

# Estimación de la recarga al acuífero del Azul: 2. Balances de agua en el suelo y de deposición atmosférica de cloruro

Marcelo Varni<sup>1</sup> y Emilio Custodio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (UNCPBA – CIC – Municipalidad de Azul), República de Italia 780, (B7300) Azul, Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> Dept. Ingeniería del Terreno / Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España.

Mail de contacto: marcelovarni@gmail.com

---

## RESUMEN

En la cuenca del Arroyo de Azul, en la Provincia de Buenos Aires, se están realizando estudios para caracterizar la recarga al acuífero freático. Se trata de comparar los resultados del balance hídrico en el suelo con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. En esta segunda parte se analizan los ajustes obtenidos mediante el balance de agua en el suelo en 7 perforaciones instrumentadas con freatígrafos para determinar la recarga. Los valores obtenidos se comparan con los de recarga obtenidos mediante el balance de la aportación de cloruro. El balance de agua en el suelo proporciona valores medios de la recarga total por la lluvia, relativamente homogéneos en el área, de  $217 \pm 20$  mm/a, o sea de  $26 \pm 4\%$  de la precipitación media de alrededor de 820 mm/a para el periodo 2006–2011. El balance del cloruro de deposición atmosférica proporciona a valores netos de la recarga media, es decir la recarga por la lluvia menos la evaporación freática. Donde esa evaporación freática es despreciable, ambos métodos coinciden razonablemente, pero difieren notablemente en las otras áreas donde puede producirse esa evaporación.

Palabras clave: recarga de acuíferos, balance de agua en el suelo, deposición atmosférica de cloruros.

---

## ABSTRACT

In the Azul River basin, located in Buenos Aires Province, studies for characterize the groundwater recharge are in progress. In this work, soil water budget results with the atmospheric chloride deposition budget are compared. In this second part the fits obtained in 7 wells with phreatigraphic logs are analyzed for recharge determination. The obtained values are compared with the recharge obtained by the chloride deposition budget. The soil water budget yield mean values of the total recharge by precipitation, relatively homogeneous in the area, of  $217 \pm 20$  mm/y, or  $26 \pm 4\%$  of the mean precipitation of about 820 mm/y for the 2006-2011 period. The atmospheric chloride deposition budget give values of mean net recharge, this is, the recharge by precipitation less the water table evaporation. Where the water-table evaporation is negligible, both methods reasonably agree, but differ significantly in other areas where this evaporation occurs.

Keywords: groundwater recharge, soil water budget, atmospheric chloride deposition.

---

## Introducción

En la parte 1 de este trabajo se aportan los comentarios sobre la estimación de la recarga a los acuíferos y se resalta la importancia de contrastar los resultados de varias metodologías. Este es objetivo de este trabajo, que se enmarca dentro del proyecto REDESAC (CGL2009–12910), llevado a cabo el Instituto de Hidrología de Llanuras de Azul (IHLLA) como participante del proyecto del que son titulares la Universidad Politécnica de Cartagena, la Universidad de las Palmas de Gran Canaria y la Universidad Politécnica de Cataluña. Se compara el balance en el suelo calibrado con fluctuaciones freáticas con el balance de la deposición de cloruro atmosférico. La

metodología aplicada es la clásica, como se expone en Custodio (2010) y Alcalá y Custodio (2012) y en las referencias contenidas en esos trabajos. En el proyecto se aplica el método en ambientes muy diferentes en España, como el norte de la isla volcánica de Gran Canaria, la llanura arenosa litoral de Doñana (sudeste), el área de montaña y piedemonte del Baix Ebre (Plana de la Galera y Ports de Bsseit en el noreste) y en Argentina en la llanura preampeana continental del Arroyo de Azul (Buenos Aires), en ambientes desde subhúmedos a semiáridos. Primeros resultados han sido ya publicados (Varni et al., 2010 y 2011; Weinzettel et al., 2002).

