

C-01-2023

Comunicación científico-técnica

## Evolución del balance hidrosalino de un regadío: El caso de Lerma (Bardenas II, Zaragoza, 2004-2020)

## Hidrosaline balance evolution of an irrigated land: The case of Lerma (Bardenas II, Zaragoza, 2004-2020)

Causapé J.<sup>1,3</sup>, Gimeno M.J.<sup>2,3</sup>, Auqué L.<sup>2,3</sup>

- 1 Instituto Geológico y Minero de España. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Residencia CSIC Campus Aula Dei. Av. Montañana 1005. 50059 Zaragoza. Tfno. 654 19 76 08; Web site: [www.jcausape.es](http://www.jcausape.es); E-mail presentador: [jcausape@igme.es](mailto:jcausape@igme.es)
- 2 Departamento de Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza.
- 3 Unidad Asociada en Ciencias de la Tierra IGME-CSIC/UNIZAR.

### Resumen:

Zonas geológicamente “salinas” y con escasa pluviometría, ya en si propensas a salinizar su drenaje natural, pueden ver acelerado el proceso de salinización de los sistemas hídricos receptores por la puesta en marcha del regadío. El objetivo de este trabajo es analizar el efecto sobre una de estas áreas de la transformación en riego desde sus inicios hasta una vez consolidado el regadío, analizando los balances salinos no sólo en su conjunto, sino también de forma individualizada para cada uno de los elementos químicos mayoritarios. La zona de estudio corresponde al área regable de la cuenca de Lerma (Bardenas, Zaragoza) donde se han realizado balances hidrosalinos desde el año hidrológico 2004, previo a su transformación en riego, hasta el año 2020, con el regadío ya consolidado. La puesta en regadío de la cuenca de Lerma ha duplicado la masa de sales exportada hasta alcanzar, para todo el periodo de estudio, una media de 3177 kg/ha regable·año, de las cuales un 55 % son el resultado de un proceso global de disolución de minerales salinos cuya tendencia es a disminuir conforme éstos son lavados del suelo. La pauta general de disolución global (más salidas que entradas en flujos hídricos del balance) seguida por la mayoría de iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) contrasta con el comportamiento de  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  cuando con la puesta en marcha del regadío comenzó a haber más entradas que salidas.



## XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



La consolidación del regadío está produciendo una progresiva disminución de la salinización inducida sobre los sistemas hídricos receptores de los retornos de riego, si bien, sería necesario profundizar en el conocimiento y cuantificación de los diferentes procesos geoquímicos con el fin de tener una mayor comprensión del sistema e identificar posibles problemas ambientales adicionales inducidos por el regadío.

**Palabras clave:** Drenaje, Salinidad, Impacto Agroambiental, Evolución Temporal.

## Abstract:

Geologically saline zones with scarce pluviometry are areas susceptible to salinization of their natural drainage. However, the salinization of the receiving water systems can be accelerated with the implementation of irrigation. This work aims to analyze the effects of irrigation on some zones transformed into irrigation land, from the beginning of the process until its complete consolidation. To this end, salt balances are evaluated as a whole and for each significant chemical element.

The study zone is the irrigable area of the Lerma basin (Spain), where hydrosaline balances have been carried out since the hydrological year 2004 (before the implementation of irrigation) until 2020 (after the consolidation of irrigation). The implementation of irrigation in the area has doubled the mass of exported salts up to an average of 3177 kg/ha irrigable-year, for the entire study period. 55 % of that amount results from a global mineral dissolution, although this process seems to decrease with time as these minerals are being flushed from the soil.

Before irrigation was implemented, the general global dissolution pattern produced more concentration of most ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{K}^+$ ) in the water outputs than in the water inputs. After the implementation of irrigation, there were more water inputs than outputs in the balance and that was shown by the decrease in the dissolved  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{Ca}^{2+}$ .

These results indicate that the consolidation of irrigation progressively decreases the induced salinization in the water systems that receive the irrigation return flows. Further studies are required to expand the general understanding of the process and its effects, quantify the different geochemical processes involved, and identify possible additional environmental issues induced by irrigation.

