

BALANCE DE SALES A LARGO PLAZO EN EL REGADÍO DE FLUMEN (MONEGROS I, HUESCA)

Isidoro, D.¹, Dechmi, F.²

Investigadores, Unidad de Suelos y Riegos (Unidad Asociada EEAD-CSIC), Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA), Avda. Montañana 930, 50059-Zaragoza. ¹ disidoro@aragon.es; ² fdechmi@aragon.es

Resumen

La sostenibilidad ambiental y económica del regadío requiere el mantenimiento de un balance de sales adecuado en las zonas regables que evite la salinización de los suelos regados. El objetivo de este trabajo es establecer una metodología que permita establecer la dinámica de las sales de la zona regable del Flumen (Huesca) y determinar su contribución a la salinidad del río receptor a lo largo de un periodo de 16 años. Para ello, se identificaron los términos del balance de agua y de sales asociadas y se calculó la masa de sales extraída de la zona regable y su evolución temporal.

Los resultados indicaron que el lavado de sales se produjo principalmente durante la estación de no riego (66% de las sales exportadas), mientras que en los meses centrales de la estación de riego la salida de sales fue ligeramente inferior a las entradas. El lavado de los suelos parece limitado durante la estación de riego por el aumento del nivel de agua en los barrancos que impide un buen drenaje de los suelos y por lo tanto la exportación de sales. Se observó una tendencia anual significativa a la disminución de las sales exportadas con el tiempo, especialmente fuerte en los meses de julio y agosto. La masa de sales exportada está relacionada linealmente con el volumen de agua que llega a los suelos regados (riego y precipitación) y con la superficie cultivada de maíz y arroz.

Abstract

The environmental and economic sustainability of irrigation requires keeping an adequate salt balance in the irrigated areas to avoid soil salinization. The objective of this work is to establish a methodology for the determination of the salt dynamics in the Flumen irrigated area and to determine its salt contribution to the receiving water body during a period of 16 years. To this end, the terms of the water and salts balances were identified and the salt mass exported from the system was calculated along with its temporal trends. Results showed that salt leaching took place mainly during the non irrigation season (66% of the exported salt load), whereas in the central months of the irrigation season the salts output was slightly lower than the salts input. Soil leaching looks limited during the irrigation season by the increase of the water level in the drainage canals that limit subsurface flow and therefore the salts exportation. A significant annual decreasing trend was observed in the exported salt loads, especially in July and August. The exported salt load was related linearly to the volume of water applied to the irrigated soils (irrigation and precipitation) and with the cultivated surface of corn and rice.

1- Introducción y Objetivos

La continuidad de la práctica del riego con unos rendimientos económicos suficientes (la sostenibilidad ambiental y económica del regadío) requiere el mantenimiento de un balance de sales adecuado en las zonas regables, mediante un drenaje que garantice al menos el lavado de las sales aportadas con el riego y la precipitación y prevenga así la salinización de los suelos. En zonas áridas y semiáridas, frecuentemente con presencia de suelos y materiales geológicos salinos, ese drenaje puede arrastrar cantidades importantes de sales desde las zonas de regadío, contribuyendo a la salinización de los cuerpos de agua receptores cuya calidad también es un recurso importante a preservar.

Las series largas de información hidrológica (cantidad y calidad del agua) recogida por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) permiten establecer el balance de agua a largo plazo en grandes cuencas de regadío y si se está produciendo un lavado neto de sales de los mismos. Esta información de largo recorrido permite además determinar la contribución salina de los retornos de riego y establecer si hay tendencias en los balances de sales y asociarlas con los cambios en el uso del suelo.

El río Flumen, en la estación de la red de Control de Calidad del Estado de las Masas de Agua Superficiales (red CEMAS) de Sariñena (aguas abajo de los regadíos de Monegros I localizados en su cuenca), es precisamente el que muestra un descenso más acusado de su concentración salina en los últimos años (1975-2004) en la cuenca del Ebro, en contraste con el ascenso registrado en los colectores de otras zonas de regadío como el río Arba (CHE-CITA, 2007). Este descenso de la salinidad en las aguas de drenaje puede corresponderse con el descenso de la salinidad (y de la sodicidad) observado en los suelos del Flumen (la misma zona de estudio que este trabajo pero solo en la margen izquierda del río Flumen) para el periodo 1975-1999 por Herrero y Pérez-Coveta (2004).

