



FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAGUNAS EN SALARES

CRISTIAN ORTIZ, JOSÉ F. MUÑOZ, DANIEL DEL SOLAR

Depto. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile.

Av. Vicuña Mackenna 4860, Casilla 306 Correo 22, Santiago, Chile.

Teléfono: 3544227; Fax: 3545876, e-mail: cortiza@ing.puc.cl

BALDOMERO SÁEZ

Igsa consultores Ltda. Augusto Leguía Norte 143-B. Las Condes, Santiago, Chile. Teléfono 234 9029, Fax: 333 8126, E-mail: bsaez@igsaconsultores.cl

PAULINE DE VIDTS

SQM SA. El Trovador 4285. Las Condes, Santiago, Chile.

Teléfono: 425 2262, e-mail: pdevidts@sqm.cl

RESUMEN

El presente artículo presenta un estudio sobre el funcionamiento hidrológico de las lagunas que se ubican en los márgenes de salares, en base a la ecuación del balance hídrico y a mediciones de campo de las series temporales de caudales de recarga y descarga del sector de las lagunas del sistema lacustre Soncor en el Salar de Atacama.

Los resultados obtenidos permiten conocer mejor la conexión hidráulica entre los escurrimientos superficiales y subterráneos que recargan los depósitos salinos, las lagunas existentes en la zona marginal del núcleo de costra salina y el acuífero de salmuera existente en dicho núcleo. Se concluye que el escurrimiento superficial es la principal fuente de recarga de las lagunas, siendo la recarga subterránea pequeña y estable en el tiempo. Finalmente, se muestra la importancia de la evaporación como principal fuente de descarga y como componente amortiguador de las variaciones en la recarga de las lagunas, lo que explica su estabilidad en el tiempo.

ABSTRACT

This paper presents a study regarding the hydrologic behavior of the lagoons located along salar boundaries, based on the mass balance equation and field measurement of recharge and discharge flows at the Soncor lagoons system in the Salar de Atacama, Chile.

Results allow a better understanding of the recharge and discharge flows at the salar boundaries and lagoon's zones. Main recharge source for these lagoons is the surface runoff, while the groundwater inflow is rather small and constante in time. Evaporation is the main cause of discharge and affects the system by reducing the recharge variations of freshwater flowing into the lagoons.



FUNCIONAMIENTO HIDROLÓGICO DE LAGUNAS EN SALARES.

1 Introducción

Los salares se ubican en cuencas endorreicas o cuencas cerradas sin drenaje (Snyder, 1962; Duffy y Al-Hassan, 1988), donde la recarga de agua dulce es descargada exclusivamente por medio de la evaporación, en las partes más bajas de las cuencas, provocando zonas de alta acumulación de sales. En el Salar de Atacama, se distingue un núcleo salino muy compacto, impregnado con una salmuera con alta concentración de sólidos disueltos, que interactúa con una masa de agua dulce que proviene de las partes altas de la cuenca. Esta interacción produce una interfaz salina, cuya posición y forma dependen de la tasa de evaporación, de las características hidrogeológicas del medio, del comportamiento de las precipitaciones y de la densidad de la salmuera (Tejeda et. al., 2003). En los márgenes del núcleo salino del Salar, se ubican una serie de lagunas, algunas de las cuales presentan pequeñas variaciones de su tamaño y sus niveles y son el hábitat de una variada flora y fauna, a pesar de las fuertes fluctuaciones de sus caudales de recarga, mientras que otros sectores presentan afloramientos con grandes variaciones de niveles, llegando incluso a desaparecer en algunos períodos. El comportamiento de estas lagunas se puede explicar en función de la variación de las diferentes recargas que reciben, pero principalmente en función de la intensidad de la evaporación, tanto desde las superficies de agua libre de las lagunas como desde el agua subterránea en las zonas aledañas a ellas.

2 Funcionamiento hidrológico de las lagunas en salares

El flujo superficial en cuencas cerradas se puede representar por medio de tres zonas dispuestas en serie (Schumm, 1977, Duffy y Al-Hassan, 1988): i) zona fuente de sedimentos, agua y energía potencial del sistema; ii) zona de transición, donde ocurre la transferencia de sedimentos y agua y iii) zona de depósito y descarga, ocupadas por los depósitos salinos donde se ubican vegas y bofedales. El flujo de agua subterránea también se puede caracterizar por tres zonas (Tóth, 1962; Maxey, 1967; Duffy y Al-Hassan, 1988): i) zona de recarga de agua dulce, proveniente de la infiltración de las precipitaciones en las partes altas de la cuenca; ii) zona de flujo lateral, donde se produce la transferencia del agua y iii) zona de descarga o playa, donde, debido a la interacción entre el agua dulce y la salmuera existente en el salar, se produce una cuña salina. La cuña salina actúa como una barrera impermeable que produce un afloramiento superficial del agua dulce, que es menos densa que la salmuera, produciendo zonas de vegas y bofedales, donde se pueden presentar lagunas.

