

Calidad de los ríos Riguel y Arba (Zaragoza). Influencia del regadío de Bardenas y modelización geoquímica del sistema.

Jesús Causapé Valenzuela

Unidad de Suelos y Riegos
Servicio de Investigación Agroalimentaria y
Laboratorio de Agronomía y Medio Ambiente (DGA-CSIC)
Apdo. 727, 50080-Zaragoza
E-mail: jcausape@aragob.es

Premio a la Investigación de la Academia. 2003

Abstract

This work diagnoses the present salinity of the Riguel and Arba rivers (Spain) and predicts its expected evolution using geochemical models applied to the modernization of the actual Bardenas I and the completion of irrigation in the Bardenas II irrigation districts.

The results show a progressive increase in salinity (from 0.39 to 2.21 dS/m electrical conductivity) in the Riguel-Arba system, due to the cumulative collection of irrigation return flows and its progression towards more saline facies.

The Bardenas I modernization, involving an increase in irrigation efficiency from 50% to 90%, will decrease the volume and salinity of the Riguel River by 30%. In contrast, irrigation of the new 24000 ha Bardenas II land will increase the flow (12%) and salinity (20%) of the Arba River. Geochemical models may help in providing sensible estimates on the impact of irrigation on the salinity of the receiving water bodies.

Keywords: Geology, agriculture, water, salinity

1 Introducción

Bajo condiciones climáticas semiáridas, la transformación en riego de las tierras de cultivo contribuye notablemente al aumento de la producción agraria y a la diversificación de cultivos dotando además a las cosechas de una regularidad muy superior. En España, el regadío supone el 15% de la superficie cultivada y es responsable del 60% de la producción agraria total (Fererres y Ceña, 1997). Desde un punto de vista social, en Aragón (España), el regadío ha contribuido al desarrollo económico de zonas rurales y ha supuesto un freno a la despoblación.

Sin embargo, la actividad agraria de regadío también provoca importantes afecciones medioambientales cuya intensidad depende del medio físico y del manejo agronómico de los insumos de producción (agua, fertilizantes, fitosanitarios, etc.). Junto a las repercusiones medioambientales que surgen de la necesidad de disponer de agua regulada, otras afecciones medioambientales importantes son la salinización y la contaminación por nitrato de las aguas de drenaje y su impacto potencial sobre los sistemas receptores de las mismas (retornos del riego). El presente trabajo surge ante la necesidad de compatibilizar la actividad agraria con la preservación y protección del medio ambiente.

1.1 *Calidad de las aguas. Salinización y contaminación por nitrato*

La calidad de las aguas se ve seriamente afectada por su salinización y por la presencia de un alto contenido en nitrato que limita su uso agrícola, industrial, urbano y ecológico. Las sales presentes en el agua tienen como fuente natural primaria la meteorización de los materiales geológicos. En un sistema agrario de regadío, las principales masas de sales movilizadas proceden del agua de riego y de la disolución de los minerales de los suelos puestos en riego. Una adecuada conservación de éstos, exige que las sales no queden acumuladas por encima de unos valores que impidan un desarrollo normal de los cultivos, por lo que es necesaria su evacuación, produciendo un incremento de la salinidad en los sistemas receptores (ríos y acuíferos).

El límite admisible (Plan Hidrológico del Ebro) de conductividad eléctrica (CE) impuesto a las aguas superficiales que son destinadas a la producción de agua potable es de 2,5 dS/m, siendo mucho más exigentes los tratamientos para la potabilización de las aguas de mayor salinidad. La salinidad del agua también afecta negativamente a procesos industriales y al rendimiento de los cultivos debido a la disminución del potencial osmótico de la solución del suelo, a la toxicidad iónica específica normalmente asociada a la absorción excesiva del cloruro y sodio, y a la interferencia de algunas sales disueltas con los nutrientes esenciales para las plantas.

En cuanto al nitrato, se calcula que entre un 50 y un 90% de la carga en las aguas tiene su origen en actividades agrarias (EEA, 1999). Tradicionalmente, el nitrógeno que

extraían los cultivos del suelo era restituido por los aportes orgánicos de la ganadería que se encontraba en equilibrio con la agricultura, hasta que al final de los años 60 el equilibrio se rompió por la intensificación de estas actividades (Orús y col., 2000). Los fertilizantes minerales producidos por la industria química comienzan a ser abundantes y asequibles, y la ganadería ya no depende de las tierras de cultivo, consume piensos de zonas lejanas y genera una cantidad elevada de estiércoles con contenidos de nitrógeno importantes. Como consecuencia, existe un exceso de nitrógeno en el suelo que, al convertirse en nitrato, es fácilmente lavado, llegando hasta las aguas subterráneas y superficiales.

La ingestión de nitrato en cantidades excesivas tiene unos efectos perjudiciales para la salud, provocando la enfermedad denominada metahemoglobinemia (Ramos y Ocio, 1993). Las autoridades sanitarias españolas y de la Unión Europea han establecido la concentración máxima tolerable de nitrato en el agua potable en 50 mg/L (Directiva 98/83/CE). Medioambientalmente, el enriquecimiento en nutrientes (nitrógeno y fósforo) de las aguas superficiales estimula el crecimiento de la vegetación acuática, que al descomponerse consume el oxígeno disuelto en el agua provocando la eutrofización del cauce.

1.2 La cuenca del Arba y el polígono de riegos de Bardenas

La cuenca del Arba comprende parte de las regiones de Aragón y Navarra (España). Su geología presenta glaciares y aluviales cuaternarios que se asientan sobre materiales terciarios que son considerados como la principal fuente natural de las sales disueltas en el drenaje de la cuenca. Los principales cursos fluviales son los ríos Riguel, Arba de Luesia y Arba de Biel, que nacen en la sierra de Santo Domingo, para posteriormente, unirse en Ejea de los Caballeros dando nombre al río Arba, el cual desemboca en el Ebro a su paso por Gallur.

La cuenca se caracteriza por tener veranos calurosos e inviernos fríos con elevadas oscilaciones térmicas diarias. La precipitación media anual de toda la cuenca es del orden de 550 mm, siendo inferior a 400 mm en su parte más meridional (ITGE, 1985). Las estaciones de primavera y otoño son las más lluviosas, mientras que verano e invierno son las más secas. En consecuencia, las necesidades hídricas no pueden ser únicamente cubiertas por la lluvia, por lo que una producción agrícola aceptable requiere el riego durante la mayor parte del año.

El denominado “Sistema de Riego Bardenas” fue puesto en marcha en el año 1958 con la construcción de la presa de Yesa y del Canal de Bardenas (Fig.1). En la actualidad, la superficie regada a través del Canal de Bardenas, que se asocia a los Planes Coordinados de Bardenas I, es del orden de 52.600 ha en su mayoría regadas por inundación. De la segunda parte del Canal de Bardenas (Bardenas II) se riegan actualmente unas 3.750 ha, estimándose que puede quedar pendiente la ejecución de otras 24.000 ha

para alcanzar la superficie a transformar que aparece en los Planes Coordinados de Obras (<http://www.chebro.es>).

Gran parte de los regadíos actuales de Bardenas es drenada por el sistema compuesto por los ríos Riguel y Arba, y la totalidad de los nuevos regadíos en transformación de Bardenas II será drenada a través del Arba, por lo que la calidad de estos ríos está condicionada al desarrollo de estos regadíos y, más concretamente, a la recepción de sus flujos de retorno.



Figura 1.— Regadíos actuales (Bardenas I) y en transformación (Bardenas II) en el sistema de Bardenas. Cuenca del Arba.

1.3 Objetivos

Los objetivos de este estudio son: (1) analizar la variabilidad espacial de la calidad de los ríos Riguel y Arba (salinidad y concentración en nitrato) asociada a la variabilidad geológica de la cuenca del Arba y a la influencia del sistema agrario, (2) profundizar en el conocimiento de los procesos básicos que intervienen en la salinización de las aguas del sistema Riguel-Arba y (3) realizar una estimación del comportamiento del sistema Riguel-Arba ante hipotéticos escenarios que contemplen la modernización de los regadíos actuales de Bardenas I y la total transformación en riego de Bardenas II.

2 Material y métodos

Se seleccionaron de Norte a Sur de la cuenca del Arba (Fig. 2) cuatro series estratigráficas (1-San Bartolomé, 2-El Bayo, 3-Castillo de Sora y 4-Tauste) que fueron utilizadas para el análisis de los materiales geológicos terciarios (fuente de sales) de la cuenca media-baja del Arba.

Se procedió al levantamiento de dos columnas estratigráficas (series 3 y 4) y se tomaron 21 muestras de rocas representativas de las distintas litologías, que posteriormente fueron trasladadas al laboratorio para su análisis químico (SO_4^- , CO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , H_2O , materia orgánica y residuo insoluble al ataque realizado durante 2 horas con HCl 0,8 N a 50 °C) y mineralógico (difracción de rayos X y estudio petrográfico de láminas delgadas).

Las 21 muestras de rocas se han clasificado según su composición química mediante el desarrollo de un análisis Cluster (Statgraphics 2.1). Los datos han sido estandarizados y se ha utilizado como medida de similitud la distancia euclídea al cuadrado. El procedimiento para la obtención de asociaciones jerárquicas ha sido el método Ward.

Para analizar la variabilidad espacial en la composición química de las aguas del sistema Riguel-Arba se seleccionaron un total de 14 puntos de agua de los cuales 11 se distribuyeron siguiendo la línea de flujo desde el río Riguel en Sádaba (P1, comienzo del área regable de Bardenas, Fig. 2) hasta el río Arba en Gallur (P11, desembocadura del Arba en el Ebro, Fig. 2) y los otros tres se situaron en el Canal de Bardenas (CB), en el Barranco de Valareña (BV) y en un manantial en Bardenas I (M) (Fig. 2). De los 11 puntos muestreados en el sistema Riguel-Arba, 8 pertenecen al río Riguel (del P1 al P8) y 3 al Arba (del P9 al P11).

El 27 de junio de 2000 se tomó una muestra de agua en cada punto seleccionado y se determinó en campo la temperatura, el pH y la CE a 25 °C, y en laboratorio el contenido en CO_3^- , HCO_3^- , SO_4^- , Cl^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+ .

La información obtenida en el análisis de las muestras de rocas y aguas alimentaron un paquete de programas informáticos (WATEQ 4F, NETPATH, PHREEQC) desarrollados por el Servicio Geológico Americano (USGS).

WATEQ 4F (Ball y Nordstrom, 1991), realiza los cálculos de especiación-solubilidad, determinando el estado de saturación de las muestras de agua respecto a los minerales (calcita, dolomita, yeso y halita) y gases (CO_2) de interés en el sistema. Se basa en un modelo termodinámico y en los datos observados de calidad del agua, pudiendo deducir si un mineral tiende a disolverse o a precipitar en un ambiente dado.