Por otro lado, la salinidad de los suelos del regadío del Monegros I es un problema conocido desde antiguo: Herrero y Aragüés (1988) calcularon que el 47% de los suelos de Flumen (la zona de estudio de este trabajo en la margen izquierda del río Flumen) y el 17% de los suelos de los tramos II y III de Monegros (la margen derecha) estaban afectados por salinidad o sodicidad. La salinidad en los suelos de Flumen reduce su productividad potencial hasta el punto que Nogués et al. (2000) aconsejan el abandono del regadío en el 59% del área y la sodicidad ha dado lugar a que el arroz se convierta en la mejor alternativa en suelos que han perdido su permeabilidad (Herrero y Snyder, 1997). Determinar la masa de sales que se está lavando del sistema regado puede ayudar a entender la evolución de la salinidad en el conjunto del sistema, y en particular en los suelos, el principal problema del regadío de la zona.

El objetivo de este trabajo es precisamente establecer una metodología que integre todos los datos disponibles, y determinar la contribución neta de sales de la zona regable del Flumen (Huesca) al río receptor (Alcanadre), las condiciones en que se está produciendo ese drenaje (particularmente su estacionalidad) y la evolución del balance de sales en relación con las prácticas culturales en el regadío; a lo largo de un periodo de 16 años.

2- Materiales y Métodos

Definición del sistema

En este trabajo se ha llevado a cabo el balance de sales de la zona regable de la cuenca hidrográfica del río Flumen aguas arriba de la estación de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) del Flumen en Albalatillo (nº 094) para los años hidrológicos (de octubre a septiembre) 1992-93 a 2007-08. La zona de estudio comprende los regadíos del sistema de Riegos del Alto Aragón (RAA, Monegros I,

Huesca) limitados por el Canal del Cinca al N, el Canal de Monegros al SW y el límite de la cuenca del río Flumen al E (Fig. 1). El volumen de control del balance (el sistema) lo constituyen los suelos y el acuífero superficial que drena hacia el río Flumen bajo la superficie de la zona de estudio, puesto que se asume que el flujo hacia acuíferos más profundos (que no drenan hacia el río Flumen) es limitado en comparación con el drenaje del río Flumen, dada la escasa permeabilidad de los materiales geológicos subyacentes (Quirantes, 1978).

La zona de estudio incluye 44 comunidades de regantes con una superficie regada media en los años de estudio de 38691 ha de un total de 45316 ha regables. La superficie de cada cultivo en regadío se obtuvo para cada término municipal a partir de las Hojas 1T del MARM para los años 1993 a 2008 (período con datos sobre volúmenes de riego disponibles). La superficie regada de todos los municipios considerados se encuentra esencialmente dentro de la zona de estudio.