En la Figura 1 se presenta un esquema del funcionamiento hidrológico de una cuenca cerrada sin drenaje, donde se pueden apreciar las zonas de recarga, transmisión y descarga de agua superficial y subterránea y la zona de vegas, bofedales y lagunas en los bordes del salar.

3 Ecuación hidrológica para las lagunas de un salar

En la Figura 2 se presenta un esquema del funcionamiento hidrológico de una laguna, donde se incluyen todas las eventuales recargas y descargas del sistema. Las



recargas están compuestas por la recarga superficial, la recarga subterránea y la recarga por precipitaciones que caen directamente sobre las lagunas y sus zonas aledañas. Las descargas están compuestas por la descarga superficial, la descarga subterránea y por la descarga por evaporación, que ocurre tanto desde la superficie de agua libre de las lagunas, como desde la napa subterránea en las zonas aledañas.

La ecuación del ciclo hidrológico se puede aplicar a una zona de lagunas, considerando todas las entradas y salidas de agua de las lagunas y se puede expresar en su forma diferencial como (Domenico y Schwartz, 1990):

$$R(t) - D(t) = \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

donde $R(t)$ representa la suma todas las recargas en función del tiempo, $D(t)$ la suma de todas las descargas y dS/dt representa al cambio en el almacenamiento por unidad de tiempo en el dominio considerado.

La suma de las recargas se pueden expresar como:

$$R(t) = R_{\text{sup}}(t) + R_{\text{sub}}(t) + R_p(t) \quad (2)$$

donde $R_{\text{sup}}(t)$ es la recarga superficial que alimenta las lagunas debido a escurrimientos superficiales, $R_{\text{sub}}(t)$ es la recarga subterránea que proviene de los acuíferos de agua dulce que descargan en el salar y $R_p(t)$ corresponde a la recarga que ocurre debido a las precipitaciones que caen sobre el dominio.

La suma de las descargas se pueden expresar como:

$$D(t) = D_{\text{esub}}(t) + D_{\text{esup}}(t) + D_{\text{sub}}(t) + D_{\text{sup}}(t) \quad (3)$$

donde $D_{\text{esub}}(t)$ es la descarga por evaporación desde la napa subterránea en las zonas aledañas a las lagunas, $D_{\text{esup}}(t)$ es la descarga por evaporación desde la superficie libre de las lagunas, $D_{\text{sub}}(t)$ es la descarga subterránea que se produce hacia el Salar y $D_{\text{sup}}(t)$ es la descarga superficial.

La variación del volumen almacenado se puede expresar como:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_L}{dt} + \frac{dS_{\text{sub}}}{dt} \quad (4)$$

donde dS_L/dt representa la variación del volumen almacenado en las lagunas por unidad de tiempo y dS_{sub}/dt corresponde a la variación del volumen almacenado en el acuífero en las zonas aledañas a la laguna.

4 Estimación de los flujos de recarga y descarga en las lagunas del Sistema Soncor en el Salar de Atacama

En el Salar de Atacama se distinguen dos zonas claramente definidas: un núcleo de cloruro y una zona marginal. El núcleo se ubica principalmente en la parte central y Oeste del Salar y está formado por costras duras de cloruro de sodio, de tamaño muy



irregular, que se encuentran impregnadas con una salmuera intersticial muy rica en potasio, litio, magnesio y boro (Alonso y Risacher, 1996). La zona marginal se ubica en los bordes de los depósitos salinos, es plana y con vegetación abundante y es donde se ubican las lagunas y vegas.

En la Figura 3 se presenta un mapa del Sistema Lacustre Soncor, que está conformado principalmente por tres lagunas, la laguna Chaxas, ubicada más al Norte y que recibe un aporte superficial a través del canal Burro Muerto y que está conectada superficialmente con la laguna Barros Negros. La tercera laguna corresponde a Puilar, que sólo recibe recargas a través del flujo lateral subterráneo y se encuentra desconectada superficialmente de las otras dos lagunas. En la Figura 3 se muestra además la estación meteorológica Chaxas, la ubicación de la estación de aforo (puente San Luis) y la red de pozos de monitoreo del nivel de la napa subterránea, en las cercanías del sistema lacustre Soncor.

La estimación de los flujos de recarga y descarga de las lagunas del sistema Soncor se efectuó considerando dos dominios conectados por un canal superficial: uno para las lagunas Chaxas y Puilar y otro para la laguna Barros Negros (Figura 3).

La recarga superficial $R_{sup}(t)$ de la laguna Chaxas se midió en la estación de aforo continua instalada en el canal Burro Muerto, que alimenta superficialmente la laguna Chaxas. La recarga superficial de la laguna Barros Negros se asumió igual a la descarga superficial de la laguna Chaxas.