## Funcionamiento hidrogeológico en la cuenca del arroyo del Azul

El área de la cuenca del Arroyo de Azul está descrita en la parte I y se desarrolla principalmente de Sur a Norte, desde una suave serrería hasta un área muy llana. En detalle, la parte superior del terreno no es homogénea y hay áreas más arcillosas y otras formaciones alargadas NO-SE más arenosas de origen eólico, muy arrasadas, que pueden ser áreas preferentes de recarga por su naturaleza y ligera mayor elevación.

Cabe distinguir dos sistemas extremos de flujo de agua subterránea. Uno es poco profundo, recargado localmente por la precipitación, que descarga en parte hacia los arroyos y zonas deprimidas cuando hay condiciones para ello, y hacia el final de cuenca, al norte, con una renovación rápida, posiblemente decadal. El otro es profundo y de carácter regional y transfiere la recarga en la parte sur hacia las áreas de descarga en la parte sur o más allá de la misma, con una lenta renovación, probablemente secular. Este sistema profundo parece haber contenido inicialmente agua salina marina en parte del mismo, que estaría siendo desplazada por la recarga actual. De ese modo las partes más altas del norte estarían ya total o parcialmente lixiviadas, pero cabe que en las del sur persistan aguas salinas relictas que estarían descargándose lentamente hacia el río Salado, posiblemente diluidas por las de recarga moderna, si es que no están totalmente lixiviadas, como lo parecen indicar los estudios en curso (Zabala et al., 2010).

El modelo conceptual aquí utilizado supone en que las zonas bajas del norte los niveles freáticos son poco profundos, al menos en una parte importante del territorio, donde es posible la evapotranspiración freática, actual o en épocas pasadas, por la vegetación primitiva o la evaporación freática donde la vegetación sea o haya sido escasa. No se dispone de cartografía adecuada para conocer estos detalles.

Aunque no hay suficientes datos para soportar en detalle el modelo conceptual expuesto, parece confirmarse con lo observado aquí y en otros lugares pampeanos. Esto es importante para la aplicación del cálculo de la recarga a partir de la deposición atmosférica del cloruro. Los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales están aún en curso.

### Fundamentos del cálculo de la recarga

El balance del agua en el suelo determina la recarga por diferencia entre la infiltración de la

precipitación y las salidas por evapotranspiración y escorrentía subsuperficial, considerando las variaciones de la humedad en la zona freática (Custodio et al., 1997).

Los balances de agua en el suelo se han realizado con el programa Visual Balan (Samper et al., 1999). Este programa realiza balances de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero, utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y post-proceso de resultados. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación, las salidas por escorrentía superficial, evapotranspiración, interceptación, flujo hipodérmico y flujo subterráneo, y la variación del contenido de humedad del suelo y de la zona no saturada y del nivel de agua en el acuífero. La evapotranspiración potencial diaria ha sido aportada externamente al programa y también ha sido calculada mediante el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), ya que los datos disponibles lo permiten. Los balances se han calibrado intentando ajustar los niveles freáticos simulados con los medidos, con especial atención a las recesiones.

Suponiendo ausencia de riego y de encharcamiento por aportes exteriores, y que no hay salida lateral por eventuales niveles colgados, el balance de masa de cloruro de deposición atmosférica en un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es (Custodio et al., 1997), en minúsculas para referirse a ese  $\Delta t$ :

$$a_p \equiv p \cdot c_p = es \cdot c_{ES} + r \cdot c_R + \Delta m \quad (1)$$

donde:

$p$  = precipitación

$a_p$  = deposición total de cloruro atmosférico

$es$  = escorrentía saliente

$r$  = recarga en tránsito (flujo bajo el plano de flujo nulo o la base de las raíces de las plantas)

$c_x$  = concentración de cloruro en el agua para cada una de las variables (para  $c_p$  es en muestras que incorporen la deposición seca, o aporte total)

$\Delta m$  = variación de masa de cloruro entre la superficie del terreno y un nivel algo por encima del nivel freático en el intervalo  $\Delta t$  y por unidad de superficie.