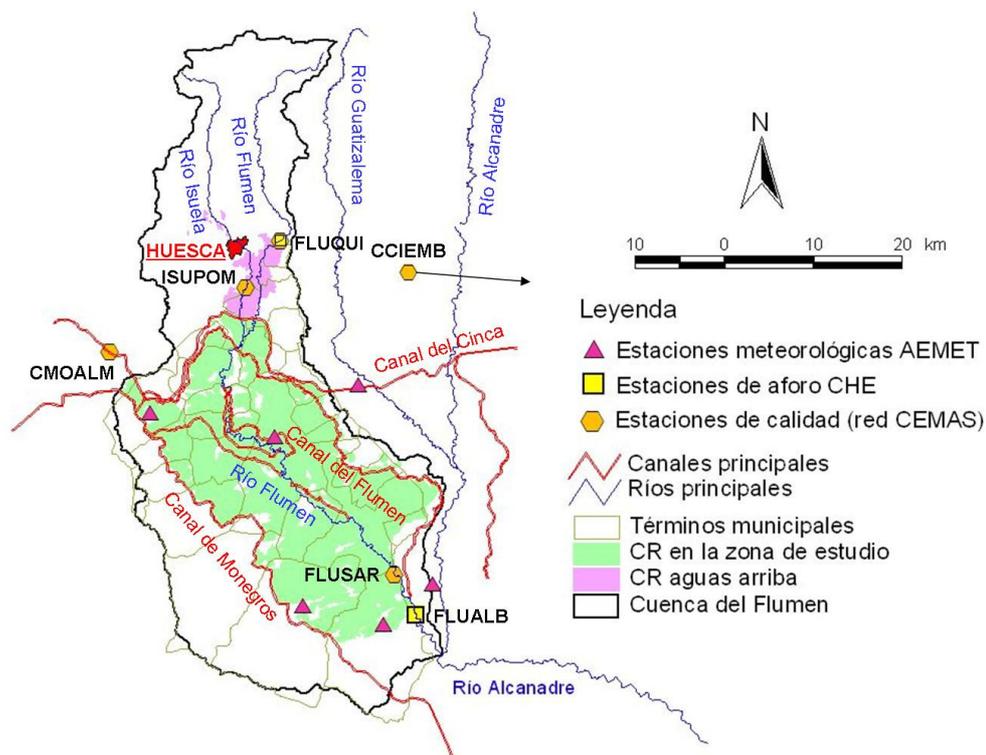


Figura 1. Mapa de la zona de estudio con la ubicación de las estaciones de aforo y de la red CEMAS (FLUALB: Flumen en Albalatillo, FLUSAR: Flumen en Sariñena, FLUQUI: Flumen en Quicena, ISUPOM: Isuela en Pompenillo, CMOALM: Canal de Monegros en Almudévar y CCIEMB: Canal del Cinca en el Embalse de El grado).

Balance de agua

Los términos utilizados para el balance de agua han sido: las entradas de agua de riego (R) y por precipitación (P) sobre el área regada, las entradas laterales de los ríos Flumen e Isuela a la zona regable (Q_e) y las salidas de drenaje por el río Flumen (Q) y por evapotranspiración de la zona regable (ET), con lo que el incremento de agua en el sistema ΔW (diferencia entre las entradas y salidas en un determinado periodo) toma la forma siguiente:

$$\Delta W = R + P + Q_e - (Q + ET)$$

En este trabajo se han calculado los términos R, P, Q y Q_e , con lo que la diferencia $R + P + Q_e - Q$ corresponde con $ET - \Delta W$ (ET menos el volumen de agua almacenado en el sistema).

Los volúmenes mensuales de riego (R en Mm^3) fueron facilitados por la oficina de Huesca de la CHE para cada una de las comunidades de regantes de la zona de estudio. Las zonas regables a lo largo de los ríos Isuela y principalmente Flumen y al N del Canal del Cinca (9 comunidades, con una superficie total de 2818 ha) no se consideraron porque no pertenecen al sistema de Riegos del Alto Aragón (RAA) y no se pudieron obtener los volúmenes de agua servidos.

La comunidad de regantes del Sector XI del Flumen (de 3345 ha; en Sariñena) está incluida sólo parcialmente (52%) dentro de la zona de estudio, pero no se disponía de una información más detallada sobre el volumen de riego correspondiente a la cuenca del Flumen. Por ello se decidió incluirla completamente en el estudio, compensando así en parte el riego de las superficies no incluidas aguas arriba de la zona regable de RAA.

La precipitación sobre la zona se obtuvo como la media de las P de las 6 estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) ubicadas dentro de la zona regable (o muy próximas) con registros más completos [Lanaja (9908 A), San Juan de Flumen (9908 O), Sariñena (9894 B), Sesa (9891), Tardienta (9903 B) y Grañén (9903 O)] para el periodo 1993-2006. En 2007 y 2008, la P se calculó como promedio de las P de las 5 estaciones de la red SIAR ubicadas dentro de la zona (Grañén, Lanaja, Sariñena, Sodeto y Tardienta; MARM, 2011). Algunos datos diarios de P perdidos en las series de AEMET se estimaron por regresión sobre los valores de las otras estaciones disponibles. Las precipitaciones en mm/mes se transformaron en volúmenes mensuales multiplicando por la superficie regada en cada año hidrológico dentro de la zona de estudio (obtenida como suma de las de cada comunidad):

$$P (Mm^3 \cdot mes^{-1}) = P (mm \cdot mes^{-1}) \cdot S_{regada} (ha) \cdot 10^{-5}$$

Las entradas laterales (Q_e) corresponden a los caudales de los ríos Flumen e Isuela provenientes del Norte de la zona regable (Fig. 1). Como entradas del río Flumen se tomaron los caudales diarios de la estación de aforos del río Flumen en Quicena (nº 190), 10 km aguas arriba de los Riegos del Alto Aragón, de la red de aforos de la CHE (CEDEX, 2011). Como no existe una estación de aforo en el río Isuela, sus entradas se estimaron a partir de las entradas mensuales del Flumen. Puesto que el régimen hidrológico de ambos ríos es muy similar (ambos proceden de la Sierra de Guara, apenas 30 km aguas arriba de la estación del Flumen en Quicena y sus cuencas son adyacentes y muy similares), se asignó al Isuela un caudal proporcional al del Flumen según sus superficies más los retornos de la estación depuradora de Huesca (Q_{DH}) facilitados mensualmente por el Instituto Aragonés del Agua desde enero de 2004 (para los años anteriores se tomó el Q_{DH} mensual medio de los años 2004 y 2005, claramente superior al de los años siguientes):