Las recargas y descargas subterráneas se calcularon considerando la conductividad hidráulica del terreno y mediciones del gradiente hidráulico obtenidas desde los pozos de observación, situados en las zonas aledañas a las lagunas, utilizando la Ley de Darcy, que expresa:

$$R_{sub}(t) \text{ ó } D_{sub}(t) = K \cdot \frac{h_2(t) - h_1(t)}{d_{12}} \cdot b \cdot L \quad (5)$$

donde K es la conductividad hidráulica del terreno, $h_2(t)$ y $h_1(t)$ corresponden a las cotas del nivel de la napa en los pozos de observación, d_{12} es la distancia entre los pozos de observación, b es el espesor promedio del acuífero libre y L es el ancho del dominio considerado. Para cada laguna, se consideró un ancho de dominio igual al diámetro de la laguna y un espesor de 60 m de profundidad, valor estimado a partir de perfiles geofísicos TEM, que entregan la posición de la cuña salina. El gradiente hidráulico utilizado para estimar la recarga subterránea fue calculado con los pozos L1-3 y L1-4 para la laguna Barros Negros y con los pozos 1027 y L7-G2 para la laguna Chaxas. La descarga subterránea se calculó utilizando los pozos L7-G1 y L1-G4 para la laguna Barros Negros y los pozos L1-5 y SOPM-7 para la laguna Chaxas.

La descarga por evaporación desde la superficie de las lagunas se estimó con la expresión:

$$D_{esup}(t) = K_e \cdot K_s \cdot E_T(t) \cdot A_l \quad (6)$$

donde $D_{esup}(t)$ es la descarga por evaporación de las superficies de agua libre de la laguna, K_e es un coeficiente de estanque (adimensional), igual a 0,7 de acuerdo al estudio de Harza (1978), K_s es un coeficiente de reducción por salinidad (adimensional),



que para una densidad de 1,045 kg/l (densidad del agua en las lagunas) es igual a 0,95 (Ide, 1978), E_T es la tasa de evaporación de tanque, medida en un evaporímetro clase A (estación meteorológica Chaxas) y A_l es el área de la laguna. La superficie de las lagunas es medida periódicamente por personal de CONAF, a través de estacas perimetrales (CONAF, 2002).

La descarga por evaporación que ocurre desde la napa subterránea, en las zonas aledañas a las lagunas, se estimó a través de la ecuación propuesta por Phillip (1957), que relaciona la tasa de evaporación con la profundidad a la cual se encuentra la napa, la que al multiplicarla por la superficie de la zona aledaña se expresa como:

$$D_{\text{esub}}(t) = E_0 \cdot \exp[-a \cdot (z)] \cdot A_{za} \quad (7)$$

donde $D_{\text{esub}}(t)$ es la descarga por evaporación desde la napa subterránea a una profundidad z [L], E_0 es la tasa de evaporación desde la superficie de agua libre, a [1/L] es un parámetro de ajuste y A_{za} es el área de la zona aledaña. La evaporación desde las zonas aledañas se realizó aplicando la ecuación (7) para cada profundidad de la napa medida.

La recarga por precipitaciones se calculó por medio de la expresión:

$$R_p = P_p \cdot A_d \quad (8)$$

donde $R_p(t)$ es la recarga por precipitaciones, P_p es la precipitación medida en la estación meteorológica Chaxas y A_d es el área del dominio completo considerado para cada laguna (Figura 3) y que para la laguna Chaxas es igual a 3.477.575 m², mientras que para la laguna Barros Negros es igual a 6.912.299 m².

4.1 Resultados

4.1.1 Caudales de Recarga

La Figura 4 presenta los caudales de recarga estimados para cada una de las lagunas. La recarga superficial presenta un comportamiento variable y cíclico, observándose aumentos entre los meses de abril y mayo. La recarga por precipitaciones es muy variable y depende de la ocurrencia de precipitaciones, que se presentan principalmente durante el verano, producto del invierno boliviano. La recarga subterránea de ambas lagunas no presenta efectos de la estacionalidad y se mantiene constante durante todo el período de monitoreo. El comportamiento estable de la recarga subterránea se explica por el efecto amortiguador de la evaporación, que estabiliza los niveles en las zonas marginales del núcleo.

4.1.2 Caudales de descarga

En la Figura 5 se presentan las series de caudales de descarga de las lagunas Chaxas y Barros Negros. La evaporación desde las zonas aledañas presenta fuertes aumentos producto del aumento de nivel de la napa en las zonas aledañas cuando ocurren precipitaciones. La evaporación desde la superficie libre de las lagunas es fuertemente cíclica y sigue el comportamiento estacional de la evaporación potencial.



La descarga superficial sólo ocurre en la laguna Chaxas y corresponde a la recarga superficial de la laguna Barros Negros, la que es mostrada en la Figura 4a).