Los flujos se obtienen sumando a lo largo del tiempo (se expresan en mayúsculas), y una vez promediados se miden en volumen por unidad de tiempo (por ejemplo, mm/año) y las concentraciones en mg/l, por ejemplo. Se considera aquí que la recarga en tránsito poco por encima del nivel freático será similar a la recarga real y con poco retraso. Para una tasa de recarga de 200 mm/a, una profundidad del nivel freático de 2 m y una humedad media

volumétrica de 0,15, el tiempo medio de transferencia física es de 1,5 m y la respuesta hidráulica de pocos días.

La Ec. (1) puede escribirse en términos de flujo másico que llega al nivel freático

$$A_P = A_{ES} + A_R + \Delta M$$

En un sistema estacionario (sin tendencias de cambios climáticos o de uso de la tierra), si el tiempo de balance acumulado es grande,  $\Delta M$  tiende a ser despreciable y se puede trabajar con valores medios

$$\overline{A_P} = \overline{A_{ES}} + \overline{A_R}$$

En muchas circunstancias prácticas es una aproximación suficiente, considerando que los otros términos son de un orden de magnitud inferior. Entonces, considerando que

$$\overline{A_R} = \overline{R} \cdot \overline{C_R} :$$

$$\overline{R} = \overline{A_P} / \overline{C_R}$$

En el caso que aquí se considera parece ser que ES y  $A_{ES}$  puede que no sean despreciables, pero ante la falta de datos observacionales se toman como nulos en primera aproximación.

### Información y observaciones disponibles

#### Datos freáticos

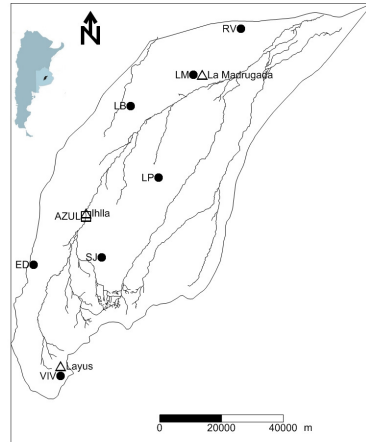
En el área de estudio existen 7 perforaciones someras, de alrededor de 6 m de profundidad, que penetran entre 2 y 3 m, aproximadamente en el acuífero freático. En dichas perforaciones se han instalado limnigrafos digitales con sensor piezoresistivo (marca Genica) para el registro del nivel freático. En la Figura 1 puede verse la ubicación de estas perforaciones en el área de estudio. Se cuenta con registros freáticos a lo largo de 4 años, entre el 1/10/2006 y el 30/09/2011. Estos pozos pertenecen a la red de monitoreo del IHLLA en la cuenca.

#### Datos pluviométricos

Los datos pluviométricos diarios disponibles se exponen la parte I de este trabajo. Se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Datos de las estaciones pluviométricas utilizadas. El periodo 2006–2011 es el de estudio

Estación	Precipitación media		Sondeos en los	
	Periodo	mm/a	Periodo	mm/a que se utiliza
TRAP	1969–2011	917,0	2006–11	820,8 VIV, ED
AZLL	1901–2011	907,5	2006–11	818,2 SJ
LB	1984–2011	974,1	2006–11	881,7 LP, LB, LM
LF	1959–2011	982,2	2006–11	889,8 RV



**Figura 1.** Ubicación de la ciudad de Azul, estaciones pluviométricas (círculos llenos) y de muestreo de cloruro en lluvia (triángulos).