$$Q_{Isuela} (Mm^3 \cdot mes^{-1}) = (S_{Isuela}/S_{Flumen}) \cdot Q_{Flumen} (Mm^3 \cdot mes^{-1}) + Q_{DH} (Mm^3 \cdot mes^{-1})$$

donde S_{Isuela} y S_{Flumen} son las superficies de las cuencas del Isuela aguas arriba de Pompenillo y del Flumen aguas arriba de Quicena, respectivamente ($S_{Isuela} = 14198$ ha y $S_{Flumen} = 15742$ ha).

Las salidas del sistema calculadas (Q) se corresponden con el caudal en la estación de Flumen en Albalatillo (nº 094 de la CHE), que se obtuvo de la red foronómica de la CHE (CEDEX, 2011). Algunos valores diarios perdidos se estimaron

por interpolación entre los anteriores y posteriores o por regresión sobre los caudales diarios de la estación del Flumen en Barbués (nº 191).

Este balance de agua es necesariamente una simplificación de la situación real dada la escala de trabajo y la disponibilidad de datos. Entre las limitaciones del enfoque adoptado están: (i) que la superficie no regada dentro de la zona de estudio no contribuye al caudal del río Flumen; (ii) que no existen más aportes de escorrentías exteriores que las medidas en el río Flumen en Quicena y las estimadas en el río Isuela; (iii) que no se tiene en cuenta otras entradas menores como aportes y filtraciones de los canales; y (iv) que no se considera la percolación hacia niveles acuíferos más profundos.

Balance de sales

El balance de sales simplificado (BS) toma la forma siguiente:

$$BS = MS_R + MS_P + MS_{Q_e} - MS_Q$$

donde las masas de sales (MS) aportadas por cada término del balance de agua se calculan como el producto de su volumen por su concentración. El BS equivale a la masa neta exportada de la zona regable cambiada de signo ($MS_{neta} = - BS$).

El término más importante del balance, la masa de sales de salida de la zona (MS_Q), se calculó diariamente como el producto del caudal medio diario (Q_d) por su concentración (sólidos disueltos totales, SDT):

$$MS_Q \text{ (Mg}\cdot\text{d}^{-1}) = 0.0864 \cdot \text{SDT (mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot Q_d \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1})$$

Los datos de concentración del agua de salida (Q) se obtuvieron de la estación de la red CEMAS de Flumen en Sariñena (nº 227), 6 km aguas arriba de la estación de aforo de Flumen en Albalatillo (CHE, 2011). Las estaciones de la red CEMAS recogen datos mensuales de CE y cada pocos meses de concentraciones iónicas. En los meses con muestreo completo, se calcularon los SDT como suma de las concentraciones de todos los iones presentes en el agua y se obtuvo la regresión entre CE y SDT para el periodo 1993-2008, que permitió obtener los SDT para cualquier fecha a partir del valor de CE:

$$\text{SDT (mg}\cdot\text{L}^{-1}) = 778.9 \cdot \text{CE (dS}\cdot\text{m}^{-1}) ; R^2 = 0.79, N = 43$$

Además, se comprobó que existe una relación aceptable entre el caudal en el momento de muestreo (Q_i) y la CE en Flumen en Sariñena (1993-2008):

$$\text{CE (dS}\cdot\text{m}^{-1}) = 1.5109 \cdot Q_i \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-0.0962}; R^2 = 0.28, N = 21$$

Esta relación se empleó para obtener estimas diarias de CE a partir de Q_d en Flumen en Albalatillo. Con estos datos se obtuvo la serie de valores diarios de masas exportadas por el río Flumen en Albalatillo.