**Keywords:** Drainage, Salinity, Environmental Impact, Temporal Evolution.

## 1. Introducción

La agricultura de regadío es un recurso indispensable en la alimentación de la población ya que permite incrementar el rendimiento y diversidad de cultivos. Sin embargo, la agricultura, y en particular el regadío, supone un gran impacto en la calidad de las aguas receptoras de los retornos de riego. Zonas geológicamente “salinas” y con escasa pluviometría, ya en sí propensas a salinizar su drenaje natural, pueden ver acelerado este proceso natural por la puesta en marcha del regadío.

Entre los efectos que produce la salinidad en las aguas se encuentran las afecciones a los ecosistemas, dado que muchas especies tanto vegetales como animales no son tolerantes a ciertas concentraciones de sal, así como las limitaciones del uso del agua para el abastecimiento urbano, el riego o la industria.

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios con el fin de cuantificar el impacto medioambiental del regadío en cuanto a la salinización de los sistemas receptores de sus retornos de riego (véase, por ejemplo, la revisión bibliográfica realizada por Causapé *et al.*, 2006). Muchos de estos estudios se han llevado a cabo en la cuenca del Ebro debido a que presenta áreas de elevada salinidad que contribuyen en gran medida al contenido en sales de las aguas superficiales.

La presencia de estas sales se debe a las condiciones geológicas de la cuenca del Ebro, que formó parte de un gran mar interior durante el Terciario, lo que unido a la baja pluviometría en la zona central de la cuenca y a la progresiva transformación de regadío han provocado una tendencia al incremento de la salinidad (Lorenzo-González, 2022).

Una evaluación completa de los efectos del drenaje agrícola sobre la calidad del agua debe centrarse en las masas de contaminantes exportados además de en las concentraciones, ya que es la masa de sales exportada por los regadíos la que degradará la calidad de los sistemas hídricos receptores de los retornos de riego, hecho ya reconocido por el enfoque legislativo del total máximo de carga diaria (TMDL: Total Maximum Daily Load) utilizado en Estados Unidos. Los estudios basados en balances hidrosalinos de cuencas hidrológicas de regadío cuantifican la masa de sales exportada, y por diferencia entre las entradas y salidas del balance, el resultado que se obtiene es la cantidad de sales disueltas o precipitadas. Sin embargo, la mayoría de los balances salinos de regadíos se realizan en años concretos y no contemplan el balance individualizado de los principales iones.

El objetivo del presente estudio es ir un paso más allá y analizar el efecto de la transformación en riego desde sus inicios hasta una vez consolidado el regadío (17 años), analizando los balances salinos no sólo en su conjunto, si no también individualizados para cada uno de los iones mayoritarios.

## 2. Zona de estudio y seguimiento realizado.

La zona de estudio comprende la cuenca hidrológica del barranco de Lerma (Bardenas, Zaragoza) en la que un 48 % de su superficie (352 ha) se encuadró dentro del proyecto de transformación del regadío del Sector XII de Bardenas II (Figura 1).

Desde el río Aragón (afluente del Ebro) se detrae, a través del pantano de Yesa y del Canal de Bardenas, el agua para el riego de la zona. Se trata de un agua procedente del Pirineo y con baja mineralización ( $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). El río Arba (también afluente del Ebro) es el que recibe los retornos de riego del barranco de Lerma que en condiciones de secano registraba una conductividad eléctrica a  $25^\circ\text{C}$  (CE) de hasta  $8000 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

