parámetro se equiparó al valor de la ecuación de evaporación de Priestley-Taylor (Chow *et al.* 1994).

Para generar los datos de evapotranspiración potencial se evaluaron las técnicas de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle y Turc (Custodio & Llamas 1976); se seleccionó esta última para la serie a utilizar en cada sector durante el período 1967-1997, ya que presentó mayor correlación lineal (R^2) con la correspondiente serie de evaporación.

APÉNDICE 2

CONVENIO DE PARTICIPACIÓN DE LAS AGUAS DEL RÍO DULCE TUCUMAN - SANTIAGO DEL ESTERO – CÓRDOBA - 1977

Entre las provincias de Tucumán, Santiago del Estero y de Córdoba, representadas en este acto por sus excelencias los señores Gobernadores General Auditor (RE) Fernando Aliaga GARCIA, General Auditor (RE) Carlos Alberto URIONDO y Doctor don Miguel FERRER DEHEZA, respectivamente, quienes firman al pie en prueba de conformidad y cuyas firmas son refrendadas por S.S. los ministros de Obras Públicas de la Provincia de Santiago del Estero, Ingeniero don Ricardo LALOR y de Gobierno, Culto y Justicia de la Provincia de Córdoba, Doctor don Adolfo Oscar RUIZ y con el objeto de fijar las bases para la distribución de las aguas del río interprovincial Salí-Dulce, entre las provincias contratantes; y

Considerando:

Que la Nación, por intermedio de su organismo Técnico, Agua y Energía Eléctrica, ha realizado los estudios hidrogeológicos que permiten estimar el derrame medio anual del mencionado río.

Que teniendo en cuenta las necesidades actuales y futuras de las provincias de Tucumán, de Santiago del Estero y de Córdoba, como así también a los fines de satisfacer las necesidades de bebida y alimentación de las depresiones naturales del terreno para conservar el equilibrio hídrico y climático de la región inferior del citado río, las partes signatarias, CONVIENEN:

ARTÍCULO PRIMERO: Las bases técnicas para la distribución de las aguas del río Salí-Dulce serán los estudios hidrogeológicos realizados por Agua y Energía Eléctrica de la Nación que estima un derrame medio anual de (3.600 hm³) tres mil seiscientos hectó-

metros cúbicos, con recursos hídricos normales del mencionado río.

ARTÍCULO SEGUNDO: La Provincia de Tucumán utilizará hasta el (32%) treinta y dos por ciento del derrame total anual de la Cuenca del río Dulce-Salí y dejará escurrir el resto aguas abajo; a partir del Dique Los Quiroga, el (22%) veintidós por ciento del derrame total anual recibido aforando en “El Sauce” con la sola deducción de las pérdidas naturales de evaporación o infiltración, producidas hasta la estación de aforo referida.

ARTÍCULO TERCERO: Toda Obra que se ejecute por cualquiera de las provincias contratantes para nuevos aprovechamientos de los recursos hídricos a objeto de ampliar, mejorar o racionalizar los existentes, no podrá modificar los porcentuales de disponibilidad establecidos en el artículo anterior.

ARTÍCULO CUARTO: Una comisión permanente integrada por un representante de cada una de las provincias interesadas: de Tucumán, de Santiago del Estero y de Córdoba, y otro a propuesta de Agua y Energía de la Nación, tendrá a su cargo:

- a) Vigilar el estricto cumplimiento del presente convenio;
- b) Realizar un estudio definitivo tendiente a asegurar el aprovechamiento integral de los recursos hídricos.

ARTÍCULO QUINTO: Las partes se someten a la jurisdicción ordinaria y exclusiva de la Exma. Cámara (Corte) Suprema de Justicia de la Nación. (Artículo 101 de la Constitución Nacional).

ARTÍCULO SEXTO: El Presente convenio entrará en vigencia cuando haya sido ratificado por sendas leyes de las provincias, a cuyo fin el Gobernador de una, cursará aviso de la ratificación a los Gobernadores de las otras, contándose la vigencia des-

de la fecha de la promulgación de la última ley aprobatoria. Asimismo, se solicitará la ratificación formal por ley de la Nación.

ARTÍCULO SÉPTIMO: De forma.

CELEBRADO EN LA CIUDAD DE SANTIAGO DEL ESTERO, A LOS TRES DIAS DEL MES DE JULIO DEL AÑO MIL NOVECIENTOS SETENTA Y SIETE.