La concentración del agua de riego se obtuvo de las estaciones de Canal de Monegros en Almodóvar (nº 421) y Canal del Cinca en el Embalse de El Grado (nº 414) de la red CEMAS (CHE, 2011). La zona se riega con aguas de ambos canales, y a falta de datos más detallados, y dada la baja salinidad de las aguas de ambos canales, se asumió que el 70% del agua de riego procede del canal de Monegros y el 30% del Canal del Cinca; de modo que los SDT del agua de riego (SDT_R) se obtuvieron como:

$$SDT_R = 0.7 \cdot SDT_{\text{Monegros}} + 0.3 \cdot SDT_{\text{Cinca}}$$

Las series mensuales de CE del agua de ambos canales se transformaron en SDT mediante las regresiones lineales obtenidas para cada estación (Monegros = CM y Cinca = CC):

$$SDT_{CM} (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) = 99.8 + 522.9 \cdot CE_{CM} (\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}) ; R^2 = 0.74, N = 90$$

$$SDT_{CC} (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) = 169.9 + 219.5 \cdot CE_{CC} (\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}) ; R^2 = 0.17, N = 33$$

donde los pocos valores perdidos de CE se obtuvieron por interpolación entre los adyacentes. Finalmente, la MS en el riego (MS_R) se calculó mensualmente como el producto de SDT_R y R:

$$MS_R (\text{Mg}\cdot\text{mes}^{-1}) = SDT_R (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) R (\text{Mm}^3\cdot\text{mes}^{-1})$$

Se asignó una salinidad al agua de lluvia de $SDT_P = 46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, obtenida por muestreo en la cercana zona de Almodívar (Barros, 2011) y la masa de sales aportada por la precipitación (MS_P) se obtuvo como:

$$MS_P (\text{Mg}\cdot\text{mes}^{-1}) = SDT_P (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot P (\text{Mm}^3\cdot\text{mes}^{-1})$$

Los datos de salinidad del río Flumen (CE y SDT) a la entrada en la zona de estudio se tomaron de la estación de Flumen en Quicena de la red CEMAS (CHE, 2011). La CE se convirtió en SDT con la regresión obtenida con los datos de esta estación:

$$SDT (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) = 49.3 + 783.4 \cdot CE (\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}) ; R^2 = 0.95, N = 4$$

y se obtuvieron valores diarios de CE a partir de la regresión en esta estación entre el caudal en el instante de muestreo y la CE, aplicada a los caudales medios diarios en el Flumen en Quicena:

$$CE (\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}) = 0.4019 \cdot Q_d (\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})^{-0.1465}; R^2 = 0.76, N = 20$$

obteniéndose las masas diarias en el Flumen en Quicena (MS_{FQ}) como sigue:

$$MS_{FQ} (\text{Mg}\cdot\text{d}^{-1}) = 0.0864 \cdot SDT (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot Q_d (\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$$

Al río Isuela se le asignó una concentración salina (SDT_{IP}) igual a la del Flumen en Quicena más la diferencia media encontrada entre los SDT de ambas estaciones en los datos de la red CEMAS ($SDT_{IP} = SDT_{FQ} + 295$ en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Los valores mensuales de SDT_{IP} se multiplicaron por los caudales medios mensuales estimados en Isuela (Q_M) obtenidos como se ha indicado más arriba para obtener las masas de sales de entrada a través del Isuela (MS_{IP}):

$$MS_{IP} (\text{Mg}\cdot\text{mes}^{-1}) = SDT_{IP} (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}) \cdot Q_M (\text{Mm}^3\cdot\text{mes}^{-1})$$

siendo la masa de sales en las entradas laterales $MS_{Qe} = MS_{FQ} + MS_{IP}$.

Con estas MS agregadas mensualmente se calcularon los balances de sales por meses, para cada estación de riego (ER), estación de no riego (EnR), y año hidrológico. El BS, cambiado de signo, es la masa de sales extraída de la zona regable (MS_{neta}), es decir, tanto de los suelos regados como de los materiales inferiores con los que entra en contacto el agua de drenaje en su recorrido hacia el río (puesto que de la

MS del río se sustrae la de las entradas a la zona regable MS_R , MS_P y MS_{Qe}). Un valor positivo para un periodo indica la acumulación de sales en el conjunto del sistema durante ese periodo. Las tendencias en las series temporales mensuales se establecieron mediante el test estacional de Man-Kendall y se cuantificaron mediante el estimador estacional de pendientes de Kendall (Gilbert, 1987).

El índice de balance de sales (IBS), relación entre las sales extraídas de la zona regable y las aportadas por R y P, se calculó a partir de las masas de sales:

$$IBS = (MS_Q - MS_{Qe}) / (MS_R + MS_P).$$

Valores del $IBS > 1$ señalan que el drenaje no está eliminando las sales aportadas con el riego y la precipitación y por tanto, indican la posibilidad de una salinización del sistema. Tanto el BS como el IBS son parámetros agregados que solo aportan información sobre el conjunto del sistema estudiado y son ineficaces para indicar problemas locales de salinización dentro del sistema; pero su estudio durante un periodo largo de tiempo puede ayudar a entender la dinámica de las sales en el sistema regado.

