

LUCAS MALLADA, 26 (2024)

ISSN 0214-8315, ISSN-e 2445-060X

<http://revistas.ica.es/index.php/LUMALL>

ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES GEOLÓGICOS Y SUELOS SALINOS EN LA ZONA OCCIDENTAL DE LA HOYA DE HUESCA

José Antonio Cuchí Oterino¹ |
Nicolás Omiste Rodrigo² | Raquel Zufiaurre Galarza³

RESUMEN El presente artículo tiene como objetivo contribuir al conocimiento de los suelos y los materiales geológicos salinos en el sector occidental de la comarca de la Hoya de Huesca. Para ello se seleccionaron 11 zonas singulares por sus características salinas y la presencia de vegetación halófila. Se tomaron muestras de suelo superficial a diferentes profundidades (0-30, 30-60 y 60-90 centímetros, respectivamente), en función de las características del terreno, y se obtuvieron 28 muestras. En el laboratorio se realizaron el extracto de saturación y los de relación suelo : agua 1 : 2,5 y 1 : 5. En el primero se determinaron la conductividad eléctrica (CE), el pH y las concentraciones de iones (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) y se estableció la relación de adsorción de sodio (SAR). Los resultados se analizaron mediante herramientas gráficas y estadísticas, incluyendo diagramas de Piper, análisis de componentes principales, histogramas y diagramas de dispersión. Esto permitió identificar las sales predominantes en los suelos y los materiales estudiados. Se clasificaron las muestras según su CE y su SAR, y destacó la presencia de suelos salino-sódicos, sódicos y salinos. Su grado

¹ Departamento de Ciencias Agrarias y del Medio Natural. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. cuchi@unizar.es

² nicoomiste@gmail.com

³ Departamento de Química Analítica. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza. IUCA. Carretera de Cuarte, s/n. E-22071 Huesca. zufi@unizar.es

de salinidad los califica como “muy fuertemente salinos”, según la FAO. Destacan los datos de Modrán, en el término municipal de Biscarrués, que se pueden clasificar como de tipo Solonetz.

PALABRAS CLAVE Material geológico. Suelos sódicos y salinos. Caracterización iónica. Hoya de Huesca.

ABSTRACT The aim of this paper is to contribute to the knowledge of saline soils and geological materials in the western sector of the Hoya de Huesca region. To this end, 11 unique areas were selected for their saline characteristics and the presence of halophilic vegetation. Surface soil samples were taken at different depths (0-30, 30-60 and 60-90 centimeters) depending on the characteristics of the soil, obtaining 28 samples. In the laboratory, the soil saturation extract was obtained and 1 : 2.5 and 1 : 5 soil : water tests were carried out. In the former, electrical conductivity (EC), pH, and ion concentrations (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_3^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+) were determined and the sodium adsorption ratio (SAR) was determined. The results were analysed using graphical and statistical tools, including Piper diagrams, principal component analysis, histograms and scatter plots, to identify the predominant salts in the soils and materials studied. The samples were classified according to their EC and SAR, highlighting the presence of saline-sodic, sodic and saline soils. The degree of salinity of the soils is considered as ‘very strongly saline’ according to the FAO. The data from Modrán, in the municipality of Biscarrués, are notable as being of the Solonetz type.

KEYWORDS Geological material. Sodic and saline soils. Ionic characterization. Hoya de Huesca (Spain).

INTRODUCCIÓN

Con excepción de la ciudad de Huesca, la comarca de la Hoya tiene una economía fundamentalmente agroganadera, centrada en el somontano pirenaico, con dominancia de cultivos de cereal de invierno en secano y, en menor medida, leñosos. Por el contrario, en la zona norte, en la zona montañosa, ha desaparecido la tradicional agricultura de subsistencia y hoy se asiste a un impresionante proceso de *rewilding* en flora y fauna, tema que cae, obviamente, fuera de este artículo.

En la zona agrícola meridional el mantenimiento de la calidad del suelo es un elemento fundamental. Erosión, salinización y encharcamiento son los tres grandes factores antrópicos de destrucción de suelos (Lal y cols., 1989). El último se relaciona básicamente con el regadío, pero los dos primeros

pueden aparecer tanto en secano como en regadío y hacerlo de forma conjunta. Ambos factores se engloban dentro de los procesos de desertización o desertificación y se conjuntan con los efectos del cambio climático.

Este artículo se centra en la presencia de suelos con altos contenidos en sales en la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca. Hasta tiempos relativamente recientes, los suelos de la comarca han sido poco estudiados. El mapa de suelos de Zaragoza, Huesca y Lérida, de escala 1 : 250 000 (Guerra y cols., 1970), ofrece poco detalle y no señala estos suelos. Un estudio más de detalle, a escala 1 : 50 000, se realizó en la década de 1970 en el Departamento de Suelos de la Estación Experimental de Aula Dei, y se publicó un mapa 1 : 200 000 de suelos de todo Aragón (Alberto y cols., 1984). A esta escala los suelos salinos de la Hoya no tenían representación. El proyecto dio lugar a dos tesis doctorales, pero la zona quedó fuera de la zona estudiada por Cuchí (1986) y Lebrón Hernando (1988). Información sobre este tipo de suelos apareció en el no publicado, y prácticamente inaccesible, anteproyecto de canal de la Hoya de Huesca (INCISA, 1986). Herrero (1982, 2008) es el primero que cita suelos salinos en la Paúl de Anzano, al este de Esquedas. Posteriormente, se realizaron algunos trabajos de fin de carrera por parte de estudiantes de la Escuela Politécnica Superior de Huesca: Carmen García Benedé (2002) y Jorge Lordán Ferrer (2003) en la Paúl de Anzano, así como José María Giménez Banzo (2013) en Biscarrués y Piedratajada. La información sobre estos suelos se amplió en Badía Villas (coord.) (2009), donde, además de los suelos sobre terrazas del Gállego y glacis en Ayerbe y Guadasespe, hay perfiles de suelos salino-sódicos en las cercanías de Lupiñén (las Ripas), que luego fueron puestos en contexto arqueológico por Peña-Monné y cols. (2018) y Picazo y cols. (2016).

Este artículo, en gran parte trabajo de fin de grado de Nicolás Omiste (2024), ofrece una primera visión sobre la química de los suelos salinos en la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca.

MARCO DE ESTUDIO

Como se ha señalado, la zona de trabajo es la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca, al oeste de la ciudad de Huesca, más una

adición en las Cinco Villas. Geológicamente, se encuentra al pie de las Sierras Exteriores prepirenaicas, en materiales del Mioceno del Terciario continental del valle del Ebro, entre dos grandes abanicos aluviales (Nichols y Hirst, 1998) con una clara gradación textural norte-sur: al este, el de Huesca, cuyo ápice estaba en Alquézar; el del oeste, denominado de *Luna*, que salía del recién elevado Pirineo en la ubicación de la actual localidad de Biel. Entre ambos se depositaron materiales finos en La Sotonera. La zona más occidental, en torno a la Galliguera, se ubica dentro del abanico de Luna, que fue cortado lateralmente por el río Gállego. La estratigrafía, estudiada de forma extensiva por Arenas (1993), es subhorizontal en materiales finos, salvo la orla de los mallos.

Geomorfológicamente, dominan los modelados erosivos y se compone de relieves estructurales escalonados, a favor de bancos y paleocanales de areniscas. Sobre el material terciario hay recubrimientos parciales de glaciares (sasos) y rellenos finos cuaternarios en las zonas deprimidas y vales. La erosión continúa hoy en día dando característicos modelados en pináculos y *piping*, denominados *aguarales*, en la zona más occidental. Hidrológicamente, todos los puntos muestreados se encuentran en la cuenca del Gállego y de sus afluentes, en especial el Sotón. Es zona de varias capturas fluviales. Climatológicamente, hay un claro gradiente pluviométrico negativo de norte a sur: en torno a los 800 milímetros anuales hacia las sierras y 400 milímetros en Tormos. La temperatura media, alrededor de los 12 °C, aumenta hacia el sur, prefigurando el ambiente semiárido del centro del valle del Ebro aragonés. En el pasado el carrascal era la formación forestal dominante, ahora muy aclarado para cultivo de cereal de invierno. En las zonas salinas abundan *Atriplex halimus*, *Salsola vermiculata* y otros halófitos. *Tamarix* sp. es frecuente en zonas húmedas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Muestreo

Los puntos de muestreo (tabla 1) se seleccionaron a partir de un conocimiento previo del territorio por la presencia de zonas con manifiestas eflorescencias blanquecinas temporales, vegetación halófila y rodales en cereal

de invierno fallido. Estas aparecen en margas del Mioceno o sedimentos del Cuaternario. Se asume que los segundos, salvo terrazas fluviales o sasos, proceden de los primeros, con removilización de sales por aguas superficiales, subsuperficiales y subterráneas. Es evidente que los contenidos cuantitativos de sales varían en función de la pluviometría y de la evapotranspiración previas. Se supone que se mantienen los tipos de sales, aunque debiera comprobarse.