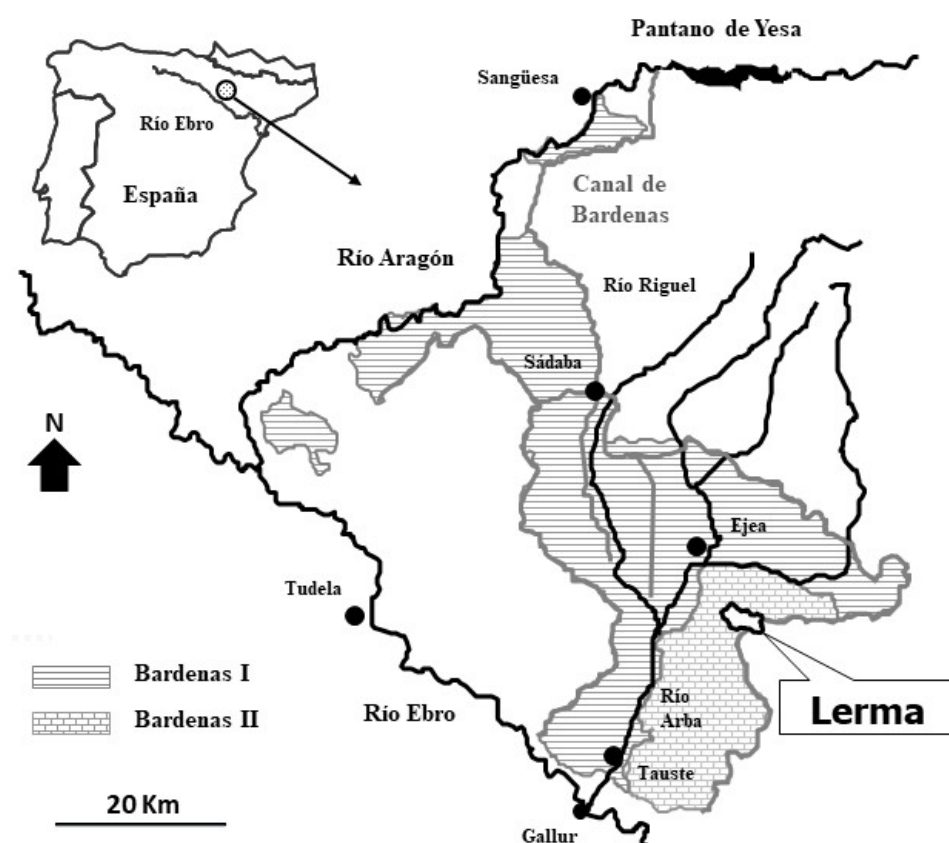


Figura 1. Localización geográfica de la cuenca del barranco de Lerma.

En una zona donde la precipitación media anual ( $382 \text{ mm/año}$ ; Merchán, 2015) es menos de un tercio de la evapotranspiración potencial ( $1307 \text{ mm/año}$ ) se hace imprescindible el riego para el desarrollo de cultivos de verano (maíz, girasol, hortalizas, etc.) y para el aumento de la producción de cereal de invierno (trigo, cebada, etc.). Las obras de transformación de la zona a regadío coincidieron con el comienzo del estudio del área en 2003, si bien, la puesta en riego se inició de forma progresiva desde 2006 (36 % en riego) hasta 2008 (90 % en riego), cuando prácticamente toda el área regable estuvo bajo riego.

El regadío presurizado implantado se localiza principalmente en los suelos desarrollados sobre glaciares cuaternarios (34 % del área, Calcixerollic Xerochrepts; Soil Survey Staff, 2014) de poca pendiente ( $< 3\%$ ) y baja salinidad ( $CE_{\text{extracto saturado}} < 4 \text{ dS/m}$ ). El 66 % restante son suelos desarrollados sobre el valle terciario, encajado por el barranco de Lerma (Typic Xerofluvent; Soil Survey Staff, 2014) con pendientes escarpadas ( $> 10\%$ ) y alta salinidad ( $4 \text{ dS/m} < CE_{\text{extracto saturado}} < 8 \text{ dS/m}$ ).

Estos materiales terciarios del Mioceno corresponden a facies centrales de cuenca lacustre y consisten en una alternancia de yesos, arcillas y limos, de tonos pardos y grises, con intercalaciones ocasionales de delgadas capas de calizas asociadas a los yesos.

Con el objetivo de averiguar qué componentes geoquímicos pueden llegar a las aguas, Merchán (2015) realizó experimentos de lixiviado con suelos de la zona de estudio. En primer lugar, se caracterizó la composición mineralógica de los suelos mediante difracción de rayos X lo que puso de manifiesto la presencia casi exclusiva de calcita, cuarzo y minerales de la arcilla en los suelos desarrollados sobre el glacis cuaternario, mientras que en los suelos del terciario también se detectó dolomita, yeso y halita. Estas características se vieron reflejadas en los resultados de los lixiviados. En el caso de los suelos terciarios se produjo la mayor cantidad de  $Na^+$  y  $Cl^-$  disueltos y en el caso de que dichos suelos estuvieran sobre yesos, se producían además las mayores concentraciones de  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . El lixiviado en suelos desarrollados sobre el glacis cuaternario produjo las menores concentraciones iónicas.