NETPATH (Plummer y col., 1994) está basado en cálculos de balance de masa. Este programa determina la cantidad de minerales reactivos y productos (supuestos de interés en el sistema) que deben disolverse o precipitar entre puntos seleccionados como inicial y

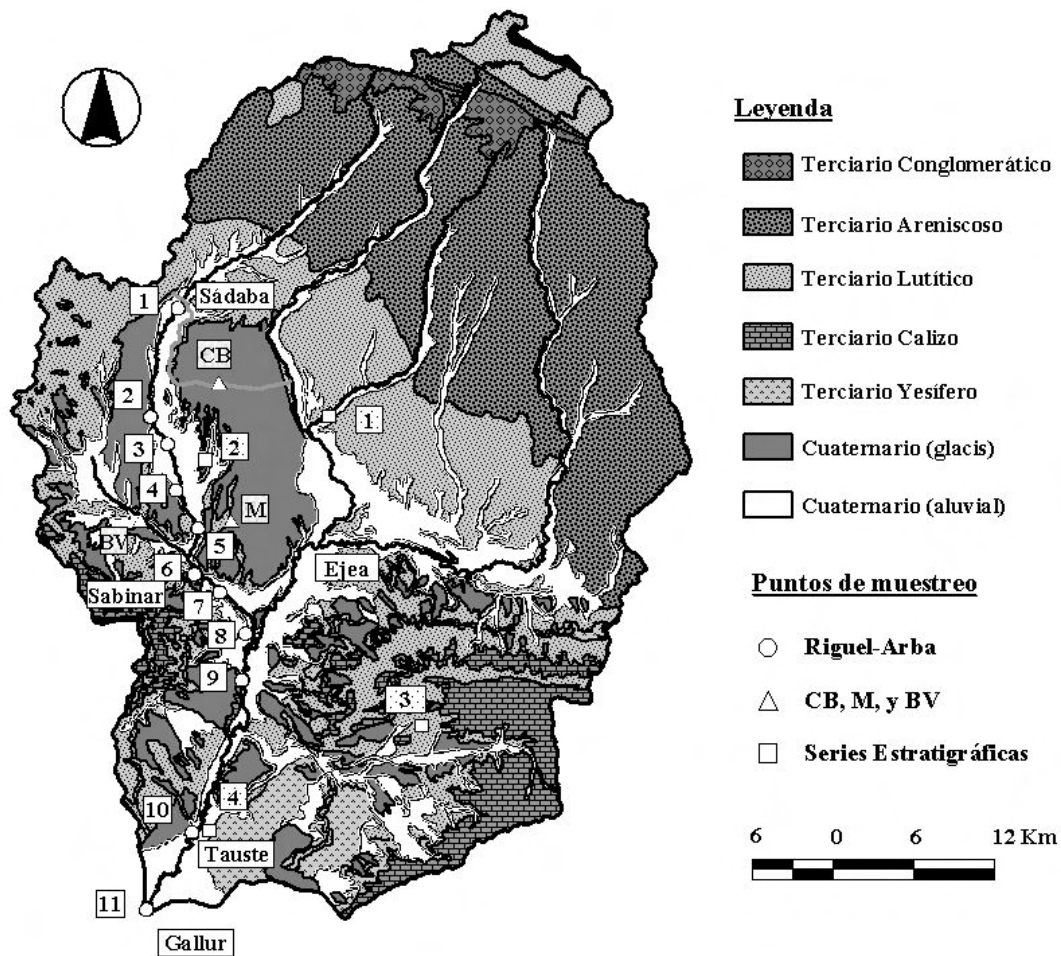


Figura 2.— Localización de los puntos de muestreo de aguas y materiales geológicos.

final para dar cuenta de la calidad del agua observada en ambos puntos. Con este programa se ha modelizado la evolución geoquímica del paso de agua de riego (muestra CB) a flujos de drenaje del riego en el área de influencia del manantial muestreado (muestra M) (procesos de evaporación y disolución-precipitación de minerales), y la incorporación de estos flujos de drenaje (muestra M) al agua circulante por el Riguel antes de la desembocadura del barranco de Valareña (puntos P2 y P5, procesos de mezclas de aguas y disolución-precipitación de minerales).

PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) está basado en cálculos de pautas de reacción. Este programa determina la composición química que debería tener una solución acuosa, y la cantidad de mineral que se disolverá o precipitará si se suponen un conjunto de reacciones hipotéticas y de restricciones termodinámicas.

Con PHREEQC se han validado los modelos obtenidos por NETPATH y se ha simulado el efecto que tiene sobre los flujos de drenaje el cambio a sistemas de riego presurizado de alta eficiencia.

PHREEQC también ha sido utilizado para la simulación de hipotéticos escenarios

de modernización de Bardenas I (basados en el cambio a sistemas de riego a presión) y de transformación en regadío de Bardenas II. Con estas simulaciones se han obtenido respectivamente, estimaciones de la variación de la salinidad del tramo bajo del Riguel (en P5) y del Arba en Tauste (P10).

El punto P5 fue elegido para la simulación del efecto de la modernización sobre las aguas del Riguel porque es el último punto de muestreo de este río antes de la desembocadura del Barranco de Valareña y porque en este punto se recogen los retornos de riego de los amplios glaciares de Bardenas I, cuya composición química actual puede ser representada por el agua del manantial muestreado (M).

El Arba en Tauste (P10) fue seleccionado para la simulación del efecto de una completa transformación en riego de Bardenas II debido a que por este punto del Arba circularán todos los flujos de drenaje de los nuevos regadíos.

Las simulaciones realizadas están sujetas a un conjunto de hipótesis, discutidas posteriormente, que nos permiten estimar con relativa aproximación la calidad del agua de drenaje del regadío en los nuevos escenarios y la proporción de mezcla entre los retornos del riego y el flujo circulante por los puntos de los ríos estudiados (P5 y P10).

3 Resultados y discusión

3.1 *Materiales geológicos*

3.1.1 SERIES ESTRATIGRÁFICAS ESTUDIADAS

La Figura 3 presenta la imagen de las cuatro series estratigráficas y la posición de las muestras recogidas. San Bartolomé corresponde a formaciones lutíticas con intercalaciones de paleocanales de arenita mientras que en El Bayo los paleocanales de arenita desaparecen pasando a niveles tabulares. Las series del Castillo de Sora y Tauste corresponden a series subhorizontales donde se alternan bancos de calizas, yesos, arcillas y limos.

La columna estratigráfica levantada en el Castillo de Sora cuenta con un total de 22,5 metros en los que se distinguieron 4 tramos (Fig. 4). El tramo 1 abarca 2 metros de lutitas verde azuladas laminadas con yesos nodulares. Sobre él se emplazan 3 metros de lutitas rojas laminadas con intercalaciones de yeso y bancos limosos de potencia decimétrica a techo (Tramo 2). El tramo 3 corresponde a 15 metros de lutitas y margas bandeadas con colores azulado verdosos en la base y rojizos en techo, que presentan intercalaciones de nódulos de yeso alineados, más abundantes hacia techo del tramo y en los bancos rojizos. La serie concluye con 2,5 metros donde se alternan margas, calizas y yesos en estratos de potencia decimétrica a centimétrica (Tramo 4).

La columna estratigráfica levantada en Tauste cuenta con un total de 18,5 metros en los que se distinguieron 5 tramos (Fig. 4). Los 2 primeros metros (Tramo 1) son lutitas

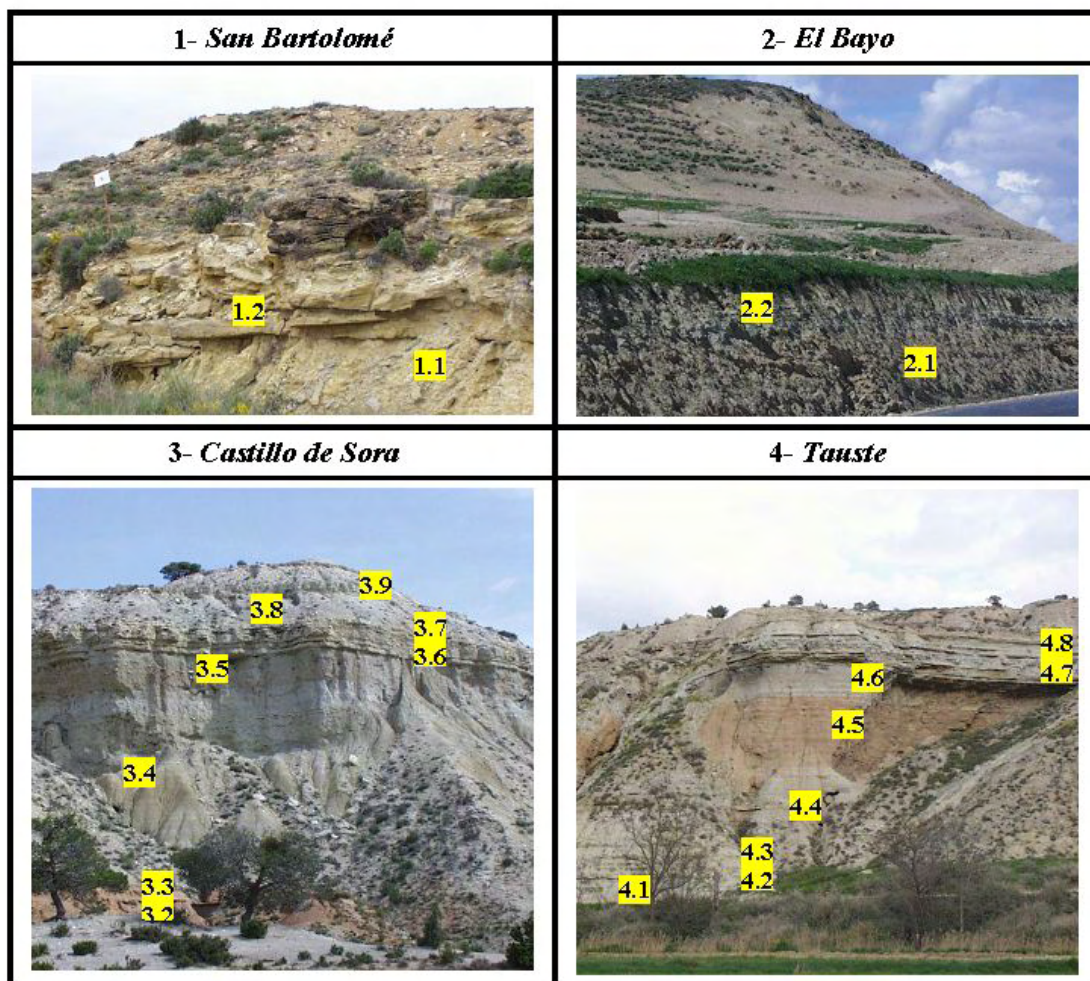


Figura 3.— Series estratigráficas de San Bartolomé, El Bayo, Castillo de Sora y Tauste (de izquierda a derecha y de arriba a abajo). Localización de las muestras.

verde azuladas con estructura laminar. El segundo tramo está constituido por 6 metros de alternancia de yesos con lutitas margosas de color pardo verdosas. La potencia de los bancos de yeso es decimétrica y son más abundantes hacia la base aunque siempre sin superar el 50%. A techo se presentan bancos más calcáreos de potencia decimétrica. El tramo 3 consiste en 6 metros de lutitas rojas laminadas en bandeados decimétricos con presencia de algunos bancos más limosos. Sobre él, 2,5 metros (Tramo 4) de lutitas verde azuladas con estructura laminada. La columna concluye con 2 metros de alternancia de yesos y lutitas margosas de color verde azuladas (Tramo 5). Los bancos de yeso son de potencia decimétrica y presentan una estructura tableada con subestructura nodular.