Se han muestreado tres zonas del Terciario (Monzorrobal, en Ayerbe, y Lierta y Bolea) visibles desde las carreteras de acceso. Existen dos puntos de descarga de aguas subterráneas en la orilla izquierda del Gállego, en las cercanías del puente sobre este río denominado de *Santolaria*: uno en la trinchera que sirvió para el lanzamiento del puente y otro, un rezume situado a unos 100 metros, sendero abajo, donde los animales silvestres van a lamer sal. Hay dos zonas de *badlands* en rellenos cuaternarios: una cerca de Lupiñén, conocida como los *Pedregales*, y otra, la llamada de los *Aguarales* de Valpalmas. Se han estudiado también cinco zonas cultivadas: una en la Paúl de Anzano, ya abordada por otros autores, donde se ha muestreado en profundidad y en tres puntos a tres profundidades con efectos aparentes de disminución de salinidad; otra en un campo abandonado en el Salobral, dentro de una depresión cuasiendorreica, de origen poco conocido, en Piedratajada, también ya estudiada en un trabajo de fin de carrera de la Escuela Politécnica Superior de Huesca; en las cercanías de Fontellas, en la zona de los Barrancos, una zona de cultivo abandonada y con posible afección de las antiguas minas de Monzorrobal; en Modrán (Vallipuerto), una val del término municipal de Biscarrués, en una zona de fracaso del cultivo de cebada, también estudiada en un trabajo de fin de carrera de la misma escuela, y la última al oeste de Montmesa, en un campo de cultivo junto a la pista hacia Antonié, en zona frecuentada por las grullas invernantes.

Para las muestras geológicas, obtenidas manualmente, se utilizó un martillo geológico o pala cavadora hasta los 10 centímetros de profundidad. La toma de muestras se realizó en campos de cultivo a profundidades de 0-30, 30-60 y 60-90 centímetros. La tabla I presenta información sobre los puntos de muestro.

Tabla 1. Información sobre los puntos de muestreo: siglas, tipo de muestra, localización y fecha de muestreo.

Sigla	Denominación	Coordenadas UTM Huso 30, ETRS 89			Fecha de muestreo	Tipo de muestra	Localidad
		X	Y	Z			
LI1	Lierta 1	706645	4679565	646	29/1/2024	Mioceno	Lierta
LI2	Lierta 2	706624	4679566	639	29/1/2024	Mioceno	Lierta
BO1	Bolea 1	701423	4681275	602	29/1/2024	Mioceno	Bolea
BO2	Bolea 2	701450	4681316	607	29/1/2024	Mioceno	Bolea
AN1a	Paúl de Anzano 1a	704116	4675200	500	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN1b	Paúl de Anzano 1b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN1c	Paúl de Anzano 1c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2a	Paúl de Anzano 2a	704255	4675332	502	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2b	Paúl de Anzano 2b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN2c	Paúl de Anzano 2c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3a	Paúl de Anzano 3a	704340	4675478	507	30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3b	Paúl de Anzano 3b				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AN3c	Paúl de Anzano 3c				30/1/2024	Suelo	Esquedas
AY	Ayerbe	692931	4680627	571	30/1/2024	Mioceno	Ayerbe
ST1	Santolaria 1	685516	4682341	432	30/1/2024	Mioceno	Murillo de Gállego
ST2	Santolaria 2	685154	4681957	429	30/1/2024	Mioceno	Murillo de Gállego
PTa	Piedratajada	682413	4664045	383	31/1/2024	Suelo	Piedratajada
PTb	Piedratajada				31/1/2024	Suelo	Piedratajada
PTc	Piedratajada				31/1/2024	Suelo	Piedratajada
AV	Valpalmas	680249	4668979	477	31/1/2024	Cuaternario	Valpalmas
MODa	Modrán a	686739	4673585	431	31/1/2024	Suelo	Biscarrués
MODb	Modrán b				31/1/2024	Suelo	Biscarrués
MODc	Modrán c				31/1/2024	Suelo	Biscarrués
FONa	Fontellas a	692040	4679252	538	1/2/2024	Suelo	Ayerbe
FONb	Fontellas b				1/2/2024	Suelo	Ayerbe
FONc	Fontellas c				1/2/2024	Suelo	Ayerbe
LUP	Lupiñén	698724	4669926	446	1/2/2024	Cuaternario	Lupiñén
MONT	Montmesa	691772	4678215	422	1/2/2024	Suelo	Montmesa

a, b, c, profundidades: 0-30, 30-60 y 60-90 centímetros respectivamente.

Preparación y análisis de las muestras

Las muestras se secaron al aire, se molieron manualmente mediante rodillo de madera y se tamizaron con tamiz de 2 milímetros de luz.

Los análisis se llevaron a cabo en el Laboratorio del Departamento de Química Analítica de la Escuela Politécnica Superior de Huesca. Se determinó el pH y la CE en extractos acuosos de suelo: agua desionizada, 1 : 2,5 y 1 : 5 respectivamente. Sobre el extracto de saturación (ES), realizado según Richards (1954), se determinaron pH, CE, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃⁻ y NO₃⁻. Todas las analíticas se hicieron por duplicado.

Las técnicas analíticas empleadas fueron las siguientes: pH y CE del extracto acuoso, mediante pHmetría y conductimetría respectivamente; cloruros, por el método de Möhr; carbonatos / hidrogenocarbonatos, por volumetría ácido-base; sulfatos, por espectrofotometría de absorción molecular en el visible (método turbidimétrico); nitratos, por espectroscopía de absorción molecular en el ultravioleta; Mg²⁺ y Ca²⁺, por espectroscopía de absorción atómica de llama; Na⁺ y K⁺, mediante espectroscopía de emisión atómica de llama. Sobre los resultados analíticos se calculó el SAR según el método estándar.

RESULTADOS

Los resultados de los análisis químicos de las muestras de suelos y materiales geológicos se muestran en las tablas II y III. También se incluye la clasificación de los suelos (salinidad/ sodicidad) según el SAR y la CE.

Tabla II. Resultados de los análisis químicos de las muestras: conductividad eléctrica (CE), pH y aniones. La concentración iónica (mg/L) se refiere al extracto de pasta saturada (ES).

<i>Muestras</i>	<i>CE ES (dS/m)</i>	<i>CE 1 : 5 (dS/m)</i>	<i>pH ES</i>	<i>pH (1 : 2,5)</i>	<i>Cl⁻ (mg/L)</i>	<i>HCO₃⁻ (mg/L)</i>	<i>CO₃²⁻ (mg/L)</i>	<i>SO₄²⁻ (mg/L)</i>	<i>NO₃⁻ (mg/L)</i>
LI1	10,51	2,00	8,88	8,29	1116,7	353,1	0,00	14 786,7	567,5
LI2	35,70	5,27	8,38	8,82	3119,6	372,5	0,00	131 652,7	4968,6
BO1	17,11	2,07	8,36	8,64	2197,9	256,4	0,00	29 001,9	1351,7
BO2	29,00	1,74	8,22	8,40	2747,4	604,7	0,00	17 786,5	178,2
AN1a	46,30	6,65	8,11	8,76	36 371,7	299,9	0,00	33 047,3	886,7
AN1b	36,00	5,06	7,41	8,92	20 401,5	590,2	0,00	27 322,4	279,7
AN1c	32,50	4,62	7,56	8,65	20 171,1	319,3	0,00	58 574,0	281,6
AN2a	35,70	3,54	7,50	8,64	15 527,1	527,3	0,00	62 391,0	7404,1
AN2b	35,10	2,37	8,25	8,77	7674,9	333,8	0,00	32 363,2	2573,1
AN2c	14,81	2,61	8,38	8,18	5104,8	256,4	0,00	24 576,5	2113,7
AN3a	19,19	0,36	7,71	7,69	1081,2	420,9	0,00	1467,5	194,8
AN3b	14,89	2,39	7,89	8,06	2357,4	411,2	0,00	5564,8	394,1
AN3c	9,90	1,24	7,86	7,89	5140,3	449,9	0,00	13 351,5	384,9
AY	4,07	0,57	8,31	8,71	584,9	391,8	0,00	4654,8	217,0
ST1	48,50	4,39	7,57	8,64	31 798,7	478,9	0,00	10 492,2	261,3
ST2	35,80	5,12	7,86	8,26	27 580,1	387,0	0,00	29 764,1	76,8
PTa	71,20	5,32	7,35	7,54	83 697,5	967,5	0,00	22 894,6	5273,1
PTb	39,20	4,50	7,73	7,58	38 888,7	507,9	0,00	13 504,2	711,4
PTc	36,30	3,53	7,71	7,74	35 379,1	416,0	0,00	14 497,2	556,5
AV	28,00	1,52	8,26	9,38	6611,4	643,4	0,00	14 575,3	5402,2
MODa	4,29	1,60	9,41	10,08	2268,8	875,6	166,5	602,9	763,1
MODb	4,50	0,59	9,12	9,80	2251,1	894,9	38,1	665,9	314,8
MODc	3,37	0,45	9,00	9,81	2251,1	764,3	28,6	900,4	252,0
FONa	47,50	4,29	7,94	8,78	10 209,6	583,1	14,3	17 475,1	47,2
FONb	18,20	3,49	8,85	8,25	8011,7	256,4	0,00	22 360,8	113,7
FONc	35,70	2,81	7,13	8,28	10 138,7	416,0	0,00	13 731,5	41,7
LUP	20,30	2,55	8,90	9,02	9961,5	319,3	0,00	29 842,2	517,7
MONT	27,10	1,80	7,82	7,92	17 636,4	604,7	0,00	6938,9	2194,8

Tabla III. Resultados de los análisis químicos de las muestras: cationes y relación de adsorción de sodio (SAR). La concentración iónica (mg/L) se refiere al extracto de pasta saturada (ES). Clasificación, en función de la CE, el ES y el SAR, según Richards (1954).