BIBLIOGRAFÍA

- CAAMAÑO NELLI G. (1999). Hidrología Avanzada - Evapotranspiración. Maestría en Ciencias de la Ingeniería. *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba.
- CHOW V.T., MAIDMENT D.R. & MAYS L.W. (1994). Hidrología aplicada. 1 edn. *Mc. Graw Hill Interamericana S.A.*, Bogotá, Colombia.
- CONVENIO ARGENTINO-ALEMÁN DE AGUA SUBTERRÁNEA. (1975). Recursos de Agua Subterránea y su Aprovechamiento en la Llanura Pampeana y en el Valle del Conlara. Tomos I y II. *Ed.: Instituto Nacional de Ciencia y Técnica Hídricas, Bs.As., Argentina; Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales*. Hannover, Alemania.
- CUSTODIO E. & LLAMAS M. (1976). Hidrología subterránea. *Ediciones Omega*, Barcelona.
- DAPENA C., PANARELLO H. & NICOLLI H.B. (1997). Environmental isotope balance of Laguna Mar Chiquita, Córdoba. Argentina. *SSAGI South American Symposium on Isotope Geology*. Campos de Jordão, Sao Paulo, Brasil.
- HILLMAN G. (1999). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Laguna de Mar Chiquita. Tesis de grado. *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba.
- HILLMAN G. (2003). Análisis y Simulación del Sistema de Mar Chiquita. Maestría en Ciencias de la Ingeniería. Mención Recursos Hídricos. *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba.
- HILLMAN G., RODRIGUEZ A., PAGOT M., MENAJOVSKY S., BARBIERO S., BERNASCONI I. & CAAMAÑO N.G. (2000). Funciones Geométricas y de Salinidad de la Laguna de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH*, Córdoba, Argentina.
- KANTER H. (1935). La Cuenca Cerrada de la Mar Chiquita en el Norte de la Argentina. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias (Córdoba, Argentina)*, 32:285-322.
- PAGOT M. (1999). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce. Tesis de grado, Ingeniería Civil. *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba.
- PAGOT M. (2003). Análisis y Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce. Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención en Recursos Hídricos. *Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba, Argentina.
- PAGOT M., CAAMAÑO NELLI G., RODRIGUEZ A., HILLMAN G., BERNASCONI I., MENAJOVSKY S. & BARBIERO S. (2000). Flujo Hidrometeorológico en el Sistema Bañados del Río Dulce – Laguna de Mar Chiquita, República Argentina. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, AIIH*. Córdoba, Argentina.
- PLENCOVICH G., HILLMAN G., PAGOT M., POZZI C., RODRIGUEZ A., CAAMAÑO N.G. & BERTONI J.C. (2005). Actualización del modelado del sistema Laguna Mar Chiquita – Bañados del Río Dulce, Córdoba. *XX Congreso Nacional del Agua 2005 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza, Argentina.
- POZZI C., PLENCOVICH G., HILLMAN G., RODRIGUEZ A., CAAMAÑO NELLI G., MICHELUTTI P., SALIO P. & PAGOT M. (2005). Monitoreo hidroambiental de la Laguna Mar Chiquita, Córdoba. Aplicación al diseño de las defensas costeras de Miramar. *XX Congreso Nacional del Agua 2005 y III Simposio de Recursos Hídricos del Cono Sur*. Mendoza, Argentina.
- REATI G.J., FLORÍN M., FERNÁNDEZ G.J. & MONTES C. (1997). The Laguna de Mar Chiquita (Córdoba, Argentina): A little Known, Secularly Fluctuating, Saline Lake. *International Journal of Salt Lake Research*, 5:187-219.
- RODRIGUEZ A., HILLMAN G., PAGOT M., MENAJOVSKY S., BARBIERO S., CAAMAÑO N.G., CHINI I. & BERNASCONI I. (2000a). Simulación Hidrológica del Sistema de Mar Chiquita, Córdoba, República Argentina. *XVIII Congreso Nacional del Agua, CPCA*. Santiago del Estero, Argentina.
- RODRIGUEZ A., PAGOT M., HILLMAN G., CAAMAÑO N.G., BERNASCONI I., MENAJOVSKY S., BARBIERO S. & CHINI I. (2000b). Simulación Hidrológica del Sistema Bañados del Río Dulce, Córdoba, República Argentina. *XVIII Congreso Nacional del Agua, CPCA*. Santiago del Estero, Argentina.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA (1998). Valoración del Impacto Ambiental en la Región de Mar Chiquita y la Cuenca afectada por el Canal Federal. Informe al Consejo Federal de Inversiones (CFI). *Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Córdoba. 325 pp.
- VISSMAN W.J. & LEWIS G.L. (2003). Introduction to Hydrology. 2 edn. *Prentice-Hall Inc.*, New York.