Hidrogeológicamente, los acuíferos cuaternarios drenan la mayor parte de las aguas de riego (sobre ellos se desarrolla casi todo el regadío) que, en contacto con los materiales más salinos e impermeables del terciario, llegan hasta el barranco de Lerma (Figura 2).

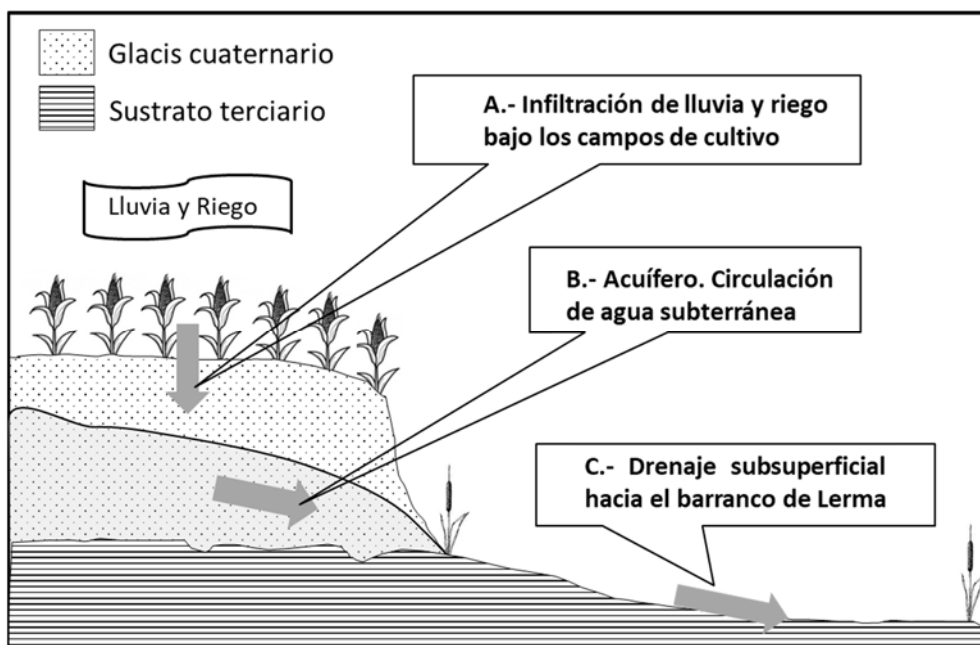


Figura 2. Modelo hidrológico conceptual (figura adaptada de Merchán et al., 2015a).



## 2. Materiales y métodos.

Se han realizado balances hidrosalinos del área regable de la cuenca de Lerma desde el año hidrológico 2004 (1 de octubre de 2003 al 30 de septiembre de 2004), previo a su transformación en riego, hasta el año hidrológico 2020 (1 de octubre de 2019 al 30 de septiembre de 2020), con el regadío ya consolidado.

Para la ejecución de los balances hidrosalinos se ha utilizado el software Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR, Causapé 2009; <https://jcausape.es/software-emr/>). Este software calcula el balance de agua y de cada uno de los iones mayoritarios a partir de datos de los diferentes componentes hídricos (entradas, salidas y almacenamiento de agua del sistema) asignando la diferencia entre las entradas, salidas y almacenamiento (en suelos y acuíferos) al conjunto de procesos geoquímicos como pueden ser la disolución, precipitación y/o el posible intercambio iónico. Para los balances se ha seguido la metodología utilizada por Merchán (2015) en la misma zona de estudio.

Durante los 17 años del seguimiento llevado a cabo desde 2004 hasta 2020, el mayor esfuerzo se dedicó a la medición del caudal y de la salinidad (CE a 25 °C) a la salida del barranco de Lerma puesto que estos datos son los que, finalmente, proporcionan la información sobre la carga transportada fuera del sistema. Hasta septiembre de 2005 se efectuaron medidas de caudal y muestreos de agua manuales para la determinación de la CE 25 °C con una frecuencia mensual. Con objeto de tener información más precisa sobre las variaciones del sistema, a partir de octubre de 2005 se instaló una estación de aforos equipada con un limnógrafo electrónico y un tomamuestras automático de agua que permitieron obtener información diaria tanto de concentración como de masas de sales exportadas.