El estudio conjunto de las cuatro series, indica una secuencia de ambientes de sedimentación en el sentido de los aportes (Norte-Sur), desde ambientes fluviales hasta depósitos lacustres. La zona más septentrional constituye un tramo lutítico con presencia de nive-

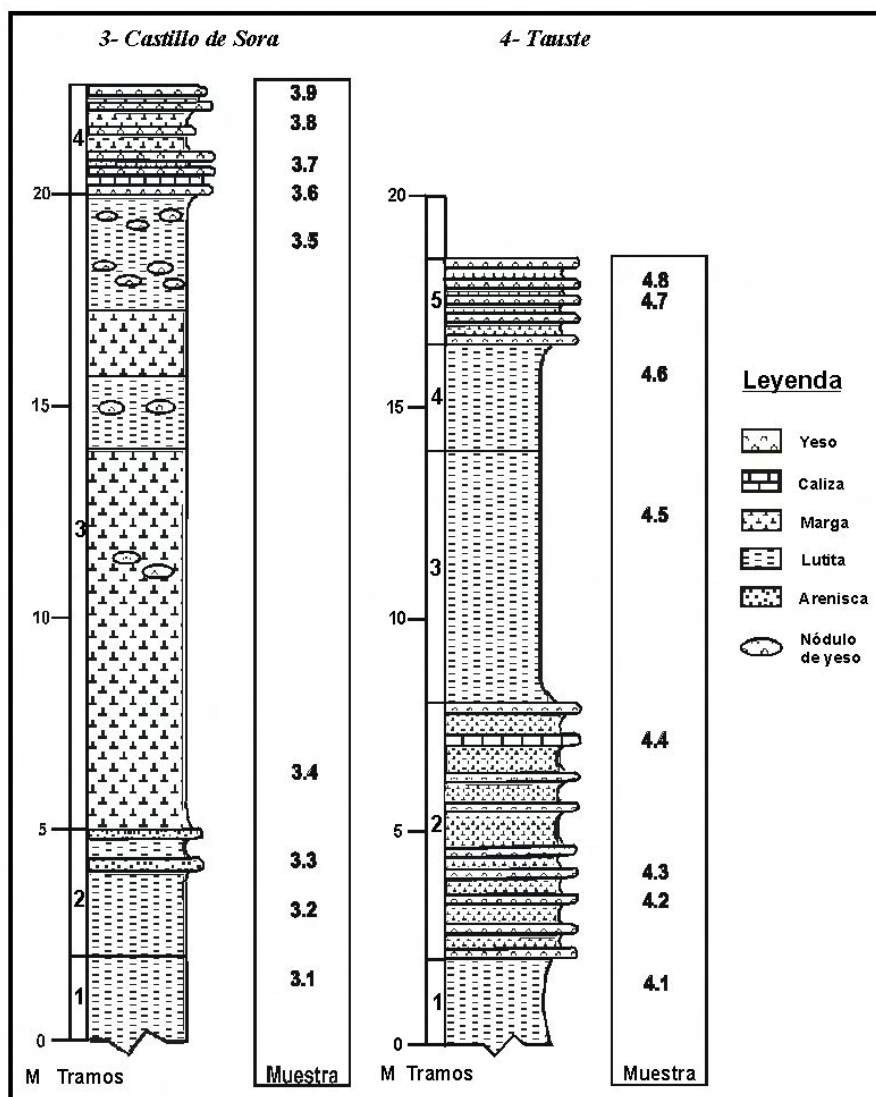


Figura 4.— Columnas estratigráficas del Castillo de Sora (izda.) y Tauste (dcha.). Localización de las muestras.

les de arenitas, que son más abundantes hacia el techo. Estos niveles de arenita están relacionados con paleocanales que presentan base erosiva, granoclasificación decreciente y estratificaciones cruzadas. Hacia el Sur los niveles de arenita van perdiendo potencia y comienzan a aparecer bancos de calizas lacustres. La parte más meridional corresponde a facies centrales de cuenca, consistentes en una alternancia de yesos, arcillas y limos, de tonos pardos y grises, con intercalaciones ocasionales de finas capas de calizas asociadas a los yesos.

3.1.2 ANÁLISIS QUÍMICOS

La Tabla 1 presenta los resultados de los análisis químicos realizados a las muestras de rocas. El residuo insoluble está asociado mayoritariamente a la sílice y la escasa diferencia entre el porcentaje total y el 100% está asociada a elementos solubles no analizados y a

los errores en los análisis químicos.

Las 21 muestras han sido clasificadas en grupos discriminados por el análisis multivariante Cluster a partir de su composición química. El dendrograma de la Figura 5 presenta los componentes de los tres grupos discriminados por el análisis Cluster y su similitud (distancia euclídea al cuadrado).

Tabla 1.— Porcentaje de CO_3^- , SO_4^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , H_2O , materia orgánica (MO) y residuo insoluble al ataque realizado con HCl (RI) en las 21 muestras de rocas.

| Muestra | % CO_3^- | % SO_4^- | % Ca^{2+} | % Mg^{2+} | % Na^+ | % K^+ | % H_2O | %MO | % RI | %Total |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-----------------|----------------|------------------------|------|-------|--------|
| 1.1 | 14,44 | 1,51 | 10,24 | 0,18 | 0,32 | 0,09 | 1,57 | 4,35 | 66,10 | 98,80 |
| 1.2 | 26,89 | 0,96 | 16,36 | 0,16 | 0,10 | 0,04 | 0,34 | 0,88 | 51,04 | 96,77 |
| 2.1 | 27,20 | 0,95 | 16,65 | 0,29 | 0,08 | 0,04 | 0,32 | 0,70 | 48,61 | 94,84 |
| 2.2 | 20,52 | 0,92 | 12,75 | 0,31 | 0,20 | 0,11 | 1,59 | 2,60 | 58,75 | 97,75 |
| 3.1 | 20,06 | 2,47 | 12,7 | 1,91 | 0,50 | 0,25 | 2,43 | 3,58 | 48,62 | 92,52 |
| 3.2 | 6,94 | 2,58 | 3,78 | 1,31 | 1,17 | 0,31 | 2,41 | 4,91 | 70,99 | 94,40 |
| 3.3 | 8,65 | 13,28 | 9,52 | 0,43 | 0,21 | 0,11 | 4,52 | 0,72 | 61,50 | 98,95 |
| 3.4 | 17,91 | 1,51 | 11,58 | 1,26 | 0,30 | 0,25 | 1,90 | 3,67 | 56,32 | 94,70 |
| 3.5 | 18,31 | 2,05 | 10,83 | 1,35 | 0,40 | 0,26 | 1,67 | 3,48 | 56,08 | 94,42 |
| 3.6 | 7,17 | 48,44 | 20,63 | 1,33 | 0,08 | 0,03 | 17,40 | 0,92 | 3,30 | 99,31 |
| 3.7 | 43,71 | 3,94 | 17,31 | 8,67 | 0,34 | 0,14 | 1,63 | 4,50 | 15,92 | 96,15 |
| 3.8 | 46,72 | 2,32 | 29,80 | 0,79 | 0,18 | 0,10 | 0,77 | 2,31 | 14,46 | 97,44 |
| 3.9 | 47,36 | 7,56 | 23,08 | 5,85 | 0,17 | 0,08 | 2,12 | 2,46 | 8,64 | 97,31 |
| 4.1 | 20,63 | 1,62 | 12,51 | 1,31 | 0,41 | 0,22 | 1,31 | 4,35 | 51,71 | 94,09 |
| 4.2 | 40,39 | 8,94 | 19,06 | 5,73 | 0,20 | 0,10 | 3,37 | 1,01 | 17,91 | 96,71 |
| 4.3 | 12,09 | 39,87 | 20,63 | 1,56 | 0,09 | 0,05 | 14,99 | 0,61 | 7,87 | 97,75 |
| 4.4 | 42,12 | 8,72 | 21,82 | 4,84 | 0,22 | 0,10 | 3,40 | 2,25 | 16,11 | 99,57 |
| 4.5 | 9,64 | 1,96 | 4,65 | 0,80 | 0,32 | 0,29 | 2,11 | 2,23 | 74,57 | 96,56 |
| 4.6 | 22,04 | 1,79 | 11,20 | 2,52 | 0,22 | 0,30 | 2,13 | 1,88 | 51,82 | 93,89 |
| 4.7 | 4,07 | 50,02 | 20,40 | 0,78 | 0,09 | 0,05 | 18,36 | 0,45 | 5,16 | 99,37 |
| 4.8 | 44,94 | 3,59 | 18,62 | 7,76 | 0,13 | 0,13 | 2,39 | 2,18 | 13,82 | 93,57 |

El grupo A es el más numeroso (12 unidades) incluyéndose aquellas muestras localizadas en las series más cercanas al área fuente (series de San Bartolomé y El Bayo), el 55% de las muestras de la serie del Castillo de Sora y un 37% de las muestras de la serie Tauste. El grupo B, sin representación de las series de San Bartolomé y el Bayo, está compuesto por un idéntico porcentaje de muestras del Castillo de Sora (50%) y Tauste (50%). El grupo C se compone únicamente por 2 muestras de la serie de Tauste y una del Castillo de Sora. Por tanto, se establece una clara relación entre la localización de las

muestras de Norte a Sur y su inclusión en los grupos del A al C.

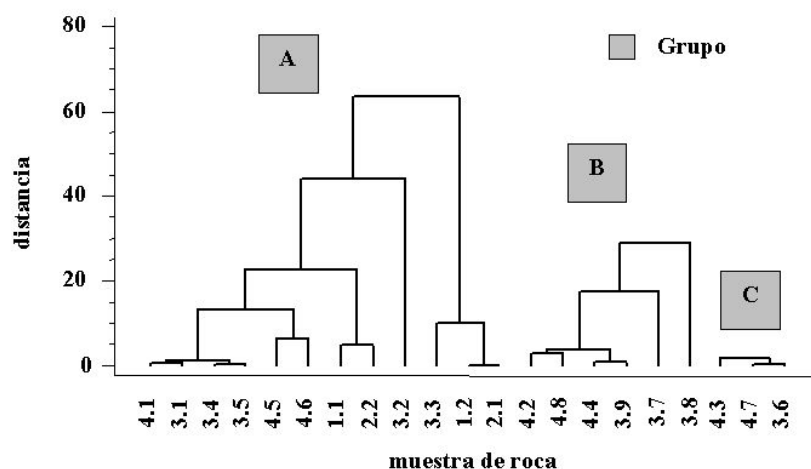


Figura 5.— Dendrograma del análisis Cluster realizado para las 21 muestras de rocas a partir de su composición química (CO_3^- , SO_4^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , H_2O , MO y RI).

El grupo C presenta la mayor similitud de muestra (distancia < 1), indicativo de la igualdad química de las muestras que lo componen. Los otros dos grupos, más numerosos, presentan una menor similitud, aunque dentro de ellos existen subgrupos de muestras cuya composición química es muy semejante.

La Figura 6 presenta la distribución de las muestras según su porcentaje en sulfatos, carbonatos y residuo insoluble al ataque realizado (mayoritariamente sílice) donde se observa cómo las muestras de cada grupo se concentran hacia el componente que las caracteriza (silíceas, carbonatadas o sulfatadas).

La Tabla 2 presenta el valor de los centroides de cada grupo en los diferentes componentes químicos. El grupo A se encuentra dominado por minerales silíceos (RI= 58%) y secundariamente por carbonato cálcico ($\text{CO}_3^- = 18\%$, $\text{Ca}^{2+} = 11\%$); mientras que en el grupo B, la disminución en minerales silíceos (RI= 14%) es contrarrestada por la presencia dominante de carbonato ($\text{CO}_3^- = 44\%$) asociado tanto al calcio ($\text{Ca}^{2+} = 22\%$) como al magnesio ($\text{Mg}^{2+} = 6\%$). El grupo C ha reducido considerablemente su contenido en silicatos (RI= 5%) y carbonatos ($\text{CO}_3^- = 8\%$) presentando el sulfato como anión dominante ($\text{SO}_4^- = 46\%$), al que se le asocia el calcio ($\text{Ca}^{2+} = 21\%$) y agua ($\text{H}_2\text{O} = 17\%$), constituyendo la composición estequiométrica del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

La evolución del calcio y magnesio desde el grupo A al C es inversa. Mientras el Ca^{2+} se incrementa y estabiliza, el Mg^{2+} se incrementa en el paso al grupo B y luego decrece hasta un valor superior al presentado en el grupo A. Atendiendo al menor contenido de CO_3^- del grupo C frente al A, parte del magnesio presente en el grupo C debe estar asociado a fases minerales sulfatadas.

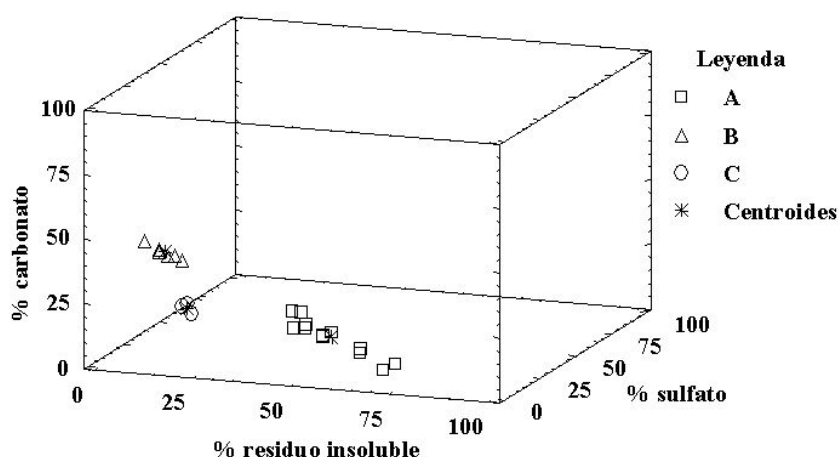


Figura 6.— Distribución de las muestras según su contenido en residuo insoluble, carbonatos y sulfatos. Posición de los centroides de los grupos discriminados por el análisis Cluster.