#### Deposición atmosférica de cloruro

La lluvia se muestreó en 3 estaciones abiertas ubicadas aproximadamente según el eje de la cuenca: Layus al sur, en una ubicación asimilable a VIV, Ihlla, en la periferia de la ciudad de Azul, y La Madrugada al norte (Figura 1). La recolección de muestras se inició en marzo de 2010 y se completaron 6 muestreos, los 3 primeros cuatrimestrales y los 3 últimos semestrales, con un total de 30 meses, o sea 2,5 años. Se muestrea la deposición total, o sea la aportada por la lluvia más la de la deposición seca, y así se tiene en cuenta la posible recirculación por efecto eólico.

La deposición media anual de cloruro atmosférico de cada estación se calcula como

$$A^* = \sum_i C_i * P_i / \sum_i \Delta t_i$$

en la que para cada periodo de muestras  $\Delta t_i$ ,  $C_i$  y  $P_i$  son respectivamente la concentración en cloruros de cada muestreo y la precipitación acumulada. La concentración equivalente media de cloruro (incluyendo la incorporación de la deposición seca) es  $C = \sum_i C_i * P_i / \sum_i P_i$ .

Los resultados están en la Tabla 2. Se ha decidido descartar el dato de la estación Ihlla debido a su notable diferencia con las otras dos. Posiblemente es debido al efecto local de aporte adicional de deposición seca a las muestras por incorporación de polvillo generado por la circulación de vehículos por terreno no vegetado en el predio del Campus Universitario donde se ubica el muestreador. La cuenca se ha dividido

en 2 sectores, sur y norte, y se asigna un valor de deposición total atmosférica de Cl de 1,2 g/m<sup>2</sup>/a en el sur y 1,6 g/m<sup>2</sup>/a en el norte.

**Tabla 2.** Deposición atmosférica de cloruro y concentración media total en el agua de lluvia (incluyendo el aporte contenido en la deposición seca) en el periodo de muestreo (abril 2010 a mayo 2012).

Muestreador	Layus	Ihlla	La Madrugada
Deposición g/m <sup>2</sup> /a	1,2	2,4	1,6
Concentración total mg/L	1,3	2,6	1,6

### *Cloruro en las aguas subterráneas*

En los pozos en los que se registraron los niveles freáticos se realizaron muestreos periódicos de agua para la realización de análisis de los iones mayoritarios. En la Tabla 3 se muestran las concentraciones de Cl en mg/l obtenidas desde Abril de 2010 a Mayo de 2012, completando un total de 8 muestreos, aunque en varias de las perforaciones no se hayan realizado todos. Aparentemente existe estabilidad química ya que no hay valores discordantes en las series de datos en ninguno de los pozos.

Considerando que los pozos son someros, penetrando en el acuífero freático como máximo 3 m, en principio puede suponerse que representan al agua de recarga local. Por lo tanto, con los promedios de Cl en los pozos y en la precipitación se pueden estimar las recargas medias mediante el método de balance de masas de cloruro de deposición atmosférica para contrastar sus resultados con el balance de agua en el suelo, calibrado con las fluctuaciones de nivel en los mismos pozos.

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones anómalas observadas en algunos puntos no son ocasionales sino sistemáticas. Se trata de valores altos en RV, LP y LB, todos ellos en la cuenca baja, aunque el LM, también en la cuenca baja, tiene valores pequeños. La explicación está pendiente de un estudio hidrogeoquímico de detalle. Se puede hipotetizar que en unos sondeos, como el LM, no habría afectación salina por ser una zona de recarga preferente en pequeñas sobreelevaciones arenosas del terreno (Zárate y Mehl, 2010), mientras que en otros, en especial en el LB, las aguas freáticas podrían estar afectadas por fuerte evaporación o evapotranspiración freática de aguas actuales o

pasadas o de evaporación en encharcamientos de escorrentía de la cuenca. Localmente podría suceder que se trate de una ubicación inadecuada cercana a actividades antrópicas que aporten salinidad, aunque la estabilidad de los valores de las concentraciones a lo largo del tiempo no apuntan a ello. El pequeño coeficiente de variación del cloruro para las aguas más salinas indica menor influencia de la recarga, que se mezcla con una mayor masa de agua subterránea.