Muestras	Mg ²⁺ mg/L	Ca ²⁺ mg/L	Na ⁺ mg/L	K ⁺ mg/L	SAR	Clasificación
LI1	108,2	643,0	5902,3	32,0	56,7	Material geológico salino-sódico
LI2	1256,1	1153,4	42 319,4	175,5	207,5	Material geológico salino-sódico
BO1	168,9	1091,6	10 946,6	62,2	81,5	Material geológico salino-sódico
BO2	107,7	768,4	7619,8	41,6	68,3	Material geológico salino-sódico
AN1a	2171,1	966,2	25 443,1	117	104,0	Suelo salino-sódico
AN1b	1185,1	855,9	20 023,0	39,8	104,1	Suelosalino-sódico
AN1c	1670,9	1340,3	29 411,4	47,2	126,6	Suelosalino-sódico
AN2a	1609,6	1497	50 169,0	241,9	214,5	Suelosalino-sódico
AN2b	776	1202,3	26 078,6	51,4	144,2	Suelosalino-sódico
AN2c	460,9	1119,4	17 845,6	25,1	113,4	Suelosalino-sódico
AN3a	65,3	653,8	928,7	24,5	9,3	Suelosalino
AN3b	131,5	1307,2	1879,6	42,1	13,3	Suelosalino-sódico
AN3c	563,6	2116,2	9811,2	24,5	49,0	Suelosalino-sódico
AY	53,2	1735,4	2198,2	18,5	14,2	Material geológico salino-sódico
ST1	513	1522,2	50 377,4	129,6	285,2	Suelosalino-sódico
ST2	723,6	1571,3	33 675,0	80,6	176,4	Suelosalino-sódico
PTa	4155,7	10 923	55 132,3	503,8	113,9	Suelo salino-sódico
PTb	1911,3	5447,3	30 667,2	161,4	91,1	Suelo salino-sódico
PTc	1569,2	4512,7	28 957,2	127,7	94,7	Suelo salino-sódico
AV	70,2	205,3	15 288,9	86,8	235,1	Suelo salino-sódico
MODa	26,4	44	1990,8	28,8	58,6	Suelo sódico
MODb	25	9,2	2029,2	19,0	78,7	Suelo sódico
MODc	37,9	8,3	1837,4	19,5	60,1	Suelo sódico
FONa	481,4	790,3	6338,6	31,4	43,9	Suelo salino-sódico
FONb	1355,3	1250,8	14 378,4	40,2	67,1	Suelo salino-sódico
FONc	596,3	797,7	7333,6	29,2	47,9	Suelo salino-sódico
LUP	111,3	925,3	20 725,7	97,1	171,5	Material geológico salino-sódico
MONT	1364,7	1607,6	20 937,4	166,6	92,9	Suelo salino-sódico

La muestra AY se encuentra muy ligeramente por encima del límite inferior de CE, ES y SAR para ser considerado el material geológico salino o sódico.

DISCUSIÓN

Tipos de sales

El diagrama de Piper (fig. 1) de las concentraciones iónicas de los extractos de saturación indica, en el diagrama triangular, un agrupamiento de las muestras en la zona cloruro/sulfato sódico. Estos son los componentes iónicos típicos de los suelos afectados por salinidad en el valle del Ebro (Cuchí, 1986). Corresponderían a la presencia de cloruro y sulfato sódico, que a nivel mineralógico se relacionan con halita y mirabilita-thenardita. Dos

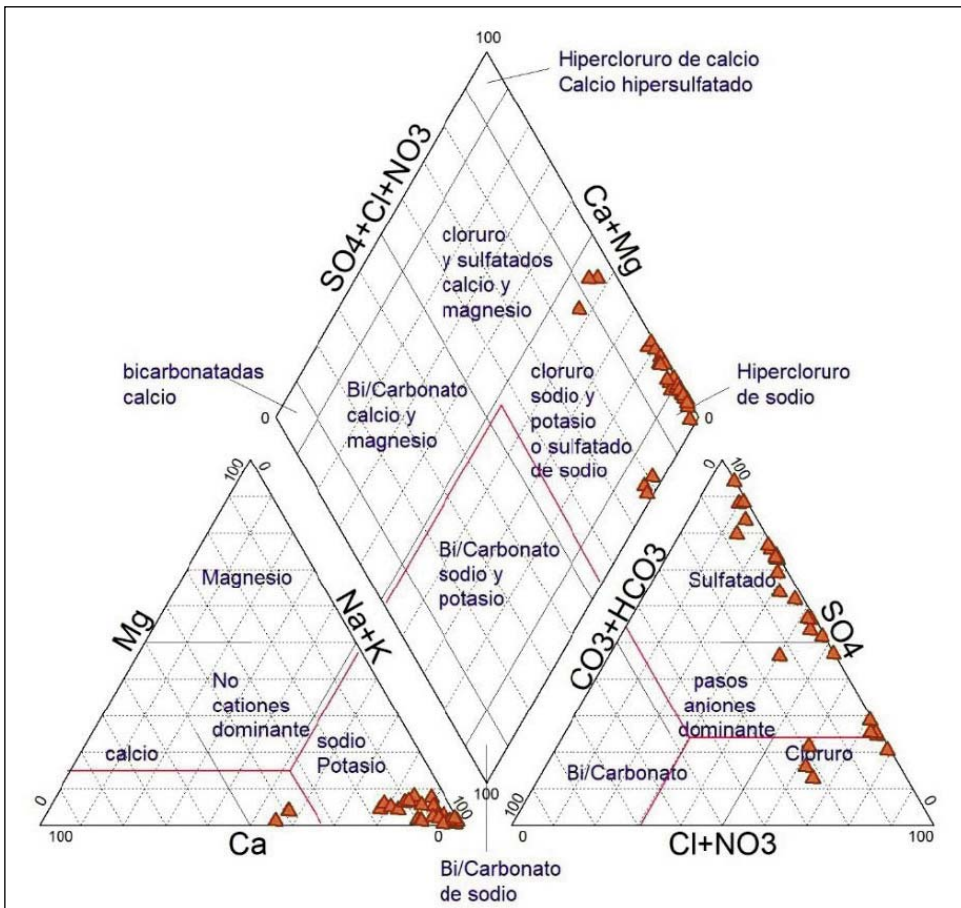


Fig. 1. Diagrama de Piper de la concentración de iones en el extracto de saturación (ES) de muestras de materiales geológicos y suelos salinos de la zona occidental de la comarca de la Hoya de Huesca.

grupos de muestras se diferencian: uno, con mayor contenido en sulfato cálcico, yeso, corresponde a las muestras de Ayerbe y la Paúl de Anzano 3, mientras que el grupo inferior, con más hidrogenocarbonato y carbonato de sodio, corresponde a las muestras de Modrán.

Algunos iones deben ser considerados de forma independiente, al poder ser de aportación antrópica en el abonado (NPK) de cultivos o tener un origen natural. La fuente natural de potasio son las ilitas, arcillas derivadas de la degradación de micas (véase, más abajo, el apartado de geología). De hecho, los niveles de potasio de origen natural en muchos suelos de la cuenca del Ebro hacen innecesario el abonado de este nutriente, aunque suele aparecer en abonados de fondo. En los datos de este artículo hay una buena relación líneal ($R: 0,781$) entre el sodio (evidentemente, de origen natural) y el potasio. La excepción, a modo de *outlier*, es la muestra (0-30 centímetros) de Piedratajada, un campo abandonado. Puede corresponder a una escorrentía del abonado de campos cercanos o puede ser natural.

El tema del nitrógeno es más complejo. Los acuíferos de la zona muestran elevados niveles de nitrato, superiores a las aguas subterráneas de origen prepirenaico (Cuchí y cols., 1997; Traba, 2015; Gracia, 2017; Zufiaurre y cols., 2017, 2020). Y también sucede lo mismo con los contenidos de este ion en los extractos de saturación de este artículo. En un apartado específico, más adelante, se profundiza en este tema.

Suelos

Por la pendiente y la erosión de muchos de los afloramientos terciarios, no hay mucha superficie de suelos directamente relacionados sobre estos materiales.

La mayor parte de las zonas con índice de salinidad elevado se encuentran en terrenos cultivados sobre sedimentos finos cuaternarios situados en lugares deprimidos. En general, los procesos de edafización son poco intensos, a lo que se une el efecto de la erosión superficial. De hecho, salvo los parámetros relacionados con la salinidad, hay poca diferencia visual en los perfiles.