Tabla 2.— Valor de los centroides de los grupos discriminados en el análisis Cluster. (A silíceo, B carbonatado, C sulfatado)

| Grupo | muestras | %CO ₃ ⁻ | %SO ₄ ⁻ | %Ca ²⁺ | %Mg ²⁺ | %Na ⁺ | %K ⁺ | %H ₂ O | %MO | %RI |
|-------|----------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|-------------------|------|-------|
| A | 12 | 17,76 | 2,63 | 11,06 | 0,99 | 0,35 | 0,19 | 1,86 | 2,78 | 58,01 |
| B | 6 | 44,20 | 5,85 | 21,62 | 5,61 | 0,21 | 0,11 | 2,28 | 2,45 | 14,48 |
| C | 3 | 7,77 | 46,11 | 20,55 | 1,23 | 0,09 | 0,44 | 16,91 | 0,66 | 5,44 |

Los resultados de los análisis químicos verifican el paralelismo entre la composición química de las rocas y la progradación de facies en la cuenca del Arba. Así de Norte a Sur se presenta un decrecimiento de los silicatos para dar paso a materiales carbonatados y posteriormente sulfatados.

3.1.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO Y PETROLÓGICO

La Figura 7 presenta los difractogramas de tres muestras (2.2, 3.5 y 4.7), representativas de los tres grupos (silíceas, carbonatadas y sulfatadas) discriminados según la composición química. El difractograma de las muestras pertenecientes a los grupos A y B (silíceas y carbonatadas) detecta la presencia mayoritaria de cuarzo (SiO₂) y calcita (CaCO₃) además de otros minerales carbonatados (ankerita (Ca[Fe,Mg](CO₃)₂), dolomita ([Ca,Mg](CO₃)₂), feldespatos (albita, NaAlSi₃O₈ y anortita, CaAl₂Si₂O₈) y micas (moscovita, illita, clorita, caolinita) en menor cantidad.

La diferencia en los difractogramas del grupo A y B reside en la proporción de los distintos minerales; así, mientras el grupo A presenta un mayor contenido de cuarzo, en el grupo B la fase mineral predominante es la calcita.

Los difractogramas del grupo C (sulfatadas) detectan una composición mineral con predominio mayoritario del yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y presencia minoritaria de basanita ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4).

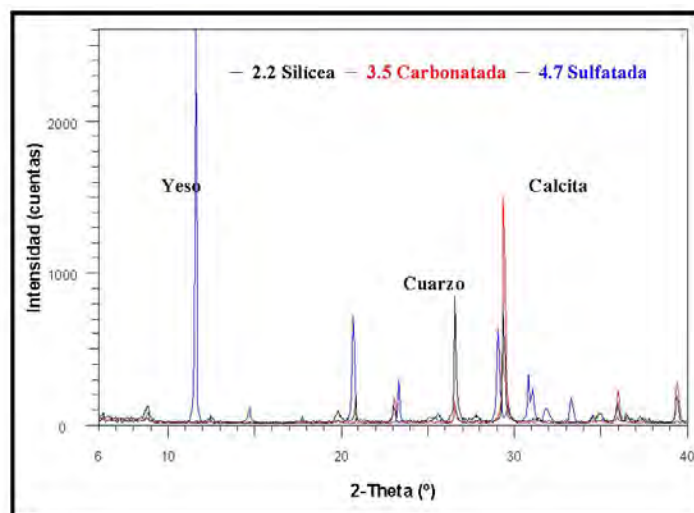


Figura 7.— Difractograma de tres muestras (2.2, 3.5 y 4.7) representativas de los grupos litológicos discriminados. Posición de los picos de mayor intensidad del yeso, cuarzo y calcita.

El estudio petrográfico de las muestras confirmó la presencia de los minerales detectados por la difracción de rayos X, excepto de la basanita, cuya presencia en los difractogramas fue atribuida a la deshidratación del yeso en el proceso de molienda. Las muestras 1.2, 2.2 y 3.3 se clasificaron como litoarenitas con clastos dominantes de carbonato cálcico micrítico, cuarzo y feldespato, y cemento esparítico de calcita (Fig. 8). Entre ellas, las muestras más meridionales presentan minerales de cuarzo más redondeados, menor contenido en feldespatos, y menor tamaño de grano, evidenciando un mayor transporte.

El resto de muestras del grupo A y B son arcillosas o margosas y su estudio al microscopio no aporta gran información. Es frecuente en estas muestras observar laminaciones marcadas por niveles de pequeños clastos de cuarzo o fósiles (bivalvos). Algunas muestras presentan grietas que han sido ocupadas por yeso, dejando residuos en los límites de antiguas venas (Fig. 9). Las muestras del grupo C (3.6, 4.3 y 4.7) están constituidas por yeso secundario, con presencia de texturas microcristalinas en zonas internas y grandes cristales con inclusiones de anhidrita en las zonas externas (Fig. 9). La presencia de morfologías biconvexas en algunas muestras permite predecir un origen primario de yeso lenticular, por lo que se deduce una formación característica de los procesos de precipitación sulfatada subaérea en medios de playa-lago.

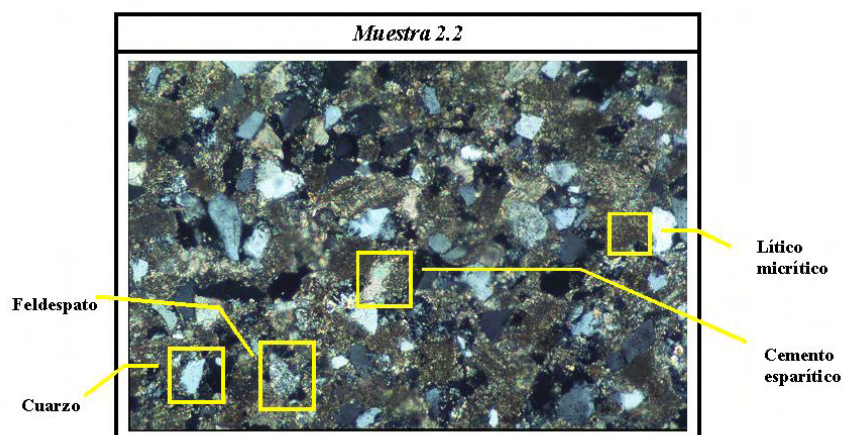


Figura 8.— Imagen al microscopio (nícoles cruzados) de la lámina delgada de la muestra 2.2 (grupo A).

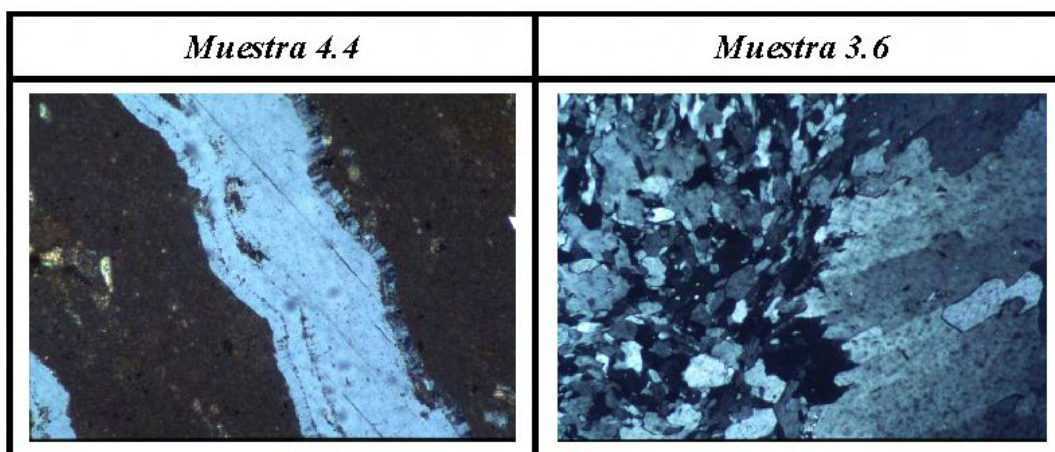


Figura 9.— Imagen al microscopio (nícoles cruzados) del relleno de grietas por yeso (muestra 4.4) y textura de éste en las muestras del grupo C (muestra 3.6).

3.2 Evolución de la composición química de las aguas del sistema Riguel-Arba

La Tabla 3 presenta los resultados de las determinaciones realizadas en las 14 muestras de agua utilizadas en el presente trabajo. Dado que las muestras se recogieron entre las 10 y las 15 horas del 20 de junio, la temperatura fue alta ($T_{\text{media}}^{\text{ra}} = 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y poco variable, destacando la menor temperatura del agua del Canal de Bardenas ($\text{CB} = 16,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y del manantial de Santa Anastasia ($\text{M} = 18,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Las muestras presentaron un pH básico ($\text{pH}_{\text{medio}} = 8,1$) con escasa variación; únicamente destaca el menor pH del agua del manantial ($\text{pH} = 7,1$). Los análisis químicos de las muestras fueron satisfactorios ya que el desbalance entre aniones y cationes es pequeño.

La Figura 10 presenta los diagramas de Piper para las 11 muestras del sistema Riguel-Arba y de las muestras CB, M, BV. Las muestras del sistema Riguel-Arba evolucionan

Tabla 3.— Muestra, Temperatura (T^{ra} ; °C), pH, conductividad eléctrica a 25 °C (CE; dS/m), aniones ($CO_3^{=}$, HCO_3^{-} , $SO_4^{=}$, Cl^{-} , NO_3^{-} ; meq/L) y cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y K^{+} ; meq/L) analizados y balance del análisis químico en las 14 muestras de agua. Balance (%) calculado como: $200(\text{cationes}-\text{aniones})/(\text{cationes}+\text{aniones})$

| | T^{ra} | pH | CE | $CO_3^{=}$ | HCO_3^{-} | $SO_4^{=}$ | Cl^{-} | NO_3^{-} | Ca^{2+} | Mg^{2+} | Na^{+} | K^{+} | Balance |
|----|----------|-----|------|------------|-------------|------------|----------|------------|-----------|-----------|----------|---------|---------|
| 1 | 19,5 | 8,2 | 0,39 | 0,04 | 3,20 | 0,74 | 0,46 | 0,08 | 2,76 | 0,69 | 0,77 | 0,03 | -6,10 |
| 2 | 22,6 | 8,3 | 0,53 | 0,06 | 3,84 | 1,13 | 0,83 | 0,24 | 3,22 | 1,14 | 1,17 | 0,12 | -7,83 |
| 3 | 21,6 | 8,2 | 0,61 | 0,00 | 4,08 | 1,17 | 0,87 | 0,29 | 3,56 | 1,22 | 1,25 | 0,11 | -4,40 |
| 4 | 24,1 | 8,6 | 0,68 | 0,18 | 4,32 | 1,23 | 1,25 | 0,40 | 3,81 | 1,60 | 1,63 | 0,10 | -3,27 |
| 5 | 21,4 | 8,0 | 0,77 | 0,00 | 4,38 | 1,87 | 1,68 | 0,52 | 4,16 | 1,54 | 2,23 | 0,10 | -5,10 |
| 6 | 22,0 | 8,1 | 1,13 | 0,00 | 4,40 | 2,94 | 4,26 | 0,50 | 5,14 | 1,79 | 4,87 | 0,12 | -1,46 |
| 7 | 23,7 | 8,0 | 1,10 | 0,00 | 4,44 | 2,62 | 4,09 | 0,52 | 5,20 | 1,76 | 4,59 | 0,13 | 0,08 |
| 8 | 21,7 | 8,1 | 1,13 | 0,02 | 4,58 | 2,34 | 3,55 | 0,58 | 5,33 | 1,68 | 3,83 | 0,12 | -1,09 |
| 9 | 21,7 | 8,0 | 1,12 | 0,00 | 4,72 | 2,34 | 4,03 | 0,61 | 5,23 | 1,82 | 4,55 | 0,14 | 0,23 |
| 10 | 23,6 | 8,0 | 2,21 | 0,08 | 5,34 | 7,61 | 9,99 | 0,74 | 6,92 | 3,94 | 12,91 | 0,17 | 0,77 |
| 11 | 21,5 | 8,0 | 1,70 | 0,00 | 5,44 | 5,95 | 6,71 | 0,82 | 6,36 | 3,59 | 10,17 | 0,19 | 7,01 |
| CB | 16,8 | 8,0 | 0,33 | 0,00 | 3,07 | 0,31 | 0,31 | 0,08 | 2,64 | 0,49 | 0,48 | 0,03 | -12,00 |
| M | 18,4 | 7,1 | 0,89 | 0,00 | 5,72 | 1,19 | 1,19 | 1,56 | 6,47 | 1,30 | 1,12 | 0,08 | -12,64 |
| BV | 22,2 | 8,1 | 1,27 | 0,00 | 4,08 | 3,77 | 4,82 | 0,53 | 5,66 | 1,84 | 6,00 | 0,13 | 3,16 |