En la Tabla 4 se dan las características químicas básicas de los pozos muestreados. No se aprecian rasgos marinos y se manifiesta una importante incorporación litológica por meteorización, como lo muestra el alto contenido de HCO<sub>3</sub> (alta presión parcial de CO<sub>2</sub> en el suelo por elevada actividad biológica), un exceso de Na sobre Cl y un alto contenido en iones alcalinotérreos, además de un elevado contenido en F atribuible a la meteorización de intercalaciones de cenizas volcánicas de procedencia andina contenidos en los sedimentos acumulados.

No es de esperar que el proceso de meteorización añada Cl al agua, ni parece que haya un efecto antrópico importante ya que el contenido en NO<sub>3</sub> es moderado y los fertilizantes en general tienen una baja relación Cl/N y no hay un efecto visible de exceso de K aportado como KCl. La relación Cl/Br corresponde a la esperable en aguas continentales (Alcalá y Custodio, 2008). Excepto para LB, la relación SO<sub>4</sub>/Cl es muy superior a la marina (0,8 en meq/L) lo que indica aporte atmosférico en un ambiente sulfatado (polvo ambiental con arrastre yesoso de áreas secas), excepto para LM y RV en que parece dominar un efecto litológico añadido que se manifiesta al final de la cuenca.

Estas consideraciones hidrogeoquímicas son importantes para decidir si los valores de Cl observados en los pozos de control representan la recarga local.

Sin un estudio hidrogeoquímico e isotópico más completo y detallado, que en parte está en curso, no es posible discernir si existen aportes de Cl no atmosférico. Sin embargo, cabe interpretar en primera aproximación que las muestras de los pozos de observación ED, VIV, SJ y LM (este último en un área arenosa algo más elevada en la parte sur) pueden representar al agua de recarga, y los otros podrían ser el resultado de evaporación o evapotranspiración freática actual (aunque la profundidad freática parece ser algo elevada) o en momentos pasados, y posiblemente con

**Tabla 3.** Concentraciones de Cl (mg/l) en los muestreos de agua subterránea utilizados para obtener el contenido medio de Cl en el agua del pozo.

	VIV	ED	SJ	LP	LB	LM	RV
Abr-10	5,0	6,7		51,5	549		47,5
Ago-10	4,5	7,1		47,3	603		42,2
Dic-10	6,8	7,8		49,5	744	7,5	
Mar-11	4,9	8,1		40,2	595	7,3	
Jun-11	4,7	8,1	19,3	42,1	579		
Sep-11	6,0	8,5	21,3	37,4	576	9,2	45,1
Ene-12	6,3	7,2	18,1	35,4	599		
May-12		7,8	18,8		588	8,8	44,2
Promedio	5,4±0,8	7,7±0,5	19,4±0,3	43,3±6	604±20	8,2±0,6	44,8±0,5
Coef. Variac.	0,15	0,06	0,02	0,14	0,03	0,07	0,01

**Tabla 4.** Iones mayoritarios y F (ambos en mg/l), conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y pH de las aguas de los pozos estudiados. Estos valores son un promedio de todas las determinaciones realizadas de 2010 a 2012 en los pozos de observación.

	Área	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	F	CE	pH	rCl/rBr	rSO <sub>4</sub> /rCl
VIV	S	46	34	61	20	5,4	2	6	459	1,15	671	7,5	255	0,8
ED	S	64	26	40	21	7,5	29	9	397	0,67	645	7,4	214	0,9
SJ	S	38	21	90	18	19,3	15	11	425	0,93	717	7,6	384	0,4
LP	C	47	29	202	26	42,3	27	54	649	1,23	1209	7,5	393	0,9
LB	CN	78	67	743	27	584	22	619	702	1,26	3627	7,5	748	0,8
RV	N	39	368	293	34	43,8	6	131	860	1,07	1539	7,7	382	2,2
LM	N	50	22	86	27	8,2	4	32	456	0,68	734	7,5	277	3,0

lixiviación de sales yesosas depositadas en los sedimentos en épocas más áridas.