4.2 Análisis de los resultados

En la Figura 6 se presenta el comportamiento de la superficie lacustre de las lagunas Chaxas y Barros Negros (CONAF, 2002). La superficie medida corresponde sólo a las superficies estables de las lagunas, es decir a las zonas lacustres que están siempre presentes y que sólo varían sus dimensiones. Existe una zona donde existen afloramientos sumamente inestables que no siempre están presentes durante la época de las mediciones. La laguna Barros Negros, entre Marzo de 1996 y Julio de 2000 presenta un comportamiento sin grandes variaciones; sin embargo, durante el mes de Enero de 2001, presenta una disminución de un 2,9%, que está relacionada con la disminución del caudal pasante en el puente San Luis (Figura 4). La laguna Chaxas muestra un comportamiento más irregular posiblemente influenciado por variaciones estacionales.

La Figura 7 muestra el comportamiento de las diferencias de altura de la columna de agua en las lagunas, de los niveles en el pozo de salmuera SOPM-7 situado en el núcleo de cloruro y el caudal superficial medido en el puente San Luis (estación de aforo). Se observa que el nivel de las lagunas no muestra una correlación con el comportamiento del nivel de la salmuera en ese pozo. En efecto, mientras los niveles de salmuera disminuyen sostenidamente en ese pozo (años 1997 a 2000), debido a la escasez de precipitaciones y bombeo de salmuera en el núcleo, los niveles en las lagunas presentan aumentos o se mantienen estables. A partir de marzo del año 2001, los niveles de la salmuera y de las lagunas se comportan de manera similar, reaccionando conjuntamente a las abundantes precipitaciones que cayeron durante los años 2001 y 2002.

Por otra parte, se puede apreciar que el comportamiento de las lagunas está fuertemente influenciado por los caudales de la recarga superficial. En la Figura 7, se observa que los niveles en las lagunas presentan un comportamiento similar al del caudal superficial, presentando aumentos y disminuciones de nivel similares al comportamiento del caudal superficial observado. La laguna Puilar, por su parte, que sólo recibe recarga subterránea se comporta sumamente estable, presentando sólo aumentos cuando existen abundante precipitaciones, como las ocurridas durante los años 2001 y 2002.

Las series de recargas y descargas estimadas se utilizaron para calcular un balance hídrico de las lagunas, el que es presentado en la Figura 8. Se puede apreciar que la principal recarga corresponde a la superficial, que representa un 74 % de la recarga total, si se consideran las tres lagunas como un sólo sistema. Este hecho confirma la dependencia que existe entre el comportamiento de las lagunas (superficies y niveles) y la recarga superficial. Por otra parte, se observa que la principal descarga ocurre por evaporación, tanto desde las lagunas como desde las zonas aledañas, alcanzando un 92 % de la descarga total, si se consideran las tres lagunas como un sólo sistema.



5 Conclusiones

Tanto el análisis de los niveles como el balance hídrico indican que la conexión hidráulica entre las lagunas y el núcleo del Salar es pequeña, lo que se explica por la existencia de una cuña salina que actúa como un borde impermeable que desconecta en gran medida al acuífero de salmuera que existe en el núcleo, de los acuíferos de agua dulce que lo recargan. La principal fuente de descarga de las lagunas es la evaporación, tanto desde la superficie libre como desde las zonas aledañas a ellas.

La principal recarga del Sistema Soncor lo constituye el canal Burro Muerto, por lo que el comportamiento de las lagunas se encuentra muy influenciado por su caudal. Por otro lado, la recarga subterránea se mantiene constante en el tiempo, lo que se explica por el efecto amortiguador de la evaporación, la que absorbe las variaciones en la recarga proveniente de los acuíferos superiores. Esto explica la estabilidad de los niveles de la columna de agua en la laguna Puilar, que no recibe aporte superficial, mientras que las lagunas Chaxas y Barros Negros presentan variaciones de niveles claramente influenciados por las variaciones del caudal de recarga superficial.

6 Referencias

- CONAF, "Monitoreo de Hábitat y Poblaciones de Avifauna del Salar de Atacama", Informe Técnico, Corporación Nacional Forestal, Ministerio de Agricultura, Chile, 2002, 24 pp.
- DOMENICO, P. y SCHWARTZ, F. 1990. Physical and Chemical Hydrogeology. John Wiley & Sons. New York, USA.
- DUFFY, Christopher y AL-HASSAN, Sumani. Groundwater Circulation in Closed Desert Basin: Topographic Scaling and Climate Forcing. *Water Resources Research*, 24(19): 1675-1688, October 1988.
- HARZA, Engineering Company International, "Desarrollo de los recursos hidráulicos en el norte grande, Chile", Informe Técnico, Proyecto CHI/69/535 United Nations, 1978, 126 pp.
- IDE, F. Cubicación del yacimiento Salar de Atacama. Tesis (Ing. Civil). Santiago, Chile, Universidad de Chile, 1978. 144 p.
- MARDONES Leonardo. Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. *El Litio, Un Nuevo Recurso Para Chile*, G. Lagos. Ed. Universitaria, Chile, 1986. pp 181-216.
- MARDONES, Leonardo. Flux Et Évolution Des Solutions Salines Dans Les Systèmes Hydrologiques Des Salars d'Ascotan Et d'Atacama. Tesis (Dr). Orsay, Francia, Univ. de Paris 11, 1998. 278 p.
- MAXEY, G. B. 1967. *Hydrogeology Of Desert Basins*. Symposium on Groundwater development in arid basins, March 16-17, Utah State Univ., Logan.
- PHILIP, J.R. Evaporation and Moisture and Heat Fields in the Soil. *J. Meteorol.*, 14: 354-366, 1957.
- SHUMM, S. The Fluvial System. John Wiley, New York, 1977.
- SNYDER, C.T. A hydrologic classification of valleys in the Great Basin, western United States. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 7(3): 53-59, 1962.
- TEJEDA, I., CIENFUEGOS, R., MUÑOZ, J.F., DURÁN, M. Numerical Modeling of Saline Intrusión in the Salar de Atacama. *Aceptado en Journal of Hydrologic Engineering of ASCE*.