3- Resultados y Discusión

El regadío del Flumen presenta una salida neta de sales $MS_{neta} = 77434 \text{ Mg}\cdot\text{año}^{-1}$, lo que supone un lavado neto de sales de 2.00 Mg/ha ($1.32 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la EnR y $0.68 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en al ER). Los principales flujos de sales son las salidas de la zona regable ($MS_Q = 191898 \text{ Mg}\cdot\text{año}^{-1}$) y el riego ($MS_R = 76536 \text{ Mg}\cdot\text{año}^{-1}$) que representa el 67% de las entradas. La MS_{neta} (el BS cambiado de signo) presenta una clara estacionalidad (mayor en la EnR) y tendencia decreciente (Fig. 2). La pendiente mediana anual es de $-2881.4 \text{ Mg}\cdot\text{año}^{-1}$ (-3.7%) y significativamente distinta de 0 ($P < 0.05$). La MS_{neta} tiende a disminuir en todos los meses, pero este descenso solo es significativo ($P < 0.05$) en los meses de julio y agosto, es decir, la cantidad de sales retirada del sistema por las aguas de drenaje está disminuyendo con el tiempo y de un modo más claro en los meses centrales del verano; lo que puede obedecer a la disminución de la salinidad de los suelos (Herrero y Pérez-Coveta, 2004). En los años más áridos y con menor volumen de riego (2005 y 2006) el BS es menor durante la ER, incluso negativo en 2005 ($IBS = 0.7 < 1$).

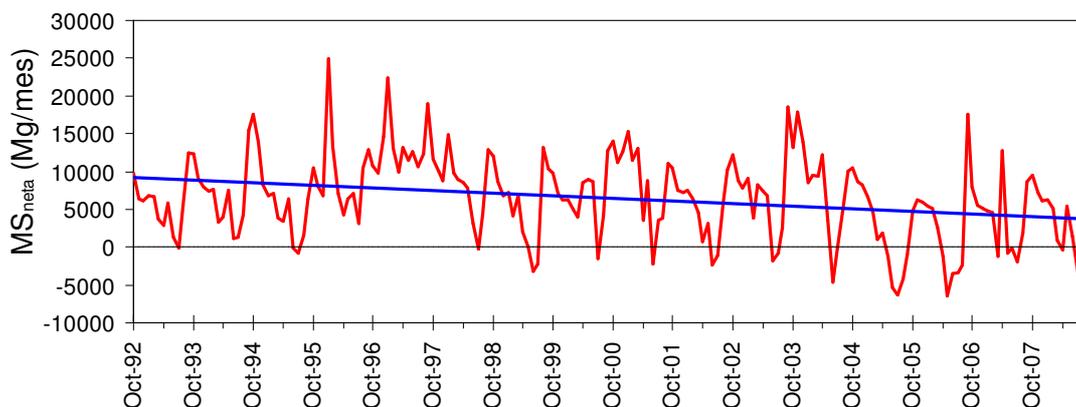


Figura 2. Masa neta de sales (MS_{neta} o BS cambiado de signo) mensual exportada del sistema durante el periodo de estudio y línea de tendencia.

Tanto R ($-0.30 \text{ Mm}^3\cdot\text{año}^{-1}$) como Q ($-5.15 \text{ Mm}^3\cdot\text{año}^{-1}$) han disminuido significativamente ($P < 0.05$) a lo largo del periodo de estudio, debido a la sequía de

2005 (y en menor medida 2006), a la transformación del sistema de riego en muchas comunidades de la zona en 2007-08 (aún en curso) en las que no se puede regar al 100% en esos años y al aumento de la superficie cultivada de cebada, con menores necesidades de riego. Pero ese descenso no afecta a la tendencia de MS_{neta} , en la que están descontadas MS_Q y MS_R .

El lavado de sales se produjo principalmente durante la EnR (66 %) pese a que la mayor parte de las entradas ($R + P + Q_e$) al sistema se producen durante la ER (74%). El IBS medio es de 1.9; pero mayor para la EnR (7.0) que la ER (1.4) indicando un mayor lavado durante la EnR (Fig. 3a y b). Durante la ER el lavado fue suficiente para eliminar las sales aportadas por el riego (más la precipitación): $IBS > 1$; pero es el lavado de invierno el que extrae una mayor masa de sales de la zona regada. En los meses centrales de la ER (junio a agosto), el lavado de sales apenas cubre las entradas (en julio incluso es inferior: $IBS = 0.99 < 1$; Fig. 3b), lo que unido al volumen de riego máximo en esos meses y la menor salinidad del agua de salida durante la ER ($CE(ER) = 1.28 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y $CE(EnR) = 1.50 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$; Fig. 3a) parece indicar que un exceso de agua de baja salinidad (sobrantes de riego) limita el lavado de los suelos durante los meses centrales de la ER.