desde aguas bicarbonatadas cálcicas (muestras 1,2,3) con poca mineralización ($CE_1 = 0,39$ dS/m) a cloruradas-sulfatadas-bicarbonatadas sodico-cálcicas (muestras 10 y 11) de mineralización sensiblemente mayor ($CE_{10} = 2,21$ dS/m).

CB y M tienen una composición bicarbonatada cálcica mientras que BV es clorurada-bicarbonatada-sulfatada sódica-cálcica. La mineralización de CB es muy baja ($CE_{CB} = 0,33$ dS/m) mientras que M y BV presentaron una mineralización mayor ($CE_M = 0,89$ dS/m, $CE_{BV} = 1,27$ dS/m).

La Figura 11 presenta la evolución espacial en la composición química (aniones y cationes) de las aguas del sistema Riguel-Arba desde Sádaba (inicio de la zona regable) hasta Gallur (desembocadura en el Ebro). Los diagramas muestran una pauta general marcada por el incremento de todos los iones analizados según el sentido del flujo. En la cabecera del Riguel (Sádaba) domina el bicarbonato, que sufre un ligero y constante incremento hasta la desembocadura del Arba en Gallur. El cloruro y el sulfato, que comienzan siendo minoritarios, sufren ascensos en El Sabinar y en Tauste, donde alcanzan el máximo valor ($Cl^{-} = 9,99$ meq/L, $SO_4^{=} = 7,61$ meq/L) y se constituyen como los aniones dominantes.

La evolución de los cationes se ajusta a la de los aniones. Así, el Na^{+} responde a las

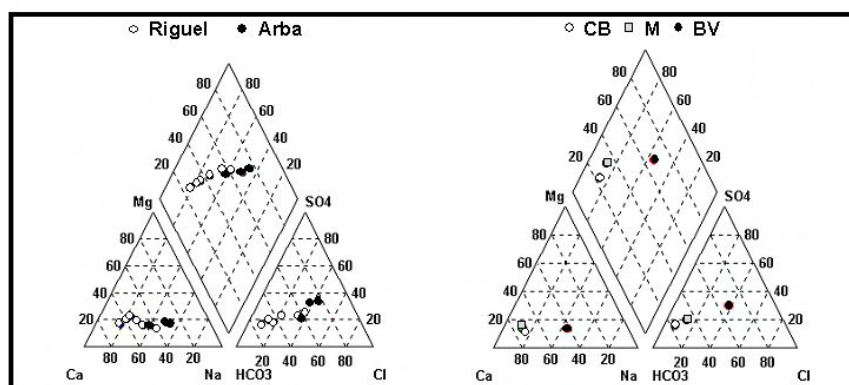


Figura 10.— Diagramas de Piper de las 11 muestras del sistema Riguel-Arba y de las aguas del Canal de Bardenas (CB), manantial de Santa Anastasia (M) y barranco de Valareña (BV).

variaciones del Cl^- (según la composición de la halita) dominando el tramo final del Arba mientras que el Ca^{2+} (dominante del tramo inicial del Riguel) y el Mg^{2+} responden a las variaciones del bicarbonato y sulfato (respondiendo a la composición de calcita, dolomita y yeso).

Es interesante destacar que a 30 km de Sádaba el contenido en Na^+ comienza a ser ligeramente superior al de Cl^- y el ascenso de Mg^{2+} es más brusco que el de bicarbonato. Estos hechos pueden ser explicados por la disolución de minerales sulfatados sódicos y magnésicos como la thenardita (Na_2SO_4), mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) y epsonita ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) que, aunque no han sido detectados por el análisis mineralógico, se sabe de su existencia en la cuenca baja del Arba, concretamente en la Formación Zaragoza (IGME, 1980). El contenido en potasio es muy inferior al resto de cationes y presenta un ligero ascenso según el sentido del flujo.

La mayor presencia de minerales evaporíticos muy solubles en la cuenca baja del Arba se corresponde con las mayores concentraciones, mostrando la relación entre la evolución de la composición química de las aguas del sistema Riguel-Arba y la evolución en la composición química y mineralógica de los materiales geológicos terciarios de la cuenca media-baja del Arba.

La CE de las aguas está relacionada con su composición iónica y concentración; por tanto, su evolución en las aguas del sistema Riguel-Arba se corresponde a la encontrada para los iones, incrementándose según el sentido del flujo desde los bajos valores del Riguel hasta los más altos del Arba. Sin embargo, la $[\text{NO}_3^-]$ con un comportamiento también ascendente según el sentido del flujo (Fig. 12) no presenta las variaciones de la CE, demostrando una procedencia agrícola frente al origen geológico del resto de iones.

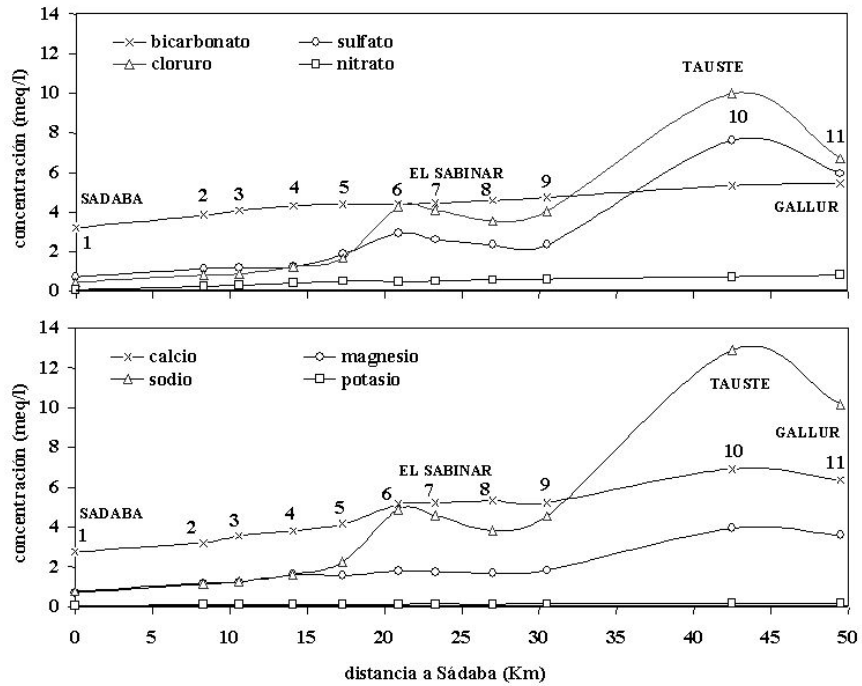


Figura 11.— Evolución espacial en la composición química (aniones y cationes) de las aguas del sistema Riguel-Arba.

La CE del Riguel en Sádaba (0,39 dS/m) aumentó lentamente (0,02 dS/m por km) hasta su confluencia con el barranco de Valareña donde presentó un brusco ascenso (de 0,77 a 1,13 dS/m) consecuencia de la mezcla. En los siguientes 10 km permaneció constante en torno a 1,12 dS/m y posteriormente ascendió rápidamente (0,1 dS/m por km) hasta alcanzar el máximo valor en Tauste (2,21 dS/m) por la mayor presencia de minerales evaporíticos. En el tramo final, el Arba circula por el aluvial del Ebro drenando aguas con menor contenido en sales por lo que la CE en Gallur descendió hasta 1,70 dS/m.

El bajo contenido de nitrato en Sádaba (5 mg/L) asciende rápidamente (1,6 mg/L por

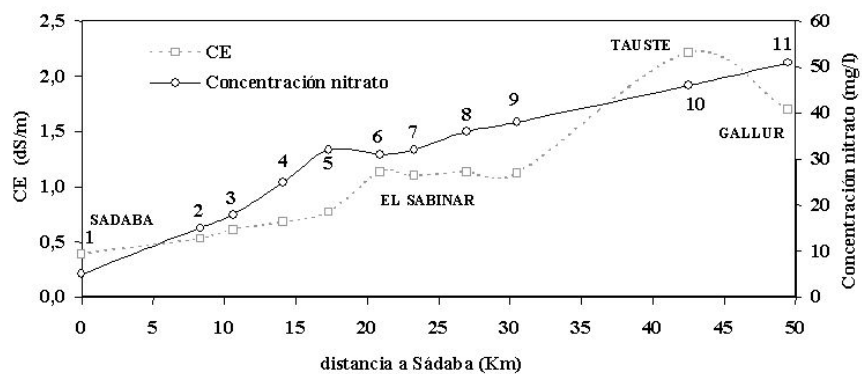


Figura 12.— Evolución en la conductividad eléctrica (CE; dS/m) y concentración de nitrato (nitrato; mg/L) de las aguas del sistema Riguel-Arba.

km) en el tramo del Riguel hasta que la mezcla en El Sabinar con aguas del Barranco de Valareña, de menor contenido en nitrato, diluye las aguas. Posteriormente, las aguas del Arba continúan aumentando su concentración en nitrato (0,6 mg/L por km) hasta superar el límite sanitario en Gallur (51 mg/L). El incremento más acelerado del tramo del Riguel se debe a que recoge el drenaje agrícola de extensos glacis, sobre los que se desarrollan suelos pedregosos muy permeables (sasos) que favorecen el lavado del nitrato aportado por fertilización a los cultivos.

El aumento progresivo del componente hídrico asociado a los flujos de drenaje agrícola frente al flujo circulante por el río en Sádaba justifica el incremento progresivo de la concentración en nitrato.

3.3 Comportamiento geoquímico del sistema Riguel-Arba

La Figura 13 presenta la CE de las aguas analizadas frente a sus índices de saturación (IS) para la calcita, dolomita, yeso y halita. Las 11 muestras del sistema Riguel-Arba están sobresaturadas en calcita y dolomita ($IS > 0$) y subsaturadas en yeso y halita ($IS < 0$). El IS respecto a la calcita y dolomita permanece prácticamente constante mientras que respecto al yeso y halita crece conforme aumenta la CE, es decir, según el sentido del flujo, confirmando el incremento de las aguas en sulfato, cloruro, calcio y sodio.