Siguiendo la clasificación de Richards (1954), la mayoría de los suelos estudiados en este artículo se pueden considerar salino-sódicos, excepto los de Modrán, que son sódico-alcalinos.

La Paúl de Anzano

Situada al norte del kilómetro 12 de la A-132 y muy visible desde esta, linda con el río Benia, afluente del Sotón. Una de las cabeceras del primero es el arroyo Salado de Puibolea. Aunque hay depósitos de gravas al sur de la A-132, posiblemente un paleocauce hacia el barranco de Valdabra, los finos de la paúl parecen proceder de la pequeña sierra situada al este y que da paso a Castejón de Becha. Es una zona abandonada de antiguo, como se ve en la fotografía aérea de 1956 (fig. 5) y con un color blanco muy característico en algunas épocas del año. Herrero (1982, 2008), García Benedé (2002) y Lordán (2003) analizaron los suelos de esta zona. Recientemente, se realizó una nivelación y la apertura de un dren abierto por medio de la paúl histórica. Además de eliminar los restos de un horizonte superior poco salino, puesto en evidencia en Herrero (2008), han desencadenado un proceso de erosión preocupante que puede agravarse con rapidez (figs. 2a y 2b). En enero de 2025, la mayor parte de la paúl ha tenido una siembra directa.

Para el presente artículo se muestreó un transecto sur-norte con tres profundidades. Se intentaba un gradiente de salinidad, suponiendo que el más afectado por sales era el punto A y el menos el C. El muestreo se realizó a finales de enero de 2024, en tiempo seco tras unos meses de septiembre y octubre lluviosos. No se observaban eflorescencias. Herrero (2008) ya menciona la variabilidad temporal de CE y SAR en esta zona.

Las figuras 3 y 4 muestran los valores de CE ES y SAR. Es evidente la mayor concentración de sales en ANZ1 y ANZ2, frente a ANZ3, situada en



Figs. 2a y 2b. Erosión reciente en la Paúl de Anzano. (Fotografías del 3 de enero de 2025)

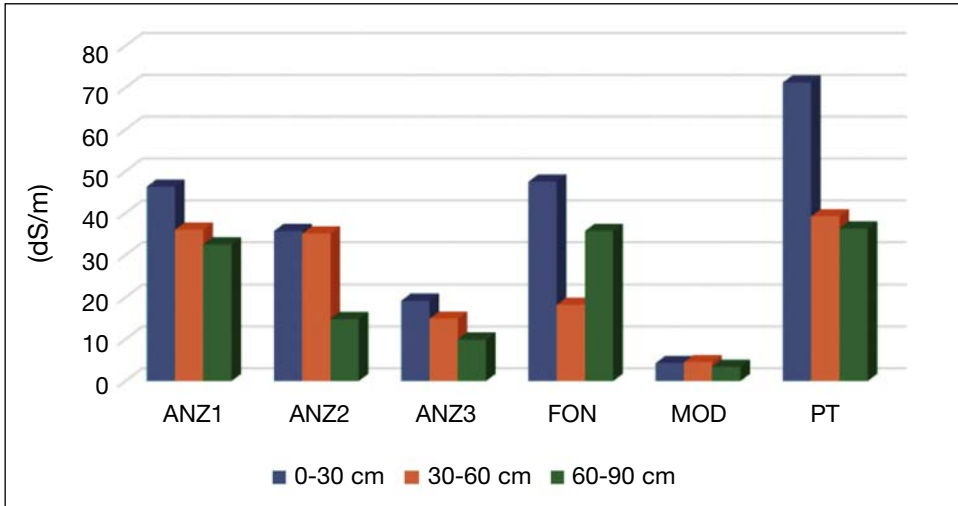


Fig. 3. Evolución en profundidad de la conductividad eléctrica del extracto saturado (CE ES) en suelos en Anzano, Fontellas, Modrán y Piedratayada.

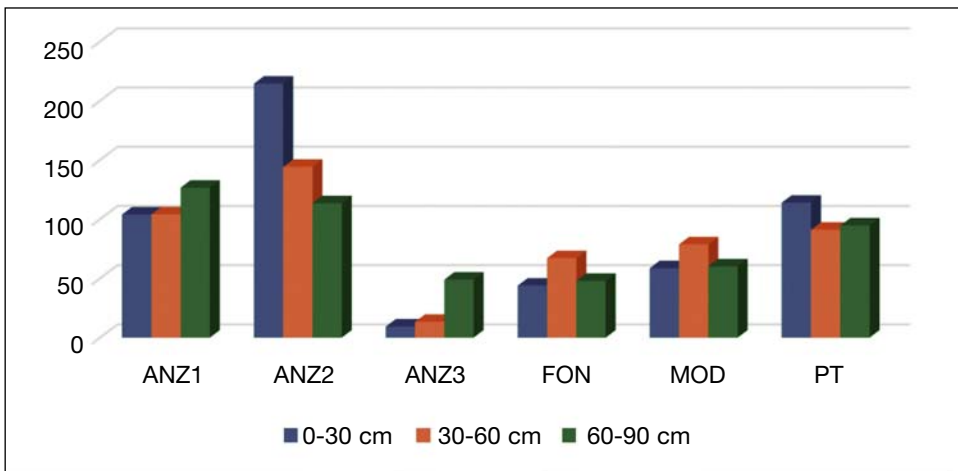


Fig. 4. Evolución en profundidad de la relación de adsorción de sodio (SAR) en suelos de Anzano, Fontellas, Modrán y Piedratayada.

las cercanías de una señal de gasoducto en campo donde ya había germinado el cereal de invierno. Los tres perfiles de Anzano presentan un ascenso de sales que se podría atribuir a una fase de desecación de la superficie y ascenso capilar. Lo que no es tan regular es su naturaleza, que se refleja



Fig. 5. Evolución del aspecto de la Paúl de Anzano entre las fotografías aéreas del vuelo americano de 1956 y del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea en 2017. (El punto rojo en la imagen derecha señala la paúl)

en la figura 1 para todos los iones y en la 4 para el SAR. Este es un tema que necesita más estudio.

Una cuestión interesante es la posible evolución de la superficie afectada. La figura 5 presenta una comparación entre las imágenes aéreas de 1956 (vuelo americano) y 2017 (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea). Se observa el efecto de la concentración parcelaria en Esquedas y la gestión en mano común por parte de la Cooperativa Agropecuaria Grupo Esquedas, S. L., con eliminación de ribazos y la apertura de nuevos drenes abiertos en la zona occidental.

Aunque las imágenes no deben de ser del mismo momento del año, parecen indicar un aumento de la mancha afectada por salinidad. En secano este efecto es suficientemente conocido en Australia. Véase, por ejemplo, Conacher (1990), donde se señala el efecto del ascenso de aguas subterráneas como consecuencia de la deforestación reciente, que aquí se presume antigua. Es evidente que en la zona hay un acuífero no estudiado, avenado en un amplio número de drenes superficiales. Tiene salinidad variable, ya que es dulce hacia el vivero de la Diputación General de Aragón, aunque allí puede estar influenciado por el sistema de riego del Riel, estudiado por Cuchí (2008). Herrero (2008) sugiere la existencia de una capa freática, sin

datos específicos de su hidroquímica, su profundidad y su evolución temporal. Sería recomendable colocar piezómetros.

Los Barrancos (Fontellas)

Situada en la confluencia de los barrancos de Vallalba y Monzorrobal, al sur de la vía del ferrocarril, en las cercanías de Fontellas, la partida de los Barrancos es conocida por la mala calidad de los suelos y las complicaciones para el paso de vehículos y maquinaria agrícola en época de lluvias por la cabañera real hacia Marcuello.

Es zona de texturas finas de suelo, calificable de atormentada, con una fuerte erosión, nivelaciones, abandono de campos y una más que probable acumulación de sedimentos, en parte derivados de las minas de cobre de Monzorrobal (Gillot y cols., 2012).

La salinidad es elevada, en especial la superficial (CE ES: 47,5 dS/m; SAR: 43,9). La figura 3 muestra un comportamiento relativamente anómalo, con la muestra intermedia menos salina que la superficial y profunda. Por el contrario, en la figura 4 se ve casi el mayor valor de SAR para este nivel intermedio. Pudiera ser resultado de una acumulación artificial de materiales.

Modrán (Biscarrués)

La val de Modrán (Vallipuerto), denominada *barranco de Billabietre* en el mapa topográfico del IGN, es un valle afluente del Gállego, en el término municipal de Biscarrués, con dirección noreste-suroeste. Está rodeado al noreste por una plataforma estructural y al sur por una alineación de colinas que lo separa de Valdespartera. En las laderas afloran bancos de areniscas y el fondo de la val tiene un relleno, de espesor no conocido, de limos, arcillas y, en menor medida, arenas. Las laderas no se han cultivado y se están reforestando de forma espontánea. El fondo, cultivado, presenta en la parte central, junto al barranco, una serie de zonas de suelos con eflorescencias blanquecinas y fallo general en el cultivo propensas a encharcamiento prolongado y atasco de maquinaria. Giménez Banzo (2013) ya realizó un perfil en este lugar y se encontró agua salina a menos de 1,5 metros

de profundidad, por encima del fondo del inmediato barranco, donde las ovejas se niegan a beber.