## Resultados

### Balance de agua en el suelo

En la Figura 2 se muestran los ajustes obtenidos en VIV, SJ y ED, en la Figura 3 los realizados en LP, LM y LB y en la 4 los en RV. Los resultados se resumen en la Tabla 5. En general se trata de ajustes razonables, pero con algunas anomalías en cuanto a cómo reaccionan los niveles freáticos a la precipitación. Este efecto parece debido a las variaciones espaciales de la precipitación, que son objeto de la parte I de este trabajo, ya que las estaciones no están al mismo lugar que los puntos de medidas freáticas. La tendencia general y amplitud de las fluctuaciones

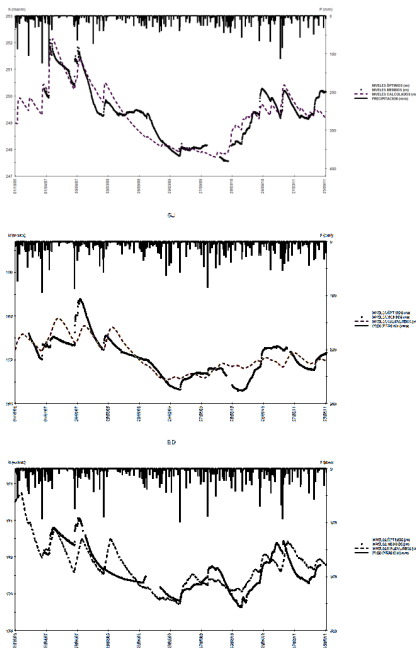
simuladas son similares a las observadas. Resultan recargas en el periodo de estudio, que es de pluviometría algo menor que la media, entre 191 y 263 mm/a, expresable por  $217 \pm 20$  mm/a, o sea del 21% al 30% de la precipitación, expresable por  $26 \pm 4\%$ .

### Balance del cloruro de deposición atmosférica

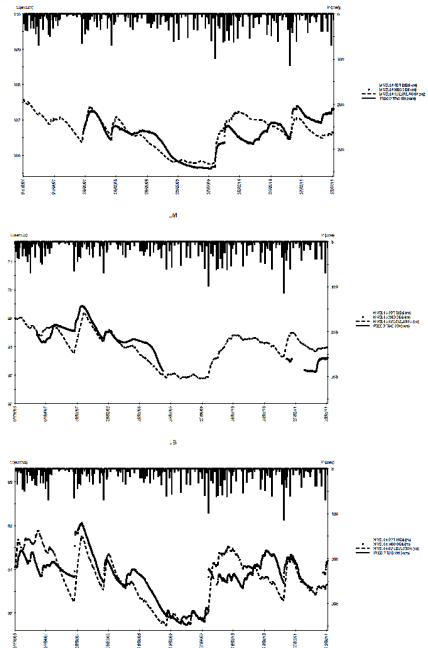
Se han adoptado los 2 valores regionales de concentración equivalente de cloruro para la lluvia antes indicados, uno para la zona norte y otro para el sur. Las estaciones de muestreo de lluvia se ubican en LM, en la zona norte, y otra muy próxima a VIV, al sur (Figura 1). Los resultados se reúnen en la Tabla 6.