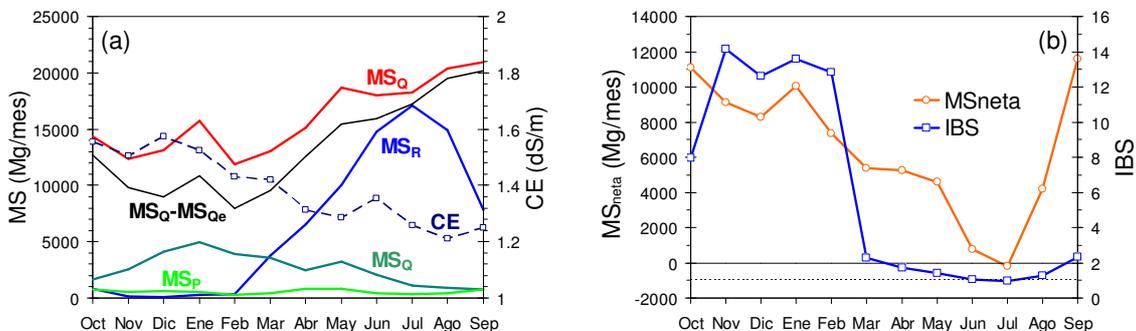


Figura 3. Medias mensuales de (a) masas de sales en el riego (MS_R), la precipitación (MS_P), las aguas de salida de la zona de estudio (MS_Q), las aguas de entrada laterales (MS_{Qe}), la diferencia $MS_Q - MS_{Qe}$ y la conductividad eléctrica (CE) y de (b) la masa de sales neta exportada (MS_{neta}) y el índice de balance de sales (IBS).

Aunque no existe una relación completamente clara entre el BS y la distribución de cultivos [Fig. 4(a)], el lavado anual (MS_{neta}) se incrementa significativamente ($P < 0.05$) con la superficie regada ($R^2 = 0.46$), la superficie de maíz ($R^2 = 0.51$), la de arroz y maíz ($R^2 = 0.60$) y, especialmente, con la superficie cultivada de arroz ($R^2 = 0.68$). Esta última correlación puede indicar que una parte importante de la masa de sales exportada proceda del lavado de los suelos dedicados de modo permanente (por su baja permeabilidad) al cultivo de arroz. La MS_{neta} también aumenta significativamente ($P < 0.05$) también con el R anual ($R^2 = 0.45$) y especialmente con el volumen de agua que produce el lavado de los suelos de la zona: $R + P$ ($R^2 = 0.80$) [Fig 3(b)]. La relación de MS_{neta} con $R + P$ permite establecer el volumen mínimo anual de entradas a los suelos regados ($R + P$) necesario para evitar una acumulación de sales a lo largo del año en $240.4 \text{ Mm}^3\cdot\text{año}^{-1}$ o 621 mm.

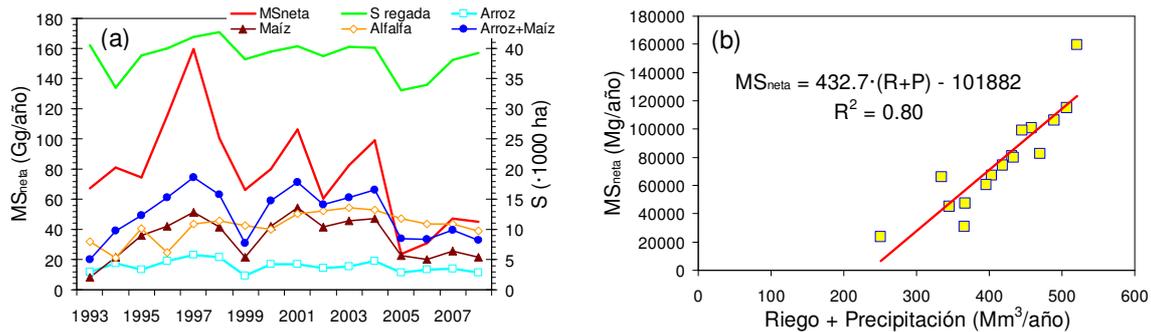


Figura 4. (a) Masa de sales neta exportada (MS_{neta}) y superficie de los principales cultivos a lo largo del periodo de estudio y (b) relación entre el volumen anual de R y P y las MS_{neta} .