Los resultados del presente artículo (véanse las tablas I y II, así como las figuras 5 y 6) señalan un bajo nivel de sales. De hecho, según Richards (1954), es suelo no salino pero sí sódico, por un SAR alto. Y los pH en agua (1 : 2,5), como en el ES, son muy altos, los más elevados de este artículo. De hecho, resultan similares a los de unos suelos en regadío muy problemáticos en Callén, estudiados por Cuchí (1986), en los que la dispersión se atribuye a la interacción del agua de riego del canal del Cinca, baja en sales (CE: 0,3 dS/m), y al alto contenido en sodio en el complejo de cambio, que lleva a una dispersión del suelo. En el perfil de Modrán este efecto sería producido por las aguas de lluvia y arroyada. Cabe aquí señalar la habitual construcción de agüeras, cuya finalidad es evitar las erosiones por las arroyadas pero que, de manera indirecta, resultan similares a los drenes interceptores de escorrentía subsuperficial que se presentan en Conacher (1990). Destaquemos que un mal diseño o mantenimiento de las agüeras puede incrementar la infiltración de agua. Los parámetros señalados son coherentes con los problemas en los cultivos.

Este suelo es calificable como sódico-alcalino, según Richards (1954). Sería un tipo Solonetz, aunque en el perfil abierto en esta zona hacia 2013 no se observó la presencia de un horizonte B columnar ni se analizó la textura en busca de un enriquecimiento de arcilla.

Subyacen dos preguntas sobre estos suelos: la primera, sobre el origen del sodio, en una relativa ausencia de cloruro y sulfato; la segunda, sobre la génesis del suelo. Dada la baja concentración de cloruro y sulfato, no se puede considerar la elevada presencia de sodio como la herencia ya señalada de evaporitas cercanas. A juzgar por la existencia de areniscas en la geología inmediata y conocida por trabajos de arqueometría, sobre la existencia de plagiocasas en areniscas del entorno de la ciudad de Huesca, es posible que la hidrólisis de albita (Drever, 1968) fuera la responsable de la formación del ion Na^+ , cuyo oxhidrilo acompañante se carbonata con el CO_2 de la atmósfera del suelo. Evidentemente, esta es una mera sospecha que necesita un estudio específico detallado.

La génesis del suelo, en el fondo de las vaguadas, sugiere que hay un transporte mediante aguas subterráneas, con recarga en los altos y descarga

en las vaguadas, mecanismo descrito en abundantes textos de hidrogeología como Freeze y Cherry (1979). Una vez más, el tema desborda el presente artículo y merecería un estudio detallado.

Piedratajada

Como ya se ha señalado, la zona entre Piedratajada y Marracos es una amplia depresión de origen desconocido con un elevado grado de endorreísmo, aunque ahora desagua por el barranco del Tejar al Gállego, en las cercanías de Gurrea de Gállego. Hacia 1960 se consideró la posibilidad de construir allí un gran embalse, conectado por vasos comunicantes con el de La Sotonera (Cuchí, 2018). En el año 2000 fue objeto de un proyecto de riego por aspersión mediante elevación desde el Gállego cuyo éxito al parecer no ha sido evaluado. Destaquemos que es la misma agua utilizada por el sistema de Riegos del Alto Aragón en la zona dominada antes del abrazo de Tardienta.

En el trabajo de Giménez Banzo (2017) se abrió una calicata que encontró agua fuertemente salina hacia los 2 metros de profundidad. En las muestras del presente artículo es en esta zona donde aparece el valor más alto de CE ES, con un elevado SAR (CE ES: 71,2 dS/m y SAR: 113,9). En las figuras 3 y 4 se puede ver la evolución de ambos parámetros, que desciende en profundidad. Sería un típico caso de suelo tipo Solonchak. Uno de los temas que hay que considerar es la presencia o la ausencia de yeso en esta zona, dado que se trata de la más cercana al centro gipsífero del valle del Ebro. La realización de un análisis semicuantitativo de presencia de yeso, por desecación sucesiva a 50 y 160 °C, ha arrojado unos valores del orden del 5 % en los tres niveles de Piedratajada. El resultado entra dentro de los límites de error de esta técnica y se puede considerar que, si hay yeso, el contenido es muy bajo.

Montmesa

Se trata de la zona situada en el camino de esta localidad a Ardisa, en las cercanías de un pivote de riego. Es terreno de siembra directa y el punto de muestreo en el inicio del campo mostraba una alta compactación, por lo que solo se pudo muestrear el primer tramo, 0-30 centímetros (CE ES: 27,1 dS/m

y SAR: 92). El grado de afección es menos grave que en otras zonas, pero la fotografía aérea reciente muestra lugares cercanos con posible afección. Sería oportuno realizar calicatas y análisis.

La geología: el origen de las sales

Alejada la zona del mar y sin regadío con aguas salinas, se hace evidente que hay que buscar el origen último de las sales en la geología. En las muestras de Lierta (fig. 6) y Bolea dominan los sulfatos frente a los cloruros. Birnbaum y Coleman (1979) señalan que el azufre del yeso de la cuenca del Ebro proviene del Trías (Keuper) y es asumible pensar que el resto de la salinidad puede tener idéntico origen. Lo mismo indican los datos de salinidad y sodicidad que presenta Lebrón Hernando (1988) para varios perfiles geológicos. En los rezumes del arroyo Salado, una de las cabeceras



Fig. 6. Terrero a la entrada de la localidad de Lierta, donde se observa la diferente presencia de eflorescencias entre estratos. (Fotografía del 29 de enero de 2024)

del Benia, cerca de Puibolea, Sánchez Navarro y cols. (1989) señalan elevados valores de cloruro y sodio, seguidos de sulfato, magnesio y calcio, a los que atribuyen también relación con materiales del Keuper del cabalgamiento frontal pirenaico.

En Bolea, con la presencia de la localidad sobre el terrero, pudiera sospecharse algo de influencia antrópica, pero en Lierta, sobre la zona de eflorescencias en lo alto del cerro, solo hay antiguas fajas de cultivo con almendros, una cantera de grava y un colmenar abandonado. El tercer afloramiento geológico muestreado se encuentra en la base norte del cerro testigo de Monzorrobal, junto al antiguo camino hacia Ayerbe. Es la muestra con menos contenido salino del conjunto estudiado. La dominancia de sulfato, calcio y sodio es corroborada por la presencia de yeso en filoncillos. Con base en estas observaciones se puede concluir una gran heterogeneidad de la distribución de sales, tanto a nivel vertical entre estratos de un mismo corte como a nivel espacial. A partir de observaciones de campo, algunos estratos presentan más eflorescencias que otros. Sería interesante hacer perfiles de salinidad asociados a la estratigrafía en cortes de interés en la línea de los realizados por Lebrón Hernando (1988).

La alcalinidad

Una de las cuestiones que aparecen en este y en otros trabajos es la razón de la elevada alcalinidad de algunas muestras, tema abordado inicialmente por Lebrón Hernando (1988).

Es fácilmente observable la relación entre areniscas y eflorescencias blancas: en la base de los edificios, es clara la ascensión por efecto capilar; en el campo, en los laterales de algunos bancos de piedra, en rezumes húmedos de agua subterránea.

En general, la arenisca del somontano de Huesca se puede considerar una litoarenita calcárea, de grano sostenido, generalmente arena fina-media (< 0,5 milímetros, media cerca de 0,2 milímetros; 55-60 %, fragmentos de roca; 15-30 %, cuarzo; 5-8 %, feldespato y plagioclasas; 5-10 %, mica (biotita, moscovita); 8-12 %, como matriz de filosilicatos; 5-15 %, cemento carbonatado, y 15-20 %, porosidad). La figura 7 presenta un ejemplo de lámina delgada de una muestra de Huesca al microscopio petrográfico