**Tabla 5.** Resumen de los resultados de los ajustes de los balances del agua en suelo. Aclaraciones: S = sur; C = centro; CN = centro–norte; N = norte  
ECM = error cuadrático medio, EM = error medio  
 $\bar{R}$  = recarga media calculada en el periodo; P = precipitación media

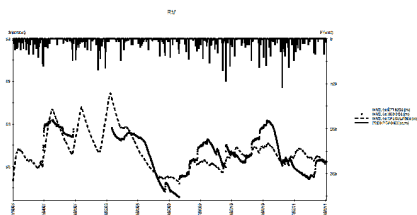
Punto	Área	$\bar{R}/P$	$\bar{R}$ (mm/a)	ECM(m)	EM(m)	Ajuste	Anomalías
VIV	S	24,4	200	0,41	0,003	Bueno	2008
ED	S	23,6	194	0,36	-0,049	Medio	2008, 2010
SJ	S	28,9	236	0,23	-0,048	Medio	en 2 <sup>a</sup> mitad periodo
LP	C	23,3	205	0,32	-0,015	Bien	en 2 <sup>a</sup> mitad periodo
LB	CN	23,4	206	0,38	0,047	Bien	2010
LM	N	21,7	191	0,44	0,057	Medio	sin registro intermedio
RV	N	29,6	263	0,30	0,031	Pobre	ascensos bien reproducidos



**Figura 2.** Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en VIV, SJ y ED. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01–11–06 y 25–09–11.



**Figura 3.** Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en LP, LM y LB. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01–11–06 y 25–09–11.



**Figura 4.** Niveles simulados (puntos negros) y medidos (línea a trazos), y precipitaciones diarias (barras) en RV. Los niveles están en m y las precipitaciones en mm. El borde superior de cada gráfico coincide con el nivel del terreno; las fechas varían entre 01-11-06 y 25-09-11.

## Discusión

El balance del agua en el suelo proporciona resultados de la recarga media que son homogéneos sobre el área, con una variación espacial de  $26 \pm 4\%$  de la precipitación.

Comparando los resultados de los dos métodos, el del balance del agua en suelo y el del balance de la deposición atmosférica de cloruro, se tienen resultados comparables aunque algo menores para los puntos VIV y ED en la zona alta (sur) y LM en una franja NO-SE más arenosa del norte. En cambio en los otros lugares el método del cloruro proporciona valores notablemente menores, o incluso despreciables para el punto LB, al final de la cuenca. Caben dos interpretaciones, 1) que el Cl del agua subterránea tenga aportes no atmosféricos, lo que parece poco probable hidroquímicamente, y 2) que se trate de áreas de notable evaporación freática en las que el agua subterránea se concentra, y lo hace de forma muy notable en el punto LB. En este segundo caso el balance de cloruros indicaría una recarga neta, es decir la producida por la lluvia menos la evaporación/evapotranspiración freática, mientras que el método de balance en el suelo calcula la recarga total por la lluvia.

En la aplicación del método del balance de cloruro de aportación atmosférica se ha considerado que el término de escorrentía superficial es despreciable frente al de aporte atmosférico y el de recarga. Esta hipótesis es débil y no se tiene datos para valorarla. La escorrentía superficial directa y subsuperficial parece que en efecto es pequeña según el conocimiento del área, pero no son nulas y no se conoce el flujo de Cl que pueden evacuar. Si las concentraciones son similares a la de la lluvia el error cometido es pequeño pero si en momentos de lluvia hay disolución de sales almacenadas temporalmente sobre el suelo y una descarga generalizada de agua subterránea por elevación de niveles hasta cerca de la superficie, ese término puede ser significativo, en cuyo caso el valor de R calculado sería menor. No parece que sea este el caso dada la similitud de resultados en los puntos VIV, ED y LM.

Los cálculos realizados tienen una notable incertidumbre asociada, que aún no se ha evaluado. Es una tarea a realizar próximamente, así como un estudio hidrogequímico e isotópico ambiental –en parte en curso– para determinar si hay aportes no atmosféricos de Cl y verificar la plausibilidad de la hipótesis de concentración por evaporación / evapotranspiración freática.