4- Conclusiones y Recomendaciones

Aún con datos necesariamente agregados, la metodología propuesta, que integran información de periodos largos, permite conocer la dinámica de las sales en los sistemas de riego e identificar problemas de lavado o tendencias de salinización, precisamente por la gran cantidad de datos que se integran. En el caso de la cuenca del Flumen, el lavado de los suelos (aunque bien satisfecho a lo largo del año) parece limitado durante la ER (especialmente junio y julio) por la acumulación de agua de baja salinidad (posiblemente sobrantes de riego), como prueba la menor salinidad (CE) del Flumen en Sariñena durante la ER que fuera de ella (EnR).

Es presumible que la transformación a sistemas de riego más eficientes (como la que está teniendo lugar en buena parte del sistema de RAA) dará lugar a menores retornos de riego, lo que hará descender el nivel de agua en los barrancos y facilitará el drenaje de los suelos. Todo ello puede dar lugar a un lavado más eficiente durante la ER y a niveles de salinidad en el suelo más bajos durante el periodo de cultivo de regadío.

El seguimiento de la altura de la capa freática y la salinidad de los suelos durante la ER puede servir para establecer si pueden afectar al rendimiento de los cultivos y para identificar las zonas con mayores problemas de drenaje (y por tanto de lavado) durante la ER en las que puedan producirse situaciones locales de salinización de los suelos. Asimismo, parece interesante realizar un estudio más detallado sobre la composición iónica de las aguas de entrada al sistema y las salidas del mismo que puede aportar información sobre el posible intercambio iónico general en el sistema y posibles procesos de sodificación/des-sodificación del regadío del Flumen.

5- Agradecimientos

La información meteorológica empleada en este trabajo ha sido facilitada por Emilio Collados de la AEMET y las superficies de cultivo de las Hojas 1T han sido facilitadas por la Secretaria General Técnica del Servicio de Planificación y Análisis del Gobierno de Aragón y se han procesado con la ayuda de Javier Tapia del CITA. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto "Evaluación y medidas de control de fuentes difusas de contaminación del agua para la sostenibilidad económica y ambiental de los sistemas agrícolas de regadío en Aragón" de la Obra Social "La Caixa", Gobierno de Aragón y Comunidad General de Riegos del Alto Aragón.

6.- Referencias bibliográficas

- Barros, R., 2011. Evolución a largo plazo del balance hídrico y de la contaminación difusa (sales y agroquímicos) en la zona regable de La Violada, (Huesca). Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza (en elaboración).
- CEDEX, 2011. Anuario de aforos 2007-2008. Disponible en <http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp> , verificado en abril de 2011.
- CHE-CITA, 2007. Control de los retornos de las actividades agrarias de la Cuenca del Ebro: evaluación de las tendencias de la calidad del agua, control experimental de los retornos y propuesta de red de control, informe final del convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA) del año 2006, 285 p. Disponible en <http://www.chebro.es /La cuenca/Estudios/Agronómicos/>, verificado en abril de 2011.
- CHE, 2011. CEMAS. Control del Estado de las Masas de Agua. Disponible en <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/cemas/inicio.htm>, verificado en abril de 2011.
- Gilbert, R.O., 1987. Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 320 p.
- Herrero, J., Aragüés, R., 1988. Suelos afectados por salinidad en Aragón. *Surcos de Aragón* 9: 5-10.
- Herrero, J., Snyder, R.L., 1997. Aridity and irrigation in Aragón, Spain. *Journal of Arid Environments* 35: 535-547.
- Herrero, J., Pérez-Coveta, O., 2004. Soil salinity changes over 24 years in a Mediterranean irrigated district. *Geoderma* 125: 287-308.
- MARM, 2011. Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Disponible en <http://www.mapa.es/siar/Informacion.asp> verificado en abril de 2011.
- Nogués, J., Herrero, J., Rodríguez-Ochoa, R., Boixadera, J., 2000. Land evaluation in a salt-affected irrigated district using an index of productive potential. *Environmental management* 25(2): 143-152.
- Quirantes Puertas, J., 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros. *Publicación 681 de la Institución "Fernando el Católico"*, 207 p.