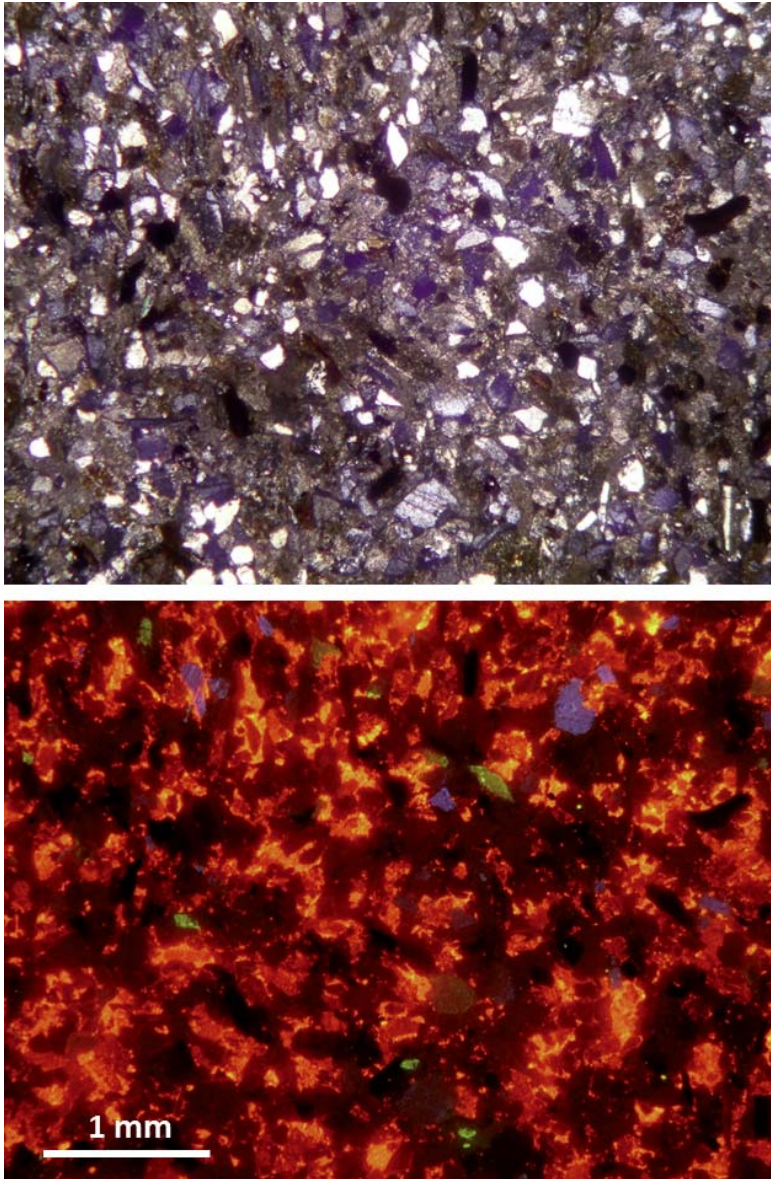
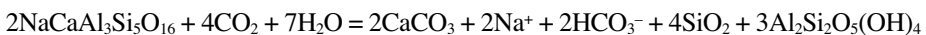


Fig. 7. Fotomicrografías petrográficas de la misma lámina de arenisca de Huesca, en nícoles cruzados (arriba) y catodoluminiscencia (abajo). Cuarzo (incoloro y no luminiscente), feldespato potásico (incoloro y luminiscente en azul), plagioclasa (incoloro y luminiscente en verde) y biotitas ferruginizadas (casi opacas y no luminiscentes). Los componentes carbonatados muestran diversos tonos, entre amarillo-naranja (calcita) y rojizo (dolomita). (Lapuente y Cuchí, 2017)

en nícoles cruzados y catodoluminiscencia. La arenisca de la cantera OLNASA en Uncastillo es similar, como muestran los datos en Lapuente y cols. (2024).

Las areniscas pertenecen *sensu lato* a la formación Sariñena del Mioceno continental del valle del Ebro. Son de procedencia pirenaica, incluso del Pirineo axial, como muestra la presencia de micas e incluso fragmentos de rocas metamórficas. Normalmente, aparecen en capas subhorizontales estratiformes que presentan abundantes paleocanales. Una de sus características es la fuerte heterogeneidad incluso a escala reducida, lo que tiene, entre otras consecuencias, la variabilidad en la calidad de los sillares obtenibles de este material.

Aunque limitada, la presencia de plagioclasas es interesante. Esta familia de minerales presenta calcio y sodio en su estructura. Su hidrólisis en presencia de anhídrido carbónico, componente normal de la atmósfera del subsuelo, es conocida como responsable de la química de aguas alcalinas. Una de las reacciones propuestas (Garrels y Mackenzie, 1967) es la siguiente:



Como subproducto de la reacción, se producen arcillas como la caolinita. Aunque las arcillas dominantes en estos somontanos son illita y clorita (Benito y cols., 1993), se detectan indicios de caolinita en Bardenas (Bastida y cols., 2010; Galán y cols., 2016) y en Monegros (Porta y cols., 1992). Una vez más, el tema queda abierto para otro estudio.

La erosión

A partir de la apertura del Ebro al Mediterráneo, en fecha controvertida, se produjo un fuerte proceso erosivo en diversas fases escalonadas. En los ríos principales este proceso dio lugar a sus terrazas, y en los somontanos, a los glacis. En los materiales más blandos se formaron vales y diversas depresiones, controladas por factores como la litología. Parcialmente rellenadas y después capturadas por la red fluvial, presentan rellenos, algunos muy modernos (Rodríguez Vidal, 1986). Algunos de estos depósitos, en especial los que presentan materiales sodificados, son muy erosionables, lo que da un relieve característico de pináculos y *piping* (Benito, 1985; Benito

y cols., 1993). Desde luego hay una clara relación entre sodicidad y desarrollo de *piping* / *aguarales*.

En el presente artículo se han muestreado dos zonas de *badlands* en estos materiales, en Lupiñén y Valpalmas.

En los Pedregales de Lupiñén, conocidos por la presencia de un yacimiento arqueológico (Picazo y cols., 2016; Peña y cols., 2018) hoy usado como vertedero de las localidades cercanas, los sedimentos provienen del alto de La Atalaya, en la sierra genéricamente conocida como las *canteras de Almodévar*. Los valores obtenidos en el presente artículo (CE ES: 20,30; SAR: 171,5) en una muestra puntual en la zona media del corte son similares a los de Badía Villas (coord.) (2009) y Peña y cols. (2018). Los valores que estos autores presentan para el nivel superior (CE ES: 0,42; SAR: 2,7) resultan adecuados para el cultivo del cereal de invierno, pero su desaparición, por erosión natural o remoción mecánica, conlleva una clara degradación del terreno. La génesis de este nivel con clastos no está relacionada con los niveles subyacentes y son de arroyada del escarpe.

Los Aguarales de Valpalmas se abren en los rellenos holocenos del barranco Barreiro. Convertido en la actualidad en un punto de cierto atractivo turístico, incluido en el *Catálogo de lugares de interés geológico* (Decreto 274/2015, del Gobierno de Aragón), es un clásico ejemplo de degradación de suelos, aunque la cercana superficie no erosionada está cultivada y crece algo la cebada, que desde los trabajos de Maas y Hoffman (1977) y Maas (1984) es considerada más tolerante que el trigo. Por ello, los datos de la muestra AV (CE ES: 28,0; SAR: 235,1) son una clara señal de peligro y, una vez más, la morfología en pináculos con *piping* responde a un material salino-sódico. Por otro lado, la superficie de esta zona de cárcavas está aumentando (Ferrer Sánchez, 2016; Carreras Gómez, 2023). Informaciones orales señalan que en Piedratajada varias zonas similares fueron terraplenadas tras la concentración parcelaria.

Es evidente, por tanto, el papel de los materiales y de los suelos geológicos salino-sódicos en la formación de *badlands* y chimeneas de hadas. Es posible su papel en movimientos masivos de terreno, especialmente en el cañón del Gállego, así como en los deslizamientos de terreno, en época de fuertes lluvias, hacia el kilómetro 5 de la A-1202 (Alastuey Morlans y Cuchí Oterino, 2016).

Aguas subterráneas

Es bien conocido el modelo de flujo de aguas subterráneas desde su recarga en zonas elevadas a la descarga en las deprimidas (véase, por ejemplo, el clásico texto de Freeze y Cherry, 1979). Con esta agua se transportan las sales que dan lugar a los suelos salino-sódicos. Estos se forman en las zonas de descarga por evaporación del agua de las soluciones salinas, que sube desde la capa freática por ascenso capilar, algo directamente relacionado con la textura del medio. En medios semiáridos y suelos de textura fina el ascenso puede superar algunos metros.

En la zona de estudio se conocen manantiales procedentes de las Sierras Exteriores y pequeños acuíferos en la base de las capas de grava de los glaciares, sobre los materiales arcillosos terciarios, que dan lugar a fuentes tradicionales. Su química se ha estudiado en Zufiaurre y cols. (2015). En general, son aguas dulces, con alto contenido en carbonato cálcico y también nitratos. En algunas zonas hay descargas importantes, como los ibones de Cinto, en la zona terminal del Saso de Ayerbe. En otros se han realizado trabajos de drenaje, especialmente visibles en la zona de Guadaspe. Además de estos acuíferos, hay otras masas de agua subterránea salada, algunas en rellenos de vaguadas que, por su naturaleza arcillosa, son de baja conductividad hidráulica. Herrero (2008) señala la presencia de agua subterránea en Anzano, aunque no parece haber análisis de la misma. En el ya citado trabajo inédito de Giménez Banzo (2013) se alcanzaron freáticos con salinidad superior al agua de mar en Contienta (Losanglis), Modrán y Piedratajada.

En el presente artículo no se han alcanzado los freáticos. Pero en el entorno del puente de Santolaria se muestrearon eflorescencias relacionadas con descargas desde el Terciario. El extracto de saturación de las eflorescencias de los rezumes del entorno del puente, frecuentados por animales silvestres, muestran muy elevados valores de CE y sobre todo de SAR (STA1, CE: 48,5 dS/m, SAR: 285,2; STA2, CE: 35,8 dS/m, SAR: 176,4).