TÓTH, J. A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta, Canada. *Journal of Geophysical Research*, 67(11): 4375-4387, October 1962.

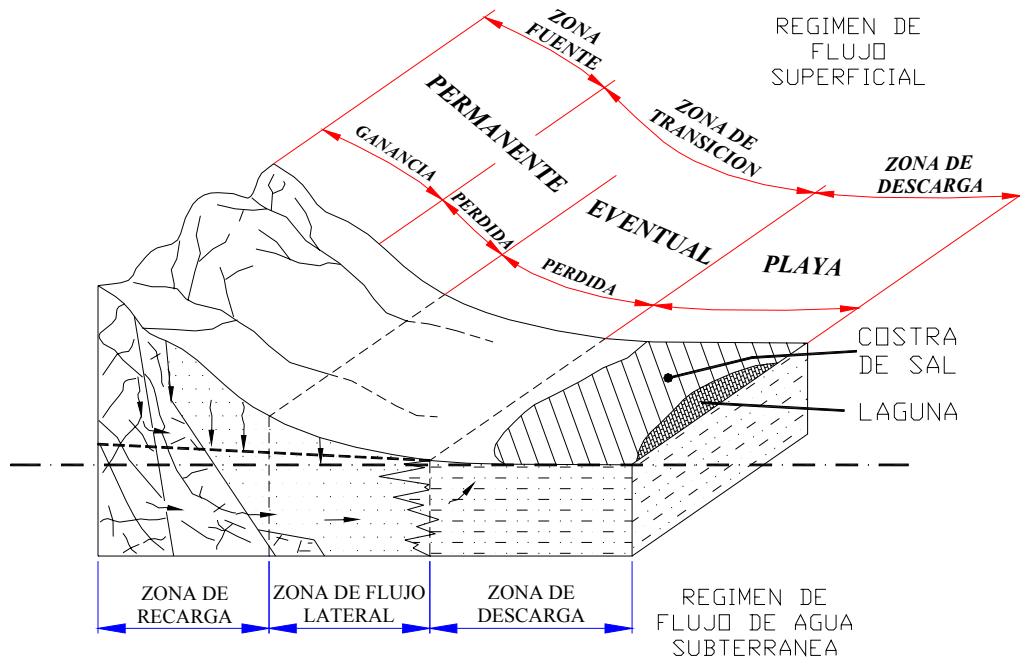


Figura 1. Esquema conceptual del flujo en una cuenca cerrada sin drenaje (Duffy y Al-Hassan, 1988).

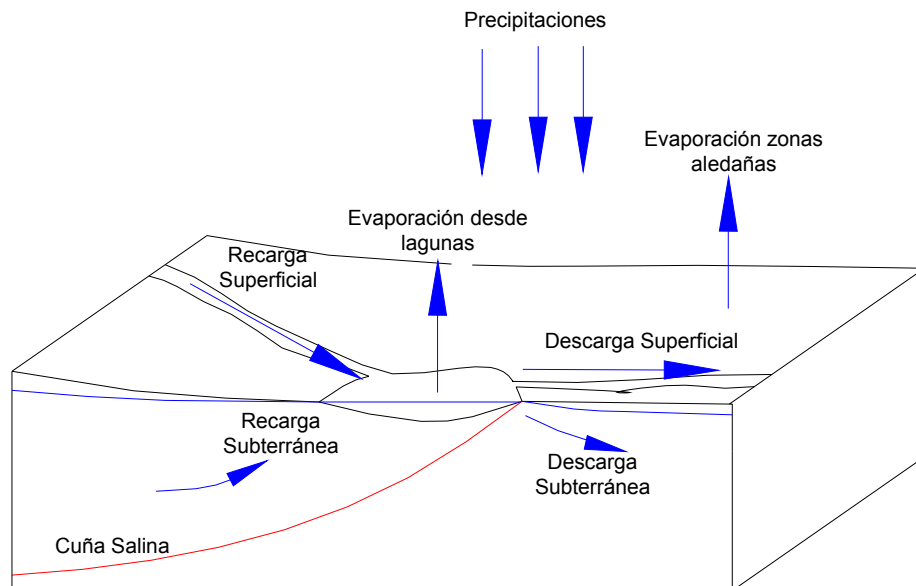


Figura 2. Esquema del funcionamiento hidrológico de una laguna en un salar.