A pesar de la mejora obtenida mediante muestreos diarios, se constató que seguían siendo insuficientes para captar los eventos puntuales de tormentas que podían suponer importantes aportaciones en la carga total de sales exportada y que no estaban suficientemente bien cuantificados al tomar muestras una única vez al día. Así pues, en julio de 2011 la estación de aforos fue equipada con sensores de medición en continuo y telemedida de caudal y CE 25°C con frecuencia diezminutal.

Para obtener las concentraciones de los iones mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) analizados en los diferentes componentes del balance de agua, se tomaron a lo largo del periodo de estudio 100 muestras del barranco, 10 de agua de lluvia, y 5 de agua de riego en las que también se determinaron el pH y la CE 25 °C. Las determinaciones analíticas fueron realizadas por el Centro Tecnológico Agropecuario Cinco Villas. El  $\text{HCO}_3^-$  se cuantificó por medición de pH y neutralización con ácido a punto final. El  $\text{SO}_4^{2-}$  se cuantificó midiendo por espectrofotometría la turbidez producida por el bario. El  $\text{Cl}^-$  se determinó precipitando iones cloruro por adición de una solución valorada de nitrato de plata en presencia de un indicador (cromato de potasio).  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron analizados por espectrofotometría de absorción atómica.

Para realizar los balances se necesita conocer las concentraciones iónicas en los distintos componentes hídricos de entradas y salidas al balance. En la Tabla 1 se indican los valores medios de las concentraciones disueltas analizadas en las aguas del barranco de Lerma, en el agua de lluvia y en el agua de riego.

**Tabla 1.** Número de muestras ( $n^\circ$ ), pH, CE 25° C y concentraciones medias de los iones mayoritarios en las aguas del barranco de Lerma, las aguas de lluvia y las aguas de riego.

|          | $n^\circ$ | pH  | CE 25°           | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ |
|----------|-----------|-----|------------------|------------------|--------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------------|
|          |           |     | $\mu\text{S/cm}$ | -----mg/L-----   |                    |               |                  |                  |               |              |
| Barranco | 100       | 8,2 | 2318             | 340,1            | 337,7              | 357,6         | 89,3             | 69,2             | 336,4         | 6,8          |
| Lluvia   | 10        | 5,7 | 29               | 11,8             | 2,3                | 1,3           | 3,0              | 1,1              | 1,2           | 0,5          |
| Riego    | 5         | 8,1 | 334              | 161,7            | 19,3               | 18,3          | 48,4             | 8,0              | 11,4          | 1,1          |

En cuanto a la composición química del resto de componentes del balance se asumieron las siguientes simplificaciones: (1) los valores de concentración del agua de riego se usan también como valores característicos de las filtraciones del canal y de las roturas en la red de tuberías ya que el origen del agua es el mismo; (2) las concentraciones del barranco de Lerma se aplican como representativas de los flujos entrantes procedentes del exterior del área regable ya que la geología es similar; y (3) la evapotranspiración y pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión se han considerado libres de sales.

Las aguas de lluvia y de riego presentan concentraciones poco variables a lo largo de los años y, por tanto, se han asignado los mismos valores de concentración promedio para todos los años en ambos casos (Tabla 1). Sin embargo, el agua del barranco de Lerma tiene una salinidad muy variable a lo largo del tiempo, como se observa en las concentraciones de las 100 muestras de agua analizadas.

La salinidad del barranco es muy sensible a las variaciones que se pueden producir debido a tormentas, filtraciones, roturas de tuberías etc. que pueden no quedar reflejadas en un análisis químico puntual llevado a cabo en las muestras de agua. Así pues, ante la imposibilidad de tomar miles de muestras diezminutales y obtener sus análisis químicos, se decidió utilizar las medidas de conductividad eléctrica (CE 25 °C), y a partir de ellas calcular las concentraciones iónicas correspondientes.

Para llevar a cabo esta transformación de los datos de conductividad a concentraciones de cada ion se han realizado análisis de regresión con las 100 muestras de agua del barranco. Las regresiones han resultado estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95 % ( $p < 0,05$ ) y explican porcentajes elevados (estadístico  $R^2$ ) de la variabilidad en la concentración de la mayoría de los diferentes iones.

Los valores obtenidos de concentración de cada ion a partir de los datos disponibles de conductividad se han utilizado para obtener valores promedio anuales (por años hidrológicos) representativos del agua de drenaje (agua de salida final) del área regable de Lerma.