Un tema interesante es la probable existencia de flujos de agua subterránea, incluso profundos, a través de las areniscas terciarias, tanto en sentido horizontal como vertical, que estaría asociada a los procesos de hidrólisis ya citados y otros (intercambio catiónico, etcétera). Por otro lado, es

conocida la existencia de diaclasas en este material, los *pelos* de los canteros, que permiten el flujo descendente de agua. Son abundantes los que presentan rellenos carbonatados.

Los nitratos

Uno de los temas de preocupación ambiental es el incremento de los nitratos en suelos agrícolas y aguas subterráneas producido durante la segunda mitad del siglo xx por el abonado artificial. La Unión Europea aprobó la Directiva 91/676/CEE, más conocida como *Directiva Nitratos*, con el objetivo de controlar el problema, aunque se discute su eficacia. Se han señalado diversas técnicas para solucionar el problema (Gutiérrez y cols., 2022; Musacchio y cols., 2020; Abascal y cols., 2022, y otros muchos autores).

En la zona de este artículo, es conocida de antiguo y señalada por los servicios de Agricultura la existencia de una sobrefertilización nitrogenada, reflejada en estudios internos y hojas divulgativas. Más difusión ha tenido la presencia de niveles elevados de este ion en aguas subterráneas (Cuchí y cols., 1997; Traba, 2015; Gracia, 2017; Zufiaurre y cols., 2017, 2020). La Diputación General de Aragón, por Orden DRS/882/2019, de 8 de julio, incluyó los acuíferos conocidos en la Hoya de Huesca como vulnerables a la contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes agrarias.

La pregunta clave es si todo el origen proviene del abundante abonado. En la Paúl de Anzano, zona en la que no se había cultivado desde hacía años (véase la imagen izquierda de la figura 5), Herrero (1982) señala “una gran nitrificación por pastoreo y paso de ganado ovino”, aunque no presenta resultados analíticos para el ion nitrato. Cuchí y cols. (1998) se extrañaban del alto nivel en la fuente vieja de Lierta, resultados que se han mantenido desde entonces. En este artículo los valores más elevados aparecen en algunos casos en terreros como LI2 y AV. En el primer caso, el resultado es muy diferente al de la muestra LI1, tomada a corta distancia. En la zona superior del perfil de Lierta de la figura 7 solo aparecen los restos de una gravera, un almendral y un colmenar abandonado, y se hace difícil pensar en la contaminación de un flujo cercano de

agua subterránea. Por ahora no hay explicación sobre la diferencia entre las dos muestras, que debiera ser contrastada. En cuanto a la muestra aislada de los Aguarales de Valpalmas, zona abandonada hace años, si alguna vez estuvo en cultivo el resultado no parece compatible con un abonado agrícola. Por otro lado, los altos niveles de nitrato también aparecen en uno de los muestreos en Anzano (AN2), lo que corrobora la observación de Herrero (1982). También son elevados en el primer nivel de Piedratjada. Se puede pensar en un efecto ganadero, aunque la ganadería extensiva sea ya residual. ¿O hay otro origen, quizás natural? El tema queda abierto, aunque por ahora el mayor impacto parece ser el del abonado nitrogenado (fondo y cobertera) en las zonas cultivadas.

Afecciones de sales y de sodio

Es suficientemente conocido el efecto de la salinidad y del sodio en el complejo cambio en el rendimiento de los cultivos. Existe abundante bibliografía sobre el tema, pero desborda este artículo, que se ha centrado en zonas donde los cultivos no prosperan. A modo simplemente indicativo, señalemos que la cebada, uno de los cultivos más resistentes a la salinidad y a la sequía, comienza a bajar en su rendimiento a partir de un CE ES de 8,0 dS/m, y este es nulo a partir de 28 dS/m (Maas y Hoffman, 1977; Maas, 1984).

Con la excepción de Modrán, todos los suelos muestreados, incluso Paúl de Anzano 3 y Montmesa, tienen serios problemas de salinidad en la superficie, que se traducirán en la pérdida de la cosecha. Recordemos que la cebada tiene poca profundidad radicular. El problema de Modrán es la presencia de carbonato sódico, que se traduce en una fuerte alcalinidad que impide el desarrollo de cultivos.

Soluciones a la salinidad

Como último apartado, cabe analizar sucintamente las posibles soluciones a los problemas de salinidad. Al igual que en el caso anterior, hay abundante bibliografía sobre el tema. Por ejemplo, Richards (1954), Kovda y Samoilova (1969), Kovda y cols. (1973), Qadir y cols. (2000), Smith (2005) y Vargas y cols. (2018).

De forma resumida, en la recuperación de los suelos afectados hace falta agua, drenaje y yeso. Esta zona, salvo en Piedratajada y Montmesa, es de secano. La primera fue puesta en regadío por elevación del Gállego hacia el año 2000. En Montmesa existe un cercano pivote de riego. El segundo elemento fundamental es el drenaje. En cuanto a la parcela, en la mayor parte de los suelos estudiados este es bajo, en parte debido a la textura arcillo-limosa de los mismos, complicada por el elevado SAR, que, con agua de lluvia o regadío de baja salinidad, provoca la desfloculación del suelo y su práctica impermeabilización. La débil pendiente de algunos de los campos y el aterramiento de los cauces, junto con el crecimiento de tamarices, complican aún más el drenaje. El tercer problema es la falta de yeso natural, del que únicamente se detectan indicios visuales en Monzorrobal. Solo se ha analizado su presencia en Piedratajada, con resultados prácticamente nulos. En estas condiciones, la puesta en regadío de esta zona ha provocado problemas.

CONCLUSIONES

Es evidente que en el somontano de las sierras del sector occidental de la Hoya de Huesca hay claros indicios de salinidad y sodicidad, por lo que este artículo tiene que ser considerado como un estudio parcial. Hay señales sobre su aumento, parcialmente asociado a dificultades de erosión. El problema es, por ahora, limitado, pero debería ser objeto de vigilancia. Habrían de realizarse estudios más detallados, instalar piezómetros, analizar cuidadosamente las puestas en regadío... Lamentablemente, las zonas afectadas tienen difícil solución y el abandono es la alternativa más económica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda en los laboratorios y en el invernadero de la Escuela Politécnica Superior de Huesca de Begoña Portaña, Inmaculada Palacín, Belén Aguado, Joaquín Lanuza, Jaime Arranz, José Antonio Manso y Andoni González. Santiago Fábregas y Enrique Salamero nos ayudaron con las imágenes aéreas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abascal, E., L. Gómez-Coma, I. Ortiz y A. Ortiz (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Science of the Total Environment*, 810: 152233.
- Alastuey Morlans, M. P., y J. A. Cuchí Oterino (2016). El Molinaz en la Galliguera: una aproximación a su historia. *Joaquín Costa*, 29: 7-40.
- Alberto Giménez, F., M. Gutiérrez Elorza, M. J. Ibáñez Marcellán, J. Machín Gayarre, J. L. Peña-Monné, A. Pocoví Juan y J. Rodríguez Vidal (1984). *El Cuaternario en la depresión del Ebro en la región aragonesa: cartografía y síntesis de los conocimientos existentes*. Universidad de Zaragoza / Estación Experimental de Aula Dei. Zaragoza. 217 pp. + 2 mapas.
- Arenas, C. (1993). *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- Badía Villas, D. (coord.) (2009). *Itinerarios edáficos por el Alto Aragón*. IEA. Huesca. 189 pp.
- Bastida, J., M. C. Osácar, A. Muñoz y C. Sancho (2010). Características mineralógicas de los sedimentos aluviales holocenos del Barranco Grande (Bardenas Reales de Navarra). *Geogaceta*, 48: 167-170.
- Benito, G. (1985). *Geomorfología del somontano de Ayerbe*. Tesina de licenciatura. Universidad de Zaragoza. 189 pp.
- Benito, G., M. Gutiérrez y C. Sancho (1993). The influence of physico-chemical properties on erosion processes in badland areas, Ebro basin, NE Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 37: 199-214.
- Birnbaum, S. J., y M. Coleman (1979). Source of sulphur in the Ebro Basin (northern Spain) Tertiary nonmarine evaporite deposits as evidenced by sulphur isotopes. *Chemical Geology*, 25 (1-2): 163-168.
- Carreras Gómez, S. (2023). *Evaluación de la degradación de terrenos agrícolas por procesos de erosión por piping a partir de la reconstrucción del paisaje histórico mediante técnicas de fotogrametría automatizada*. Trabajo de fin de máster. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. 44 pp. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Conacher, A. J. (1990). Salt of the Earth: secondary soil salinization in the Australian wheat belt. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 32 (6): 4-42.
- Cuchí, J. A. (1986). *Aportaciones al conocimiento de los suelos salinos en Aragón*. Ministerio de Agricultura, Pesca y A. INIA. Tesis doctorales. Madrid. 396 pp.
- Cuchí, J. A. (2008). Los sistemas de riego del río Riel (provincia de Huesca). *Joaquín Costa*, 25: 23-42.
- Cuchí, J. A. (2018). El canal Navarra-Aragón y proyectos asociados: el Plan Susín. *Lucas Mallada*, 20: 41-76.