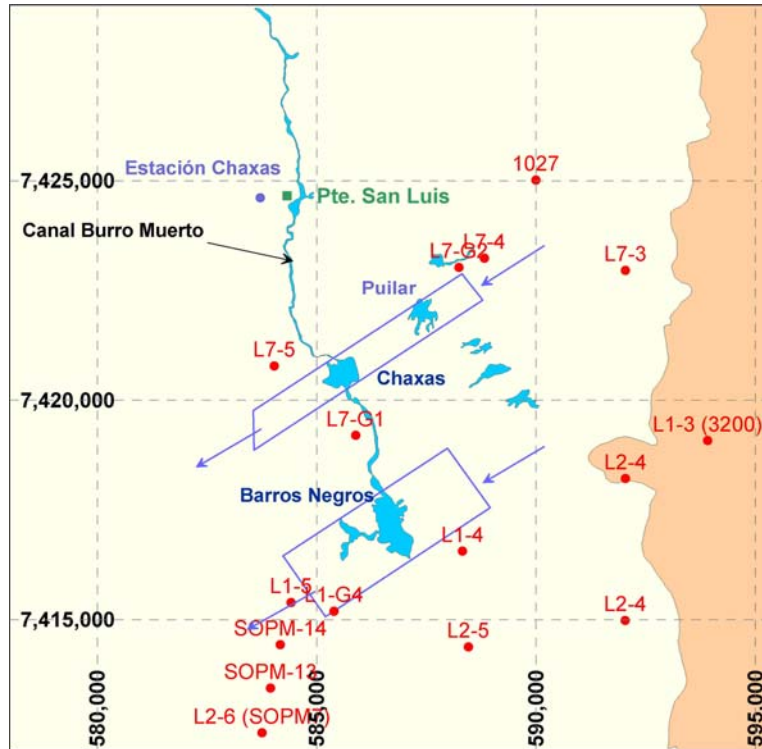


Figura 3. Estación meteorológica (punto azul), estación de aforo (punto verde), límites de zonas aledañas (rectángulos azules), direcciones de flujo (flechas azules) y pozos de monitoreo (puntos rojos) en el Sistema Soncor.