## 3. Resultados y discusión

Los resultados de los balances se presentan en la Tabla 2 por años hidrológicos y con los datos anualmente acumulados (medias móviles) de manera que reflejen la evolución temporal amortiguando la variabilidad de un año en concreto. Los años se han agrupado en tres periodos: (1) anterior a la transformación en riego (años hidrológicos 2004-2005), (2) de transición al regadío (años hidrológicos 2006-2010) y (3) de regadío consolidado (años hidrológicos 2011-2020).

Los resultados indican que las principales entradas se deben a la lluvia (41 %), en particular en los años de secano, y al riego (52 %) una vez que el regadío ya estuvo consolidado (Tabla 2). Los aportes de agua al barranco desde el área no regable (5 %), por filtraciones del canal (1 %) y roturas en las tuberías (0,1%) han sido muy inferiores. En cuanto a las salidas, las mayores se deben a la evapotranspiración (70 %) y a las propias salidas a través del drenaje del barranco de Lerma (22 %), ambas se han incrementado con la puesta en riego. Las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión han sido inferiores (8 %), pero nada despreciables, pues han supuesto un 15 % del agua aplicada en el riego.

Respecto al almacenamiento en el sistema, los resultados indican que éste ha sido cuantitativamente muy inferior a los principales componentes del balance de agua ya que suponen únicamente un 0,7 % del agua implicada. Anualmente son relativamente importantes a la hora de cerrar los balances, pero conforme el periodo del balance es más amplio su importancia disminuye. Los balances de agua en el área regable de la cuenca de Lerma cierran razonablemente bien con un desbalance para el total del periodo de estudio de tan sólo el -3 % (última columna de la Tabla 2).

**Tabla 2.** Balance de agua (acumulado en negrita) en cuenca de Lerma (2004-2020).

| Año<br>Hidrológico  |      | ENTRADAS |     |       |     |         |    |            |   |         |   | SALIDAS |    |     |     |          |     | ALMACENAMIENTO |    |       |     | Desbalance <sup>a</sup> |    |
|---------------------|------|----------|-----|-------|-----|---------|----|------------|---|---------|---|---------|----|-----|-----|----------|-----|----------------|----|-------|-----|-------------------------|----|
|                     |      | Lluvia   |     | Riego |     | No Reg. |    | Filtración |   | Roturas |   | PEA     |    | ET  |     | Barranco |     | Acuífero       |    | Suelo |     |                         |    |
|                     |      | mm/año   |     |       |     |         |    |            |   |         |   | mm/año  |    |     |     |          |     | mm/año         |    |       |     |                         |    |
| Secano              | 2004 | 632      | 632 | 0     | 0   | 71      | 71 | 9          | 9 | 0       | 0 | 0       | 0  | 335 | 335 | 136      | 136 | --             | -- | 30    | 30  | 35                      | 35 |
|                     | 2005 | 227      | 430 | 0     | 0   | 26      | 49 | 9          | 9 | 0       | 0 | 0       | 0  | 260 | 297 | 52       | 94  | --             | -- | -52   | -11 | 1                       | 25 |
| Transición          | 2006 | 444      | 434 | 181   | 60  | 51      | 50 | 9          | 9 | 0       | 0 | 27      | 9  | 467 | 354 | 144      | 110 | --             | -- | 56    | 11  | -1                      | 13 |
|                     | 2007 | 406      | 427 | 467   | 162 | 45      | 48 | 9          | 9 | 0       | 0 | 72      | 25 | 691 | 438 | 124      | 114 | --             | -- | -40   | -1  | 9                       | 12 |
|                     | 2008 | 367      | 415 | 554   | 240 | 41      | 47 | 9          | 9 | 0       | 0 | 80      | 36 | 701 | 491 | 137      | 119 | --             | -- | 8     | 1   | 5                       | 10 |
|                     | 2009 | 380      | 409 | 576   | 296 | 44      | 46 | 9          | 9 | 2       | 0 | 87      | 44 | 751 | 534 | 342      | 156 | -3             | -1 | -17   | -2  | -14                     | 4  |
|                     | 2010 | 307      | 395 | 582   | 337 | 37      | 45 | 9          | 9 | 13      | 2 | 90      | 51 | 669 | 554 | 294      | 176 | -14            | -3 | 16    | 0   | -11                     | 1  |
| Regadío Consolidado | 2011 | 336      | 387 | 580   | 368 | 38      | 44 | 9          | 9 | 0       | 2 | 88      | 56 | 762 | 580 | 231      | 183 | -38            | -7 | -13   | -2  | -7                      | 0  |
|                     | 2012 | 240      | 371 | 591   | 392 | 26      | 42 | 9          | 9 | 0       | 2 | 94      | 60 | 661 | 589 | 135      | 177 | -6             | -7 | 7     | -1  | -3                      | 0  |
|                     | 2013 | 480      | 382 | 544   | 407 | 57      | 44 | 9          | 9 | 0       | 1 | 71      | 61 | 760 | 606 | 291      | 189 | 37             | -3 | 7     | 0   | -7                      | -1 |
|                     | 2014 | 355      | 379 | 715   | 435 | 40      | 43 | 9          | 9 | 0       | 1 | 98      | 64 | 833 | 626 | 226      | 192 | -52            | -7 | 7     | 1   | 1                       | -1 |
|                     | 2015 | 433      | 384 | 539   | 444 | 49      | 44 | 9          | 9 | 0       | 1 | 76      | 65 | 791 | 640 | 264      | 198 | -16            | -8 | -5    | 0   | -7                      | -2 |
|                     | 2016 | 356      | 382 | 691   | 463 | 40      | 44 | 9          | 9 | 0       | 1 | 101     | 68 | 824 | 654 | 207      | 199 | -13            | -8 | -9    | 0   | -1                      | -2 |
|                     | 2017 | 468      | 388 | 587   | 472 | 52      | 44 | 9          | 9 | 0       | 1 | 76      | 69 | 761 | 662 | 230      | 201 | -4             | -8 | 38    | 2   | 1                       | -1 |
|                     | 2018 | 452      | 392 | 553   | 477 | 51      | 45 | 9          | 9 | 0       | 1 | 69      | 69 | 739 | 667 | 307      | 208 | -6             | -8 | -34   | 0   | -1                      | -1 |
|                     | 2019 | 352      | 390 | 573   | 483 | 47      | 45 | 9          | 9 | 0       | 1 | 136     | 73 | 701 | 669 | 260      | 211 | -12            | -8 | 13    | 1   | -11                     | -2 |
|                     | 2020 | 342      | 387 | 657   | 494 | 39      | 44 | 9          | 9 | 0       | 1 | 93      | 74 | 810 | 677 | 252      | 214 | 18             | -7 | -8    | 0   | -11                     | -3 |