- Cuchí, J. A., R. C. Díaz, O. Larrey y J. C. Lasasosa (1997). Niveles de ion nitrato en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca. *Kalium*, 4: 117-128.
- Drever, J. I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice Hall. Upper Saddle River (NJ). 437 pp.
- Ferrer Sánchez, V. (2016). *Análisis de la dinámica geomorfológica en una zona acarca-vada mediante la aplicación de nuevas tecnologías con un enfoque multiescala: los Badlands de los Aguarales de Valpalmas*. Trabajo fin de máster. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza. 52 pp. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Freeze, R.A., y J. A. Cherry (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs (NJ). <<https://fc79.gw-project.org/espanol/>>
- Galán, C., J. M. Rivas, M. Nieto y J. Fortsner (2016). *Notas sobre procesos de tubificación, cuevas y geoformas en la Bardena Blanca*. Publicaciones del Departamento de Espeleología. SC Aranzadi. Web aranzadi-sciences. org. Archivo PDF.
- García Benedé, C. (2002). *Estudio de los suelos salinos de la Paúl de Anzano, en Esquedas (Huesca)*. 3 vols. Trabajo fin de curso. ITA. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Garrels, R. M., y F. T. Mackenzie (1967). Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. En W. Stumm (ed.), *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems*: 222-242. Advances in Chemistry Series 67. American Chemical Society. Washington DC.
- Gillot, T., D. B. Badía, J. A. Manso y J. A. Cuchí (2012). Nota sobre mineralizaciones en Monzorrobal (Ayerbe, Huesca). *Lucas Mallada*, 14: 193-200.
- Giménez Banzo, J. M. (2013). *Estudio edafológico y de gestión de suelos salinos en el entorno de la Galliguera*. Proyecto fin de carrera de ingeniero agrónomo. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Gracia, Ó. (2017). *Evolución del contenido en nitratos en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca (marzo 2016 – febrero 2017)*. Proyecto fin de carrera de ingeniero técnico industrial. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Guerra, A., F. Monturiol, T. Badorrey, J. Gallardo, J. J. Carlevaris, J. L. de la Horra y J. L. Labrandero (1970). *Mapas de suelos de las provincias de Zaragoza, Huesca y Logroño. Mapas 1 : 250 000 y Memoria explicativa*. Instituto Nacional de Edafología José María Alvareda. Madrid. 3 mapas.
- Gutiérrez, M., M. T. Alarcón-Herrera y E. Y. Calleros-Rincón (2022). Nitrate in agricultural soils. En *Nitrate Handbook*: 25-43. CRC Press. Boca Ratón. Londres / Nueva York.
- Herrero, J. (1982). *Salinidad del suelo en salobres de Monegros y somontano oscense como condicionante de la vegetación*. IFC. Zaragoza. 50 pp.
- Herrero, J. (2008). *Salinidad edáfica en varios salobres de Aragón*. Real Sociedad Española de Historia Natural (Memorias de la Real Sociedad Española de Historia Natural, IV). Madrid. 2.ª época. 164 pp.
- INCISA (1986). *Memoria del Anteproyecto del canal de la Hoya de Huesca y su viabilidad técnico-económica*. 7 tomos.

- Kovda, V. A., y E. M. Samoilova (1969). Some problems of soda salinity. *Agrokémia és talajtan*, 18 (supl.): 21-36.
- Kovda, V. A., G. V. D. Berg y R. M. Hagan (1973). *Irrigation, Drainage and Salinity. An International Source Book*. Hutchinson FAO / UNESCO. Londres. 510 pp.
- Lal, R., G. F. Hall y P. Miller (1989). Soil degradation: I. Basic processes. *Land Degradation & Rehabilitation*, 1: 51-69.
- Lapiente, M. P., y J. A. Cuchí (2017). Estudio arqueométrico de un capitel romano de Osca. *Bolskan*, 26: 133-138.
- Lapiente, M. P., J. A. Cuchí y L. F. Auqué (2024). Compatibility assessment in the replacement of damaged sandstone used in the Cathedral of Huesca (Spain). *Heritage*, 7: 896-912 <<https://doi.org/10.3390/>>.
- Lebrón Hernando, I. (1988). *Suelos salino-sódico-alcálinos de la depresión media del Ebro: condiciones de formación, características y propiedades*. Tesis doctoral. Estación Experimental de Aula Dei / Universidad de Zaragoza. 483 pp.
- Lordán Ferrer, J. (2003). *Química de los suelos de la Paúl de Anzano en Esquedas (Huesca)*. 4 volúmenes. Trabajo fin de carrera de ingeniero técnico industrial. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Maas, E. V. (1984). Salt tolerance of plants. En B. R. Christie (ed.), *The Handbook of Plant Science in Agriculture*. CRC Press. Boca Ratón (Florida).
- Maas, E. V., y G. J. Hoffman (1977). Crop salt tolerance –Current assessment. *J. Irrigation and Drainage Division, ASCE* 103 (IRZ): 115-134. Proceeding Paper 12993.
- Musacchio, A., V. Re, J. Mas-Pla y E. Sacchi (2020). EU Nitrates Directive, from theory to practice: Environmental effectiveness and influence of regional governance on its performance. *Ambio*, 49: 504-516.
- Nichols, G. J., y J. P. P. Hirst (1998). Alluvial fans and fluvial distributary systems, Oligo-Miocene, Northern Spain: Contrasting processes and products. *Journal of Sedimentary Research*, 68: 879-889.
- Omiste Rodrigo, N. (2024). *Caracterización iónica de suelos y materiales geológicos salinos de la Hoya de Huesca occidental*. Trabajo de fin de grado en Ciencias Ambientales. Universidad de Zaragoza. Accesible a través de <zaguan.unizar.es/>.
- Peña-Monné, J. L., M. M. Sampietro-Vattuone, J. V. Picazo, L. A. Longares, F. Pérez Lambán y D. Badía (2018). Application of geoarchaeological evolutionary models for the interpretation of complex archaeological structures in the central Ebro Basin (Spain). *Quaternary International*, 483: 70-82.
- Pérez-Martín, M. Á., M. Arora y T. E. Monreal (2024). Defining the maximum nitrogen surplus in water management plans to recover nitrate polluted aquifers in Spain. *Journal of Environmental Management*, 356: 120770.
- Picazo, J. V., F. Pérez Lambán, J. L. Peña Monné, M. M. Sampietro, L. A. Longares, J. Justes y J. M. Ortega (2016). Los Pedregales (Lupiñén – Ortilla, Huesca): contribución al conocimiento del poblamiento altomedieval en la Hoya de Huesca. *Archivo Español de Arqueología*, 89: 225-248.

- Porta, J., R. Rodríguez Ochoa, M. T. García-González y C. Vizcayno (1992). Material originario laminado de suelos afectados por sales en el valle del Ebro: implicaciones tecnológicas y de uso. *Actas III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*: 305-310. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo. Madrid.
- Qadir, M., A. Ghafoor y G. Murtaza (2000). Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development*, 11 (6): 501-521.
- Richards, L. A. (ed.) (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U. S. Government Printing Office, n.º 60. Washington.
- Rodríguez Vidal, J. (1986). *Geomorfología de las sierras exteriores oscenses y su piedemonte*. IEA. Huesca. 172 pp.
- Sánchez Navarro, J. A., F. J. Martínez Gil, J. San Román Saldaña y C. Castañeda del Álamo (1989). El arroyo Salado de Puibolea: físico-química de sus aguas y posibilidades de utilización. *Lucas Mallada*, 1: 151-166.
- Smith, M. S. (2005). A glimpse at the geochemistry of alkaline salt-affected soils. En I. C. Roach (ed.), *Regolith. Ten Years of CRC LEME*: 289-293. CRC LEME. Bentley.
- Traba, L. (2015). *Caracterización hidroquímica del acuífero de Huesca*. Trabajo fin de grado de Ciencias Ambientales. Escuela Politécnica Superior de Huesca. Universidad de Zaragoza.
- Vargas, R., E. I. Pankovoy, S. A. Balyuk, P. V. Krasilnikov y G. M. Hasanhanova (2018). *Handbook for Saline Soil Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / M. V. Lomonósov Moscow State University. 128 pp.
- Zufiaurre, R., L. Traba y J. A. Cuchí (2015). Caracterización hidroquímica de aguas de la Hoya de Huesca. *Lucas Mallada*, 17: 17-44.
- Zufiaurre, R., Ó. Gracia y J. A. Cuchí (2017). Evolución del contenido en nitratos en aguas subterráneas de la Hoya de Huesca (marzo de 2016 – febrero de 2017). *Lucas Mallada*, 19: 185-207.
- Zufiaurre, R., P. Martín-Ramos y J. A. Cuchí (2020). Nitrates in groundwater of small shallow aquifers in the western side of Hoya de Huesca (NE Spain). *Agronomy*, 10 (1): 22 <<https://doi.org/10.3390/agronomy10010022>>.