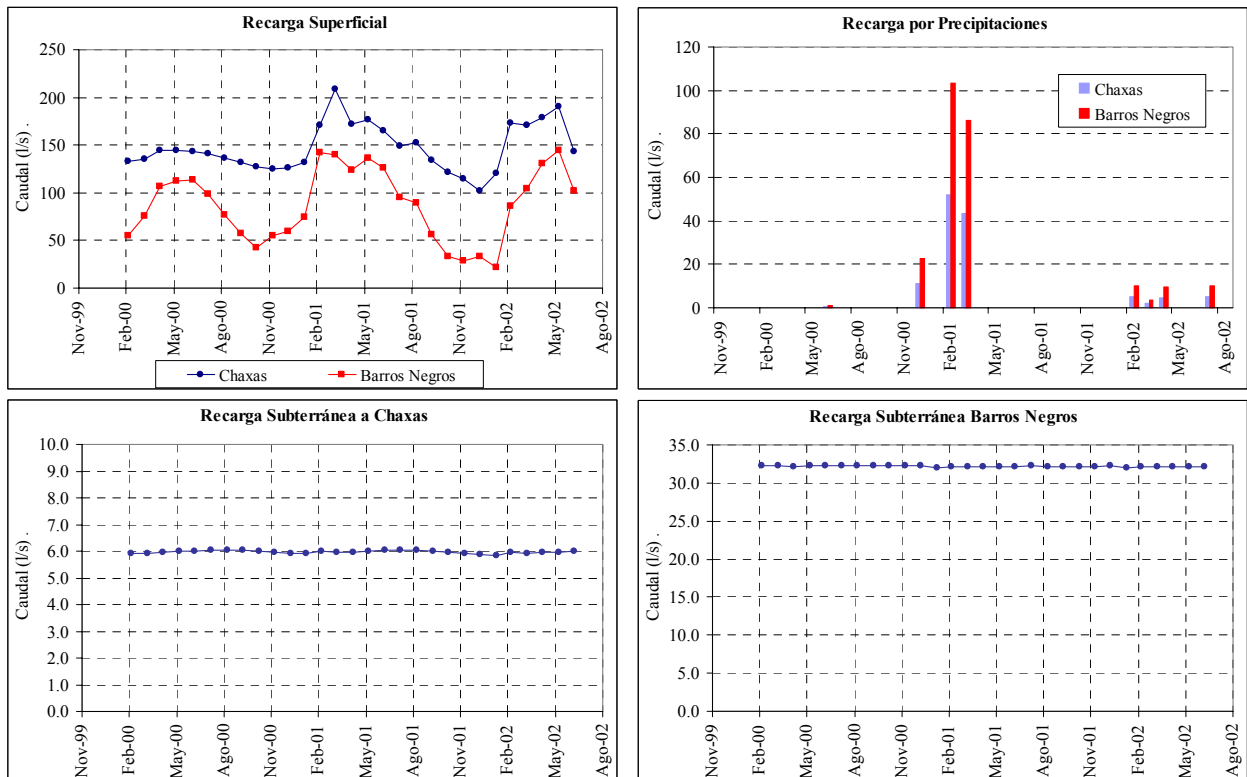


Figura 4. Series de caudales de recarga a las lagunas.

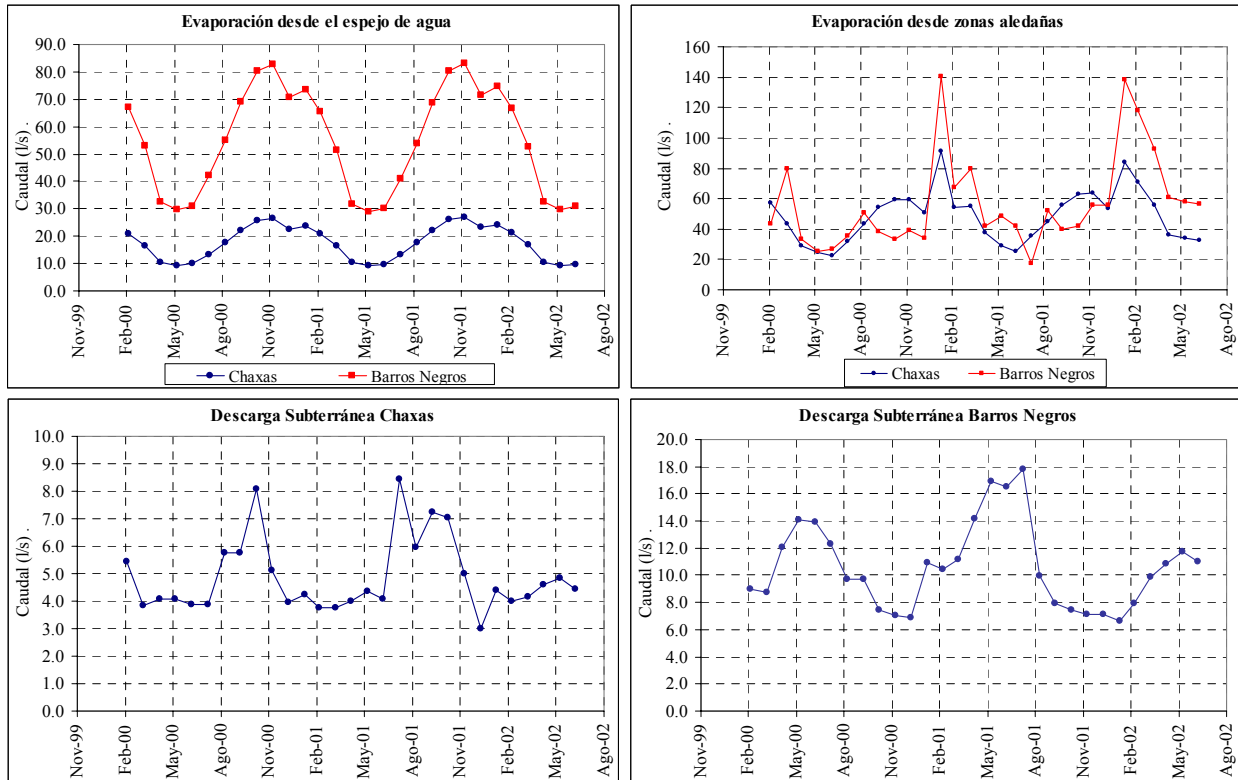


Figura 5. Series de caudales de descarga de las lagunas.