\*Desbalance = [(Entradas-Salidas-Almacenamiento)/(Entradas+Salidas+Almacenamiento)]·200

Una vez realizado el balance hídrico y teniendo en cuenta las concentraciones disueltas en cada uno de los componentes de dicho balance, se puede realizar el balance de sales. El total exportado, teniendo en cuenta todos los años de estudio, supone un valor medio de 3177 kg/ha regable·año.

De esta cantidad, el 42 % procede del agua de riego y el 3 % del agua de lluvia lo que deja sin explicar el 55 % de los iones exportados. Al margen de los posibles errores del balance hidrosalino, este porcentaje inexplicado puede asociarse al resultado de los diferentes procesos geoquímicos, con valores negativos si globalmente domina la disolución de sales y positivos si lo que domina es la precipitación.

La necesidad de un aporte adicional del 55 % de los iones exportados indica la necesidad de una “disolución” global de fases minerales capaces de aportar del orden de 1816 kg de iones/ha regable·año, aunque esta tasa no se ha mantenido constante durante todo el periodo de seguimiento ni obedece únicamente a procesos de disolución.

Los resultados del balance de sales agrupados por periodos (Tabla 3) ponen de manifiesto que durante el periodo de transición al regadío (2006/2010: -2518 kg/ha regable de sales disueltas), con la introducción de importantes volúmenes de agua de riego, se incrementó la tasa de sales exportadas y, por tanto, la tasa de disolución global, con respecto al periodo de secano que comprendió un año muy húmedo (2004: 632 mm y -2373 kg/ha regable de sales disueltas) y un año muy seco (2005: 227 mm y -1076 kg/ha regable de sales disueltas).