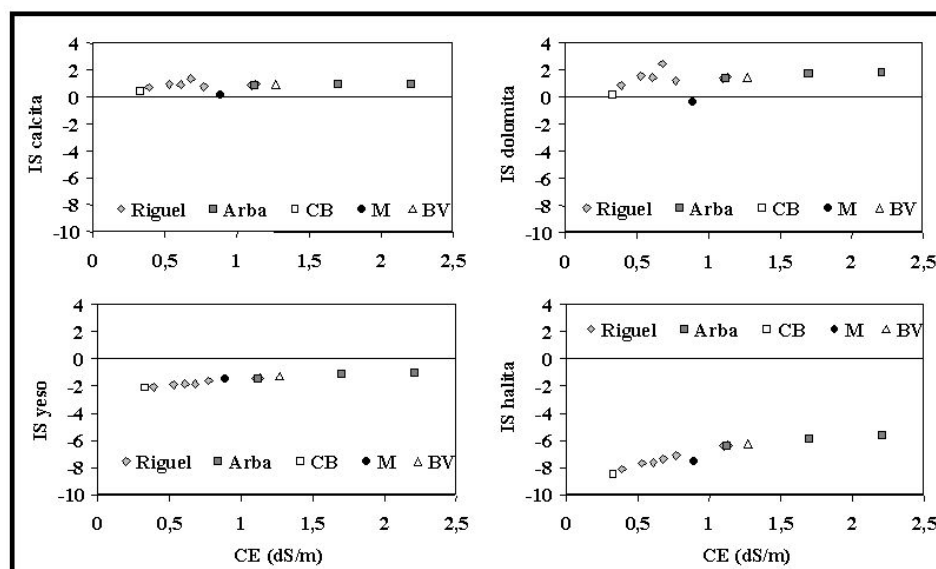


Figura 13.— Conductividad eléctrica (CE, dS/m) frente a los índices de saturación (IS) de la calcita, dolomita, yeso y halita para las muestras de agua del Riguel (8), Arba (3), Canal de Bardenas (CB), manantial de Santa Anastasia (M) y barranco Valareña (BV).

La muestra del manantial (M) se encuentra en equilibrio con calcita y dolomita, ya

que sus índices de saturación son menores que los valores de incertidumbre de la calcita ($\pm 0,3$) y dolomita ($\pm 0,5$). Además, esta muestra presenta una presión parcial de CO_2 superior al resto de las muestras y más distante de la presión parcial de la atmósfera ($\log p\text{CO}_2 = -3,5$) a la cual se aproximan las muestras de aguas superficiales (Riguel, Arba, CB, BV) (Fig. 14).

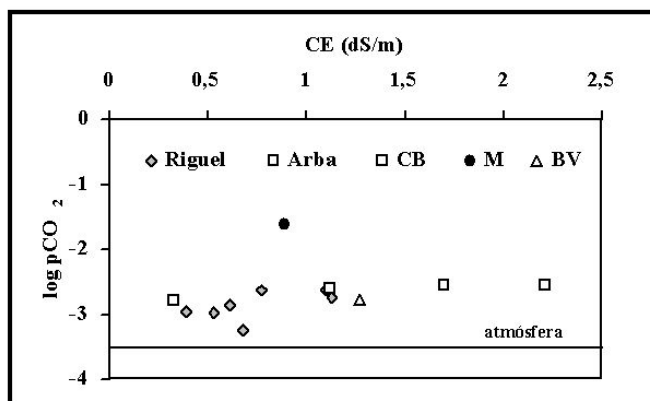


Figura 14.— Presión parcial de CO_2 ($\log p\text{CO}_2$) calculada frente a conductividad eléctrica (CE; dS/m) en las muestras de agua del Riguel, Arba, Canal de Bardenas (CB), manantial de Santa Anastasia (M) y barranco de Valareña (BV).

3.3.1 MODELIZACIÓN DE LOS FLUJOS DE DRENAJE DEL RIEGO

Para analizar los procesos que tienen lugar en los flujos de drenaje del regadío se ha estudiado el paso del agua de riego (CB) a flujos de drenaje de riego (M). La modelización realizada con NETPATH (Tabla 4) muestra que debería producirse una disolución de las fases minerales introducidas en el modelo (0,98 mmol/L de calcita, 0,40 mmol/L de dolomita, 0,53 mmol/L de yeso y 0,88 mmol/L de halita) y un incremento considerable en el contenido de CO_2 (+ 1,78 mmol/L).

Tabla 4.— Modelo obtenido con NETPATH para el paso del agua de riego (CB) a flujos de drenaje del regadío en el área de influencia del manantial muestreado (M).

| Parámetros de la modelización | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|--|------------------------|
| Solución inicial | Solución final | Elementos | Fases | |
| CB | M | C, S, Cl, Ca y Mg | calcita, dolomita, yeso, halita, CO_2 | |
| Resultados del modelo | | | | |
| calcita (mmol/L) | dolomita (mmol/L) | yeso (mmol/L) | halita (mmol/L) | CO_2 (mmol/L) |
| + 0,98 | + 0,40 | + 0,53 | + 0,88 | + 1,78 |

Teniendo en cuenta la presencia de un horizonte petrocálcico en los suelos desarrollados en los glacis (sasos, Fig. 15) y que la calcita se encuentra sobresaturada tanto en el agua de riego ($IS_{\text{calcita}} = 0,43$) como en el agua de drenaje ($IS_{\text{calcita}} = 0,13$), sorprende que el modelo interprete una disolución de este mineral. Sin embargo, esta disolución puede ser posible debido a que el paso del agua de riego a través de suelos con abundante materia orgánica genera flujos subterráneos enriquecidos en CO_2 (Tabla 4) que aumentan la solubilidad del carbonato cálcico (CaCO_3).

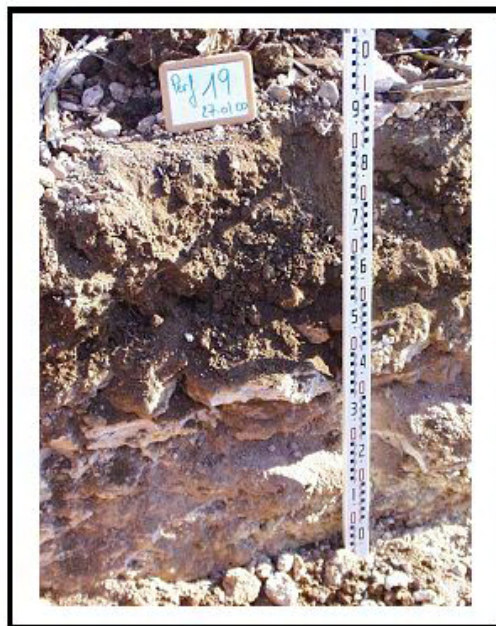


Figura 15.— Horizonte petrocálcico (mallacán) en suelos desarrollados sobre glacis (sasos).

El resultado de la simulación con PHREEQC de una solución con la composición química del agua de riego (CB) y el pH del agua del manantial ($\text{pH} = 7,1$) presenta una presión parcial de CO_2 superior a la del agua de riego y similar a la del manantial ($\log p\text{CO}_2 = -1,88$) y un índice de saturación respecto a la calcita negativo ($IS_{\text{calcita}} = -0,46$) que justifica la disolución de este mineral.

El yeso y la halita, al contrario que la calcita y la dolomita, no son minerales muy frecuentes en el área de influencia del manantial muestreado, pero su elevada solubilidad puede explicar la disolución interpretada por el modelo.

Los iones que constituyen las fases minerales analizadas no sólo proceden de la disolución de los materiales geológicos (efecto meteorización geoquímica) sino que también tienen su origen en las sales introducidas con el agua de riego (efecto evapoconcentración).

El agua de riego procedente del Canal de Bardenas (CB) sufre en el suelo una evapoconcentración producto de la evapotranspiración de las plantas, que consumen agua libre de sales. Riegos o lluvias posteriores capaces de producir drenaje, pueden lavar las sales

acumuladas en el suelo por otros riegos. Para tener en cuenta este proceso se ha impuesto al programa NETPATH que considere una evaporación del agua de riego.

Los resultados del nuevo modelo (Tabla 5) asignan un factor de evaporación (factor por el cual dividido el volumen inicial se obtiene el volumen final) al agua de riego (CB) de 1,95 y la disolución de las fases minerales introducidas en el modelo (calcita, dolomita, yeso y halita) es muy inferior (entre un 86% y un 66% según minerales) a las obtenidas en el anterior modelo. Las cantidades disueltas mantienen la misma pauta de una mayor disolución de calcita respecto a dolomita, por su mayor presencia en los materiales geológicos, y de halita respecto a yeso por su mayor solubilidad.

El factor de evaporación obtenido (1,95) está en concordancia con la eficiencia de riego a nivel de parcela (porcentaje de agua evapotranspirada por los cultivos respecto al volumen de riego aplicado) del polígono Bardenas I (en torno al 50%, Causapé, 2002), que provoca que aproximadamente la mitad del agua de riego no sea evapotranspirada por las plantas y atraviese la zona de raíces constituyendo los retornos (drenaje) del riego.

Tabla 5.— Modelo obtenido con NETPATH para el paso del agua de riego (CB) a flujos de drenaje del regadío en el área de influencia del manantial muestreado (M) considerando la evapotranspiración del agua de riego.

| Parámetros de la modelización | | | | |
|--|------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Solución inicial | Solución final | Elementos | Fases | |
| CB | M | C, S, Cl, Ca y Mg | calcita, dolomita, yeso, halita | |
| Resultados del modelo con evaporación | | | | |
| factor evaporación | calcita (mmol/L) | dolomita (mmol/L) | yeso (mmol/L) | halita (mmol/L) |
| 1,951 | + 0,14 | + 0,09 | + 0,11 | + 0,30 |

El resultado de la simulación con PHREEQC de una solución de agua de riego (CB), evapoconcentrada según el factor de evaporación encontrado por el modelo (1,951) y con un pH igual al de la muestra del manantial (pH= 7,1), presenta una presión parcial de CO₂ y un índice de saturación respecto a calcita similar a la muestra del manantial muestreado (log pCO₂= -1,59 e IS_{calcita}= 0,03).

En definitiva, la composición química del manantial muestreado en Santa Anastasia (drenante del riego) es fruto de la evapoconcentración del agua de riego según un factor de evaporación (1,95), coherente con las eficiencias de riego de la zona (en torno al 50%), y una pequeña disolución de minerales condicionada por la baja salinidad de los materiales geológicos de la mitad Norte de Bardenas I (fundamentalmente aluviales y glaciares cuaternarios desarrollados sobre el terciario continental lutítico-areniscoso).

3.3.2 EFECTO DE LOS RETORNOS DEL RIEGO EN LOS RÍOS RIGUEL Y ARBA

El riego genera unos retornos que alimentan los cursos fluviales a través de la red de drenaje. El agua del Riguel se compone de la mezcla del agua circulante al inicio del área regable (P1, Riguel en Sádaba) y diferentes proporciones de los flujos de retorno del regadío en la zona de influencia que pueden ser representados por la muestra del manantial muestreado (M).

Los modelos obtenidos para el paso del agua de P1 (Riguel en Sádaba) hasta P5 (último punto del Riguel antes de la desembocadura del barranco de Valareña) muestran cómo la contribución de los retornos del riego (M) aumenta progresivamente, pasando de contribuir en un 18% al agua circulante por el Riguel en P2 a constituir el 36% del agua circulante en P5 (Tabla 6).

Tabla 6.— Porcentaje de mezcla de las aguas del Riguel en Sádaba (punto P1, %) y el agua del manantial de Santa Anastasia (M, %), y disolución/precipitación (mmol/L) de calcita, dolomita, yeso y halita para obtener las aguas del Riguel en los puntos P2 y P5.

| Parámetros de la modelización | | | | | |
|--|----------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Sol. iniciales | Solución final | Elementos | | Fases | |
| P1 y M | P2 / P5 | C, S, Cl, Ca y Mg | | calcita, dolomita, yeso, halita | |
| Resultados del modelo con mezcla de aguas | | | | | |
| modelo | %M | calcita (mmol/L) | dolomita (mmol/L) | yeso (mmol/L) | halita (mmol/L) |
| De 1 a 2 | 18 | – 0,38 | + 0,17 | + 0,11 | + 0,24 |
| De 1 a 5 | 36 | – 0,68 | + 0,31 | + 0,39 | + 0,95 |

Los modelos desarrollados presentan una precipitación de calcita que se ha asociado a la salida a superficie de los flujos de drenaje subterráneos, con la consiguiente pérdida de CO₂ y, por tanto, sobresaturación en calcita. La cantidad de calcita precipitada y de dolomita, yeso y halita disueltas aumenta conforme el río avanza en su recorrido, adentrándose hacia las facies centrales de cuenca (más carbonatadas y evaporíticas).