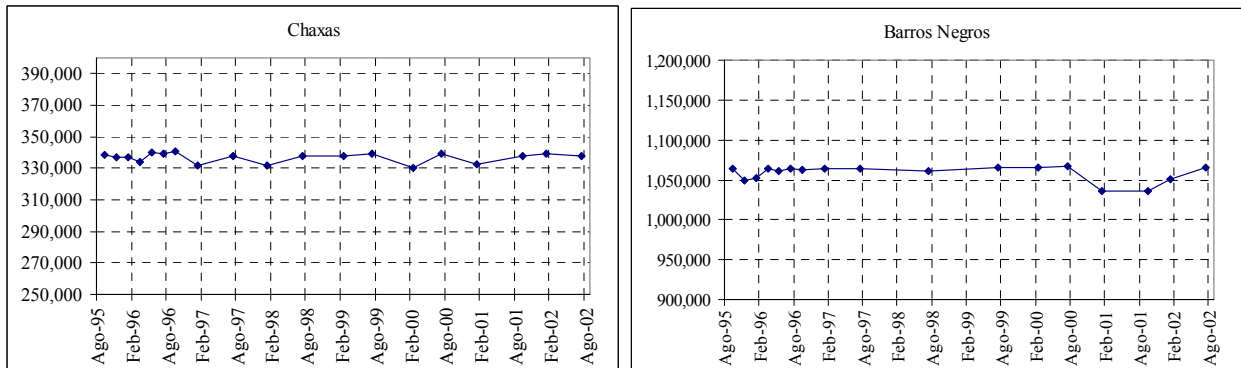


Figura 6. Comportamiento de la superficie de las lagunas del Sistema Soncor.

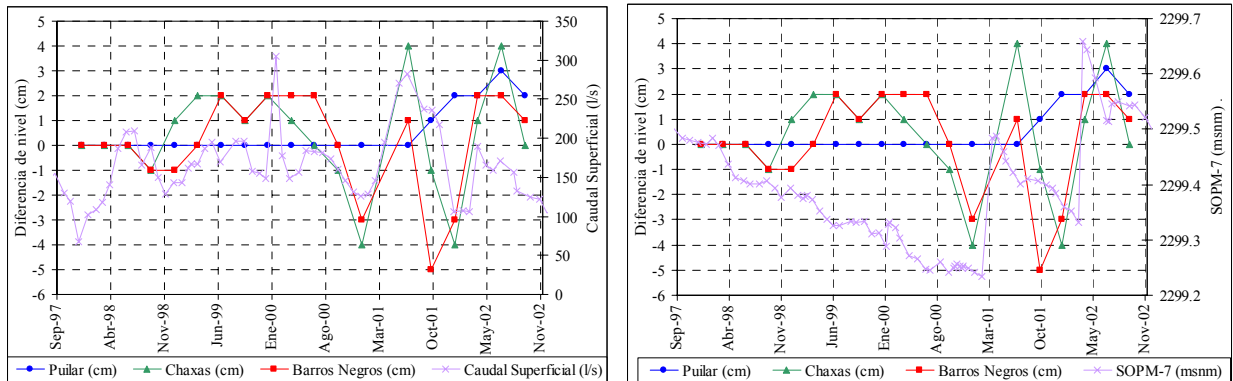


Figura 7. Comparación entre la variación de los niveles de las lagunas y los niveles de la napa adyacente y caudal superficial.

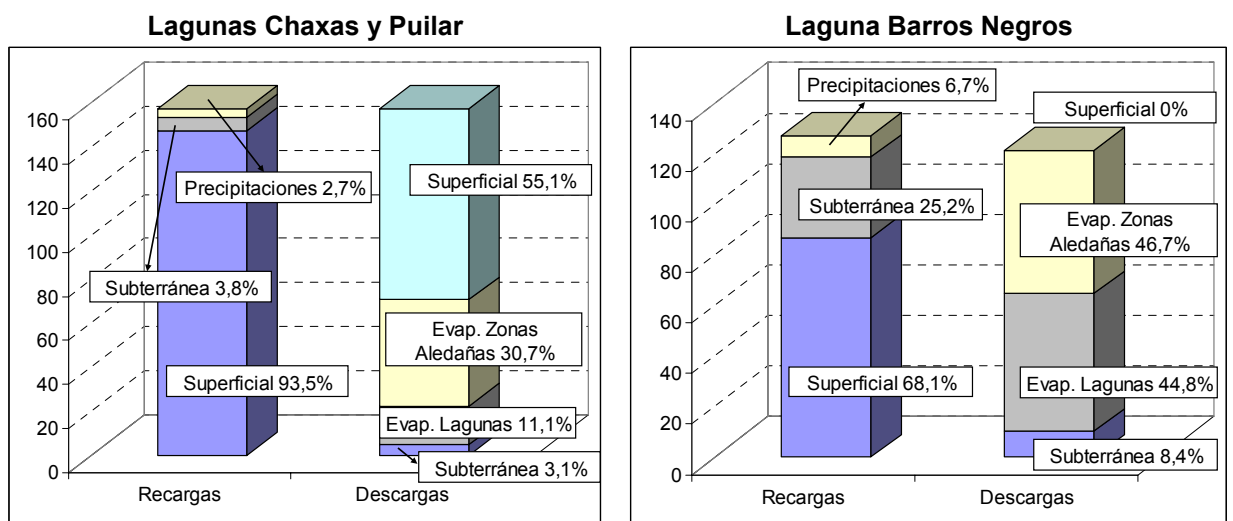


Figura 8. Balance hídrico del Sistema Soncor.