## Conclusiones

Los métodos del balance de agua y el suelo y del balance del cloruro de deposición atmosférica proporcionan resultados similares, algo menos para el segundo, cuando no se produce evaporación o evapotranspiración freática. Pero cuando esta evaporación o evapotranspiración freática es notable los resultados difieren ya que el primer método proporciona la recarga total por la lluvia y el segundo la recarga neta, es decir descontando la salida freática hacia la atmósfera.

**Tabla 6.** Para cada pozo se dan los valores de la concentración de cloruro en el acuífero, representado al de recarga ( $Cl_R$ ) y la equivalente en la precipitación ( $Cl_P$ ), y de R/P, y se añaden los resultados del balance de agua en el suelo (S = sur; C = centro; CN = centro-norte; N = norte).

Lugar	Área	Balance de cloruro atmosférico				Balance en el suelo	
		$Cl_R$ (mg/L)	$A_P$ g/m <sup>2</sup> /a	R mm/a	R/P %	Rmm/a	R/P %
VIV	S	5,4	1,2	222	24,1	200	24,4
ED	S	19,4	1,2	62	6,7	194	28,9
SJ	S	7,7	1,2	166	16,9	236	23,6
LP	C	43,3	1,6	37	3,7	205	23,6
LB	CN	8,2	1,6	195	19,5	206	21,7
LM	N	44,7	1,6	36	3,6	191	23,4
RV	N	605	1,6	3	0,3	263	29,6

La recarga media por la lluvia relativa la precipitación es relativamente homogénea en el área y vale  $217 \pm 20$  mm/a, o sea  $26 \pm 4\%$  de la precipitación para el periodo estudiado (2006–2011).

En el área baja de la cuenca, en el sur, la evaporación o evapotranspiración freática tienen importancia, salvo en franjas medanosas arrasadas.

Estos resultados han de filtrarse a través de una mejora del modelo hidrogeológico mediante estudios hidrogeoquímicos e isótopos ambientales más avanzados y contextualizarse al estimar que error tienen asociados.

## Agradecimientos

El trabajo se ha realizado en el marco del proyecto MICIN (actualmente MINECO) CGL2009–2910 REDESAC, financiado por el Gobierno Español y cuyo objetivo es el estudio de procesos de recarga y descarga a acuíferos mediante trazadores naturales.

## Referencias

- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* 359: 189–207.
- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2012. Spatial average aquifer recharge through atmospheric chloride mass balance and its uncertainty in continental Spain. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.9556.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper N° 56. FAO. Rome, Italy, 300 pp.
- Custodio, E. 2010. Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride

- deposition balance. *Contributions to Science*, 6(1): 81–97.
- Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (eds.) 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Instituto Tecnológico Geo-Minero. Madrid.
- Samper, J., Huguet, L. y García Vera, M.A. 1999. *Manual de usuario del programa Visual Balan v. 1.0*. Publicación Técnica 05/99, ENRESA, Madrid, 124 p.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. 2010. Análisis de 18 años de registros diarios de nivel freático en la zona central de la cuenca del arroyo de Azul, Buenos Aires, Argentina. En: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (Eds.), *Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul: 209–215.
- Varni, M., Comas, R., Weinzettel, P. y Dietrich, S. 2011. Análisis preliminar de registros freaticográficos en la Cuenca del arroyo de Azul, Provincia de Buenos Aires. En: *VII Congreso de Hidrogeología*. Salta: 190–197.
- Weinzettel, P., Usunoff, E. y Vives, L. 2002. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. En: *XXXII IAH & VI ALHSUD Congress*. Mar del Plata.
- Zabala, M.E., Manzano, M. y Vives, L.S. 2010. Estudio preliminar del origen del fondo químico natural de las aguas subterráneas en la cuenca del arroyo de Azul. En: Varni, M., Entraigas, I. y Vives, L. (Eds.), *Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul: 249–256.
- Zárate, M. y Mehl, A. 2010. Geología y geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina. En: M. Varni, I. Entraigas y L. Vives (eds.), *Hacia la Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Zonas de Llanura*. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul: 65–78.