El modelo obtenido para el paso del Riguel en Sádaba (P1) hasta el Arba en Tauste (P10) mantiene la pauta observada anteriormente (precipitación de calcita y disolución de dolomita, yeso y halita) aunque las masas disueltas o precipitadas son muy superiores, por la mayor distancia entre las muestras, y, especialmente para el yeso y halita, por su mayor presencia en la cuenca baja del Arba (Tabla 7). El agua del sistema Riguel-Arba se enriquece progresivamente en CO₂ por los flujos de drenaje acumulados que no llegan a equilibrarse con el CO₂ atmosférico.

Como síntesis, la Figura 16 presenta el esquema simplificado de los procesos que ocu-

Tabla 7.— Modelo obtenido con NETPATH para el paso del agua del Riguel en Sádaba (P1) al agua circulante por el Arba en Tauste (P10).

| Parámetros de la modelización | | | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|--|--------------------------|
| Solución inicial | Solución final | Elementos | Fases | |
| Sádaba (P1) | Tauste (P10) | C, S, Cl, Ca y Mg | calcita, dolomita, yeso, halita, CO ₂ | |
| Resultados del modelo | | | | |
| calcita (mmol/L) | dolomita (mmol/L) | yeso (mmol/L) | halita (mmol/L) | CO ₂ (mmol/L) |
| - 2,98 | + 1,62 | + 3,44 | + 9,54 | + 1,88 |

En el sistema Riguel-Arba donde se destaca (1) la evaporación del agua de riego (evapotranspiración de las plantas), (2) los procesos de disolución y precipitación de minerales así como las variaciones en el contenido de CO₂ y (3) la mezcla de los retornos del riego con las aguas superficiales.

El agua de riego (CB) en su paso a flujos subterráneos de drenaje (M) incrementa su contenido en CO₂ (log pCO₂ de -2,8 a -1,6) y reduce el pH (de 8,0 a 7,1) a la vez que se mineraliza (la CE pasa de 0,33 a 0,89 dS/m) y aumenta considerablemente su concentración en nitrato (de 5 a 97 mg/L). La incorporación de los retornos del riego al sistema Riguel-Arba en el área regable de Bardenas (de Sádaba a Tauste) produce un incremento de la mineralización (la CE aumenta de 0,39 a 2,21 dS/m) y concentración en nitrato (de 5 a 46 mg/L). El contenido en CO₂ aumenta (log pCO₂ de -3 a -2,5) y el pH desciende ligeramente (de 8,2 a 8,0).

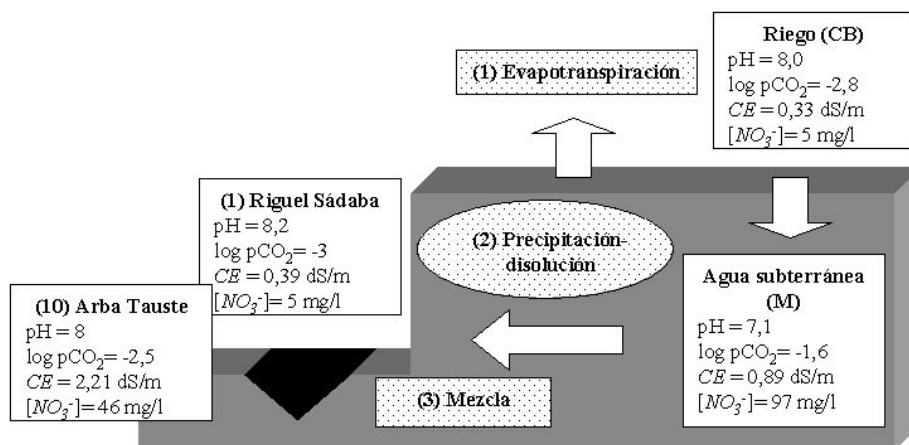


Figura 16.— Esquema simplificado de los procesos básicos del sistema Riguel-Arba.

3.4 Simulación de hipotéticos escenarios en el sistema agrario

3.4.1 ESCENARIO I. MODERNIZACIÓN DE BARDENAS I

Analizando los datos de zonas recientemente transformadas a regadíos presurizados, como Monegros II (Tedeschi y col. 2000), y los datos de la zona de estudio (Causapé, 2002), se ha estimado que la modernización de los regadíos de Bardenas I, mediante un cambio generalizado a riegos presurizados, podría aumentar la eficiencia del riego a nivel de parcela (ER) desde los valores actuales en torno al 50% hasta valores del orden del 90%. Este incremento de la eficiencia de riego implicaría una mayor evapoconcentración del agua de riego. La composición del agua de drenaje debida a este efecto se ha estimado con PHREEQC mediante la evaporación del 90% del agua del Canal de Bardenas (CB).

La solución resultante seguiría estando subsaturada respecto a minerales como el yeso ($IS_{\text{yeso}} = -0,72$) y la halita ($IS_{\text{halita}} = -6,56$) pero mucho más cercana al equilibrio que el agua del manantial muestreado (M: $IS_{\text{yeso}} = -1,5$, $IS_{\text{halita}} = -7,5$), justificando el mayor contenido en SO_4^- , Cl^- , Ca^{2+} y Na^+ como efecto de la evapoconcentración. Este efecto sería el predominante en la zona septentrional de Bardenas I ya que la posible disolución de minerales como yeso y halita ($IS < 0$) podría considerarse irrelevante por su escasa presencia en los materiales geológicos de esta zona (aluviales y glaciares cuaternarios, y terciario lutítico-areniscosos).

La mayor concentración en HCO_3^- y Ca^+ por el efecto de la evapoconcentración provocaría una mayor sobresaturación respecto a calcita ($IS_{\text{calcita}} = 2,01$), lo que induciría su precipitación y, por tanto, un mayor desarrollo de los horizontes petrocálcicos que podría afectar: 1) a la capacidad de infiltración de los suelos, generando freáticos superficiales, y 2) a la salinización del suelo. Es posible que las lluvias invernales evitaran estos problemas, mas en caso de no hacerlo, sería necesario aplicar algún riego en exceso con el fin de evacuar las sales.

Tras los procesos de evapoconcentración y disolución-precipitación, la solución del suelo debería estar en equilibrio con calcita y con el CO_2 edáfico. En la simulación de este proceso se ha impuesto al flujo resultante de la evapoconcentración un equilibrio con calcita y una presión parcial de CO_2 similar a la encontrada en la muestra del manantial ($\log p\text{CO}_2 = -1,6$). Bajo estas condiciones, el total de sólidos disueltos (TDS) del drenaje del riego duplicaría al actual (de 647 mg/L de M a 1281 mg/L) mientras que el pH se mantendría en 7,1.

Con la modernización de los regadíos de Bardenas I, la demanda de agua de riego podría decrecer hasta en un 40%. Sin embargo, se ha estimado la reducción de esta demanda sólo en un 30% (de 72 a 50 unidades, Fig. 17) ya que la modernización también conllevaría la desaparición del estrés hídrico que sufren actualmente los cultivos (Causapé, 2002) y un mayor desarrollo de los cultivos más consumistas. Bajo estas condiciones, los

retornos del riego que llegan al Riguel en P5 podrían disminuir en un 86% (M pasaría de 36 a 5 unidades, Fig. 17). Ello repercutiría en una reducción del 31% del caudal circulante por el Riguel en este punto (de 100 a 69 unidades) y en una variación considerable en la proporción de mezcla entre el agua circulante por el Riguel en Sádaba (P1) y la procedente de los flujos de drenaje del regadío, estimándose que podría pasar del 1,8:1 actual (Tabla 6) al 12,8:1 del escenario hipotético simulado (Fig. 17). A pesar de la mayor concentración de los flujos de drenaje, las nuevas proporciones de mezcla provocarían una disminución considerable en la salinidad de las aguas circulantes por el tramo bajo del Riguel (P5) (Tabla 8). La reducción en TDS estaría en torno al 30% (175 mg/L), pasando de los 574 mg/L actuales a 398 mg/L.

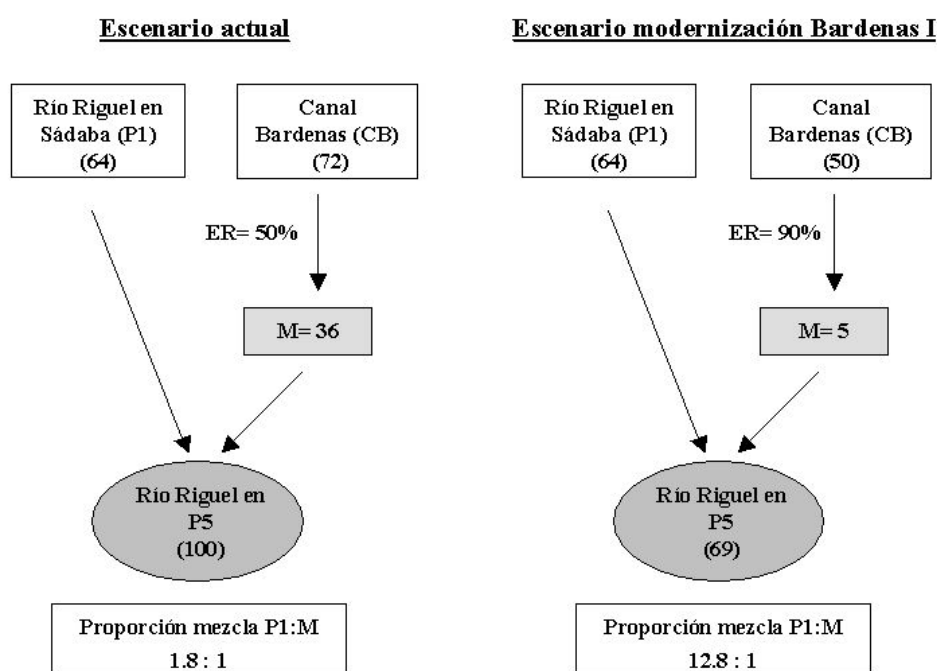


Figura 17.— Diagrama de flujos hídricos (unidades de volumen) en el sistema simulado para el escenario actual (izquierda) y para una hipotética modernización de Bardenas I (derecha).

La simulación sobrestima la presión parcial de CO₂ e infraestima el pH y el índice de saturación respecto a la calcita. Ello es debido a que no se ha considerado la pérdida de CO₂ de los flujos de drenaje subterráneos al llegar a superficie y estar en mayor contacto con la atmósfera. Una posible tendencia hacia el equilibrio con el CO₂ atmosférico disminuiría la presión parcial de CO₂ aumentando el pH y el IS_{calcita}, lo que podría inducir la precipitación de calcita y por tanto una disminución en la concentración de los iones HCO₃⁻ y Ca²⁺.

La disminución en la salinidad de las aguas del sistema Riguel-Arba por el incremento

Tabla 8.— Comparación de la situación actual del Riguel (P5) con los resultados de la simulación de un hipotético escenario de modernización de Bardenas I. Concentración en elementos mayores y sólidos disueltos considerando estos elementos (TDS); pH, log pCO₂, e índices de saturación respecto a calcita, yeso y halita (IS).

| Riguel P5 | Actual | Modernización | Riguel P5 | Actual | Modernización |
|--------------------------------------|--------|---------------|-------------------------------------|--------|---------------|
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 267,2 | 223,4 | SO ₄ ⁻ (mg/L) | 89,7 | 55,4 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 59,7 | 23,2 | Ca ²⁺ (mg/L) | 83,1 | 57,1 |
| Mg ²⁺ (mg/L) | 19,3 | 12,6 | Na ⁺ (mg/L) | 51,3 | 24,5 |
| K ⁺ (mg/L) | 3,9 | 1,9 | TDS | 574,2 | 398,2 |
| pH | 8,0 | 7,8 | log pCO ₂ | -2,63 | -2,56 |
| IS calcita | 0,76 | 0,39 | IS yeso | -1,63 | -1,91 |
| IS halita | -7,10 | -7,81 | | | |

en la eficiencia de los regadíos de Bardenas I, sería más significativa hacia el Sur de la cuenca del Arba donde la presencia de minerales evaporíticos es mayor y una reducción en el volumen del drenaje de riego implicaría una disminución importante en la disolución de estos minerales.