**Tabla 3:** Resultados de los balances de sales (Entradas – Salidas – Almacenamiento) durante los periodos de secano (2004-2005), transición (2006-2010) y regadío consolidado (2011/2020) en el área regable de la cuenca de Lerma.

|                                         | $\Sigma$                      | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Cl}^-$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ |
|-----------------------------------------|-------------------------------|------------------|--------------------|---------------|------------------|------------------|---------------|--------------|
|                                         | ----- kg/ha regable·año ----- |                  |                    |               |                  |                  |               |              |
| <b>Secano</b><br>2004/2005              | -1724                         | -160             | -488               | -513          | -73              | -78              | -411          | -2           |
| <b>Transición</b><br>2006/2010          | -2518                         | 101              | -827               | -881          | 33               | -133             | -803          | -7           |
| <b>Regadío Consolidado</b><br>2011/2020 | -1484                         | 378              | -608               | -655          | 127              | -91              | -631          | -5           |

La consolidación del regadío, sin embargo, ha llevado a un descenso en la tasa de iones exportados que se interpreta como una disminución en la tasa de disolución de sales (2011/2020: -1484 kg/ha regable de sales disueltas) como consecuencia del progresivo lavado y agotamiento de las mismas.

La pauta general de disolución global seguida por la mayoría de iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) contrasta con el comportamiento de  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  que, en condiciones de secano, se estaban disolviendo (más salidas que entradas) mientras que con la puesta en marcha del regadío pasaron a precipitar (más entradas que salidas).

## 4. Conclusiones

La puesta en regadío de la cuenca del barranco de Lerma ha duplicado la masa de sales exportada hasta alcanzar para todo el periodo de estudio (2004-2020) una media de 3177 kg/ha regable·año.

Según los datos aportados por Causapé *et al.* (2006), esta cantidad es muy inferior a las 16 t/ha regable·año cuantificadas en regadíos por inundación sobre suelos con yeso, o las 14 t/ha regable·año de otros regadíos, incluso por aspersión, sobre suelos muy salinos del valle del Ebro. La masa de las sales exportadas por la cuenca de Lerma es, sin embargo, del mismo orden que la de otros regadíos sobre suelos no salinos regados por inundación (Causapé *et al.*, 2006).

El hecho de que la cantidad exportada de sales no sea demasiado alta con respecto a la salinidad edáfica natural de la zona, se traduce en que, según el Índice de Contaminación por Sales (ICS) definido por Causapé (2009), el regadío de Lerma se considera como poco contaminante en cuanto a carga exportada de sales ( $ICS < 2 \text{ [t/ha·año]/[dS/m]}$ ).

Del total de la masa de sales exportada en Lerma, un 55 % (1816 kg/ha regable·año) se corresponde con el resultado de un proceso global de disolución de sales cuya tendencia es a disminuir conforme las sales del suelo se van lavando y van desapareciendo. Este es un proceso natural que se acelera por la puesta en riego con aguas de mineralización débil procedentes del deshielo pirenaico.

La pauta general de disolución global seguida por la mayoría de iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) contrasta con el comportamiento de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  que, en condiciones de secano, se estaban disolviendo mientras que con la puesta en marcha del regadío pasaron a precipitar.

Así pues, el presente estudio apunta hacia la disolución de algunas fases minerales (halita, yeso, dolomita) pero también a la posible precipitación de otras como la calcita. No obstante, otros procesos geoquímicos pueden estar teniendo lugar, aunque pasen desapercibidos a la simple realización de balances hidrosalinos.

## 5. Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias a la financiación del proyecto AgroSOS (PID2019-108057RB-I00) del Ministerio de Ciencia e Innovación - Fondos Feder UE.

## Referencias

1. Causapé, J., Quílez, D., and Aragüés, R. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006. 117:451-461. DOI: 10.1007/s10661-006-0763-8
2. Causapé, J. A computer-based program for the assessment of water-induced contamination in irrigated lands. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2009. 158 (1-4): 307-314. DOI: 10.1007/s10661-008-0584-z
3. Lorenzo-González M.A. Regadío y calidad fisicoquímica de las aguas superficiales en la cuenca del Ebro. Tesis Doctoral en Ciencias Agrarias y del Medio Natural Universidad de Zaragoza. 2022. 400 p.
4. Merchán D. Hydrological Assessment of a newly implemented irrigated area in Spain: Salinization and nitrate pollution from irrigation return flow. Tesis Doctoral del Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Zaragoza. 2015. 183 p
5. Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy (12th edition). USA Department of Agriculture. 2014. 359 p.