3.4.2 ESCENARIO II. COMPLETA TRANSFORMACIÓN EN RIEGO DE BARDENAS II

La transformación en riego presurizado de las 24.000 ha que faltan por transformar en Bardenas II generará retornos de riego que serán drenados por el Arba principalmente entre los meses de abril y septiembre. El volumen de drenaje de estos nuevos regadíos se ha estimado en 700 m³/ha/año, valor obtenido en otros sistemas agrarios en riego a presión como Monegros II (Tedeschi y col. 2000). Este volumen aplicado a las 24.000 ha por transformar en Bardenas II suponen un drenaje procedente de los nuevos regadíos de 16,8 Hm³/año.

El volumen de agua medio anual que circula por el Arba en Tauste (P10) durante la estación de riego (abril-septiembre) es de 143 Hm³ (obtenido a partir de los datos registrados por la estación de aforos de Confederación Hidrográfica del Ebro en el Arba en Tauste durante la década 1990-2000). Por tanto, el caudal circulante por el Arba en Tauste una vez transformado por completo en regadío Bardenas II, podría incrementarse durante la época de riego en torno a un 12%. Así mismo, la proporción de mezcla estimada durante la época de riego entre el actual caudal del Arba en Tauste y los hipotéticos flujos de retorno de los nuevos regadíos de Bardenas II sería de 8,5 a 1. Los flujos de drenaje de estos nuevos regadíos sufrirían los procesos de evapoconcentración y equilibrio con la calcita y el CO₂ presentes en el suelo. Además, los retornos de riego de Bardenas II

circularían por materiales geológicos con mayor presencia de minerales evaporíticos como el yeso y la halita. La disolución de éstos podría ser importante llegando a controlar la salinidad de los retornos del riego.

La estimación de la cantidad de minerales evaporíticos que el drenaje de Bardenas II pudiera disolver está sujeta a una gran incertidumbre. Otros sistemas agrarios con presencia de yeso en exceso, como La Violada (Aragón), presentan su drenaje saturado en este mineral (Quílez y col. 1985), por ello se ha impuesto en la simulación de los retornos del riego de Bardenas II una disolución de yeso hasta alcanzar el equilibrio ($IS_{\text{yeso}} = 0$). Igualmente se ha impuesto una disolución de halita hasta alcanzar un $IS_{\text{halita}} = -5$, valor ligeramente superior al que presentó el Arba en Tauste $(-5, 2)$ como corresponde a una lógica mayor concentración de los retornos del riego.

Bajo estas condiciones de simulación, el TDS obtenido para el drenaje del riego es de 4.378 mg/L (7 y 3,5 veces superior al presentado en M y en el drenaje simulado sin la disolución de yeso y halita) y el obtenido para las aguas del Arba en Tauste (P10) podría incrementarse en un 20% (300 mg/L) respecto al actual (de 1.536 a 1.838 mg/L, Tabla 9). Estas diferencias podrían aumentar atendiendo a una mayor disolución de halita (NaCl) y de otros minerales evaporíticos presentes en la zona como la thenardita, mirabilita y epsomita.

Tabla 9.— Comparación de la situación actual del Arba en Tauste (P10) con los resultados de la simulación de un hipotético escenario de completa transformación en regadío de Bardenas II. Concentración en elementos mayores y sólidos disueltos totales considerando estos elementos (TDS); pH, log pCO₂, e índices de saturación respecto a calcita, yeso y halita (IS).

| Arba Tauste | Actual | Nuevos Regadíos | Arba Tauste | Actual | Nuevos Regadíos |
|--------------------------------------|--------|-----------------|-------------------------------------|--------|-----------------|
| HCO ₃ ⁻ (mg/L) | 325,7 | 328,7 | SO ₄ ⁼ (mg/L) | 365,2 | 524,9 |
| Cl ⁻ (mg/L) | 254,0 | 406,1 | Ca ²⁺ (mg/L) | 138,4 | 193,0 |
| Mg ²⁺ (mg/L) | 49,2 | 50,4 | Na ⁺ (mg/L) | 297,0 | 327,5 |
| K ⁺ (mg/L) | 6,7 | 7,2 | TDS | 1536,2 | 1837,9 |
| pH | 8,0 | 7,7 | log pCO ₂ | -2,5 | -2,3 |
| IS calcita | 0,95 | 0,71 | IS yeso | -1,03 | -0,79 |
| IS halita | -5,61 | -5,51 | | | |

4 Conclusiones

Los materiales terciarios de la cuenca media-baja del Arba se distribuyen según una secuencia de sedimentación, en el sentido de los aportes (Norte-Sur), desde ambientes

fluviales (tramos lutíticos con paleocanales de arenita) hasta lacustres (alternancia de limos, calizas y yesos), asociándose a una secuencia mineralógica que abarca composiciones silíceas (cuarzos y feldespatos), carbonatadas (calcitas y dolomitas) y sulfatadas (yesos).

La composición química de las aguas del sistema Riguel-Arba evoluciona desde aguas bicarbonatadas cálcicas hasta cloruradas-sulfatadas-bicarbonatadas sodico-cálcicas. Se encuentran ligeramente sobresaturadas respecto a la calcita y dolomita, y subsaturadas respecto a yeso y halita. Existe una tendencia de estos dos últimos minerales hacia el equilibrio según el sentido del flujo, demostrando su progresiva disolución en consonancia con la evolución de la composición mineralógica de los materiales geológicos de la cuenca del Arba.

El regadío juega un papel esencial en la calidad del sistema formado por los ríos Riguel-Arba, ya que sus flujos de retorno aportan importantes volúmenes de agua. Estos flujos presentan un alto contenido en nitrato, disuelven sales procedentes de los materiales geológicos y evacuan las introducidas por el agua de riego, que se concentran por efecto de la evapotranspiración de los cultivos según un factor que depende de la eficiencia en el riego.

En consecuencia, la calidad del agua circulante por el sistema Riguel-Arba se deteriora considerablemente desde el paso del Riguel por Sádaba hasta la desembocadura del Arba en el Ebro, por el aumento paulatino tanto de la salinidad como del contenido en nitrato, que llegan a ser máximos en el tramo bajo ($CE_{\max} = 2,21$ dS/m en Tauste y $[NO_3^-]_{\max} = 51$ mg/L en Gallur).

Un incremento en la eficiencia de los regadíos actuales, hasta valores próximos al 90%, podría provocar una disminución en la demanda de agua de riego (30%) y en el volumen de los retornos de riego que llegan al Riguel en su tramo inferior (86%). En consecuencia, el caudal del Riguel en este punto podría disminuir un 31%. A pesar de que el TDS en los retornos de riego se duplicaría respecto al actual (de 647 a 1.281 mg/L) por efecto de una mayor evapoconcentración, la nueva proporción de mezcla haría descender el TDS en el tramo inferior del Riguel (P5) en torno a un 30%. La disminución de los retornos del riego en el Suroeste de Bardenas I sería de mayor importancia, pues disminuiría considerablemente la disolución de los minerales evaporíticos presentes en la zona y mejoraría considerablemente la calidad del tramo inferior del Arba y, por tanto, en su desembocadura en el Ebro.

La transformación completa de Bardenas II aumentaría la demanda de agua de riego en unos 168 Hm³ (35% de la actual capacidad de Yesa) y el caudal circulante por el Arba en Tauste en un 12%. El TDS en este punto podría incrementarse en un 20%; si bien, este valor está sujeto a la incertidumbre en la estimación de la cantidad de minerales evaporíticos que se pudieran disolver y que sería necesario precisar en estudios posteriores.

Cuantificar el comportamiento del sistema Riguel-Arba en cuanto al contenido de

nitrate de sus aguas es mucho más complicado, ya que intervienen numerosos factores agronómicos. La modernización puede llevar a un manejo más adecuado de la fertilización nitrogenada que disminuyese el lixiviado de nitrato (Causapé y col., 2002). La transformación de nuevos regadíos posiblemente incrementaría la cantidad de nitrato que llegase al Arba, si bien, el adecuado manejo de la fertilización unido a los bajos volúmenes de retorno del riego, podría minimizar la contaminación por nitratos del sistema Riguel-Arba.

En definitiva, el incremento en la eficiencia de riego ocasionaría una mayor evapoconcentración de los flujos de drenaje, pero también una reducción en su volumen. El resultado de la modernización de Bardenas I, al contrario que la completa transformación de Bardenas II conllevaría una reducción en el caudal circulante por el sistema Riguel-Arba, un descenso en la salinidad y contaminación por nitrato de sus aguas, y un incremento en el volumen de agua de riego conservada en Yesa.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la concesión de una beca del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CONSI+D) de la Diputación General de Aragón (DGA). Ha colaborado el Servicio de Investigación Agraria de la DGA (SIA), el Grupo de Modelización Geoquímica de la Universidad de Zaragoza (GMG), el Laboratorio para la Calidad de la Edificación de la DGA (LACE) y Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Un especial agradecimiento a Enrique Oliver y Pilar Iglesias.

Referencias

- [1] Ball J.W., Nordstrom D.K. 1991. User's manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic database and test cases for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. Open File Report USGS, 91-183.
- [2] Causapé J. 2002. Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la Comunidad de Regantes n°V de Bardenas (Zaragoza). Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad de Zaragoza. 153 pp. Disponible en: <http://www.cervantesvirtual.com> .
- [3] Causapé J., Isidoro, D., Quílez D., Aragiús R., 2002. Water and nitrogen management in the irrigation district n°V of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources. Actas del VII Congreso internacional European Society for Agronomy. Córdoba, 69-71.
- [4] Confederación Hidrográfica del Ebro. 2002. Nuevos regadíos de Aragón. Publicado en internet. Disponible en <http://www.chebro.es> .

- [5] DOCE (1998). Directiva europea relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. n°L 330 de 5/12/98. 32-54.
- [6] European Environment Agency. (EEA) 1999. Nutrients in European ecosystems, Environmental Assessment Report n°4. EEA. Copenhagen.
- [7] Fereres E., Ceña F., 1997. Social benefits and environmental constraints of irrigation in an area of water scarcity. Proceedings 18th European Regional Conference "Water, an economic good". Oxford, UK. 128-136.
- [8] Instituto Tecnológico Geominero de España 1985. Investigación de los recursos hidráulicos totales de la cuenca del Arba. ITGE. Sin editar.
- [9] Orús, F., Quílez, D., Betrán, J. 2000. El código de buenas prácticas agrarias. Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. Informaciones Técnicas n°93. Departamento de Agricultura, Gobierno de Aragón, 40 pp.
- [10] Parkhurst D.L., Appelo C.A. 1999. User's guide to PHREEQC, a computer program for speciation, reaction-path, advective-transport, and inverse geochemical calculations. Water Resources Investigation Report 99-4259. 312 pp.
- [11] Plummer L.N., Prestemon E.C., Parkhurst D.L. 1994. An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH-version 2.0. Report USGS 95-4169, USGS, USA.
- [12] Ramos C., Ocio J.A. 1993. La agricultura y la contaminación de aguas por nitrato. Hoja divulgadora n°7. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General de Estructuras Agrarias. 31 pp.
- [13] Quílez, D. 1985. Descripción, análisis y aplicación de un modelo hidrosalino del sistema "flujos de retorno del riego". Tesis de licenciatura. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias, Sección de Físicas. 242 pp.
- [14] Tedeschi A., Beltrán A., Aragiés R. 2000. Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). Agricultural Water Management 49. 31-50.