Geografía: Cambios, Retos y Adaptación
AGE y Universidad de La Rioja
pp. 291-300 (2023)

XXVIII Congreso de la Asociación Española de Geografía
ISBN 978-84-09-53925-3
DOI: 10.21138/CG/2023.lc

COMPORTAMIENTO DE LA INFILTRACIÓN DEL SUELO EN DIFERENTES CUBIERTAS VEGETALES Y USOS DEL SUELO EN LA MEDIA MONTAÑA MEDITERRÁNEA

JOSÉ ARNÁEZ (id)[1]
PURIFICACIÓN RUIZ-FLAÑO (id)[1]
NOEMÍ LANA-RENAULT (id)[1]
ESTELA NADAL-ROMERO (id)[2]
TEODORO LASANTA (id)[2]
MELANI CORTIJOS-LÓPEZ (id)[2]

[1]*Área de Geografía Física (DCH). Universidad de La Rioja, 26004, Logroño.*
[2]*Instituto Pirenaico de Ecología (IPE, CSIC), Campus de Aula Dei, Avda. Montañana, 1005, 50059, Zaragoza*

Autor de correspondencia: jose.arnaez@unirioja.es

Resumen. La media montaña mediterránea ha experimentado profundas transformaciones desde mediados del siglo XX. Los procesos de despoblación y abandono de prácticas agrosilvopastorales tradicionales han provocado cambios en la cubierta vegetal y en los usos del suelo, con modificación de paisajes y activación de nuevos procesos hidro-geomorfológicos en laderas y cuencas. Con este trabajo se pretende disponer de una primera información acerca del comportamiento hídrico del suelo en diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo de la media montaña mediterránea. Los experimentos se llevaron a cabo en el valle del Leza (Sistema Ibérico riojano). La metodología utilizada se basó en ensayos de infiltración a partir del uso de infiltrómetros de minidisco y sensores de humedad TDR. También se recogieron muestras de suelo que fueron analizadas en el laboratorio. Los valores medios recogidos para la infiltración acumulada fueron 9,9 cm h^{-1} (±7,3) y 11,1 mm h^{-1} (±11,5) para la conductividad hidráulica. Los resultados obtenidos permiten comparar el comportamiento de éstas y otras variables edáficas entre las diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo. Las laderas cubiertas con bosques naturales y matorral son las que presentan una mayor infiltración acumulada y conductividad hidráulica mientras que las repoblaciones forestales son las que ofrecen los datos más bajos. Los desbroces se comportan de diferente manera dependiendo de la antigüedad de los mismos.

Palabras clave: hidrología del suelo, conductividad hidráulica, repoblaciones, desbroces, Sistema Ibérico.

SOIL INFILTRATION IN DIFFERENT VEGETATION COVERS AND LAND USES IN THE MEDITERRANEAN MID-MOUNTAIN

Abstract. The Mediterranean mid-mountain has undergone profound transformations since the mid-20th century. The depopulation and abandonment of traditional agricultural practices have caused changes in vegetation cover and land uses, with landscapes modification and new hydro-geomorphological dynamics on slopes and catchments. This work aims to have an initial information about the functioning of infiltration and hydraulic conductivity in different vegetation covers and land uses of the Mediterranean mid-mountain. The experiments were carried out in the Leza Valley (Iberian System, La Rioja, Spain). The methodology used included mini-disc infiltrometers and a TDR sensor for soil moisture. Soil samples were also collected and analyzed in the laboratory by standard procedures. The mean values collected for cumulative infiltration were 9.9 cm h^{-1} (±7.3) and 11.1 mm h^{-1} (±11.5) for hydraulic conductivity. The results obtained allow us to compare the functioning of these and other edaphic variables between the different vegetation covers and land uses. The hillslopes covered with natural forests and scrub show a higher cumulative infiltration and hydraulic

conductivity while reforestation present the lowest data. The scrub clearings behave differently depending on their age.

Keywords: soil hydrology, hydraulic conductivity, reforestation, scrub clearing, Iberian System.

1. INTRODUCCIÓN

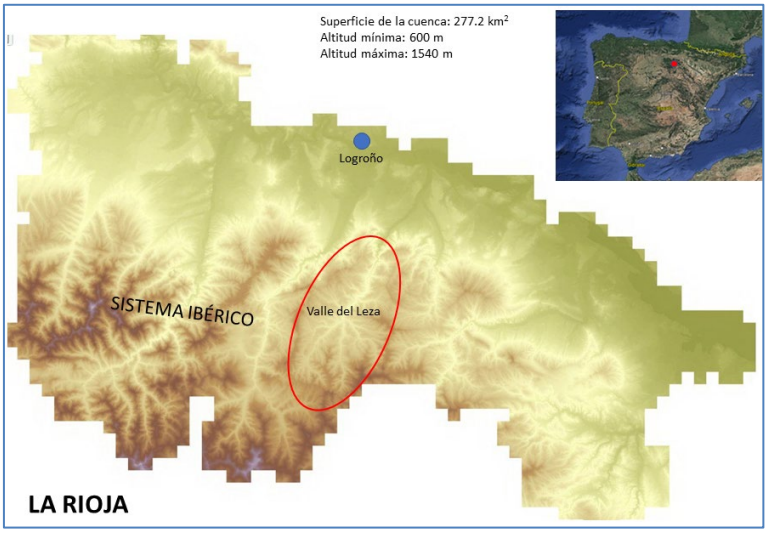
La media montaña mediterránea ha experimentado importantes cambios en la cubierta vegetal y usos del suelo como consecuencia, principalmente, de la despoblación y abandono del territorio (Collantes, 2004). Las laderas han dejado de cultivarse por medio de bancales o campos en pendiente siendo cubiertas primero por matorrales y después por un bosque incipiente (Lasanta *et al.,* 2007). La reducción de la cabaña ganadera ha empobrecido las áreas con pastos que también han sido ocupadas principalmente por matorrales. Las masas forestales, además, se han visto incrementadas como resultado de políticas activas de repoblación forestal (Ortigosa Izquierdo, 1991; Lasanta *et al.,* 2019). En definitiva, se observan en la media montaña mediterránea cambios paisajísticos muy significativos que han supuesto modificaciones en determinados procesos geomorfológicos, hidrológicos y edafológicos. El incremento de las tasas de erosión hídrica, la aparición de pequeños movimientos en masa en bancales abandonados, las modificaciones de las tasas de infiltración de los suelos, las alteraciones en la conectividad de barrancos y arroyos o nuevos comportamientos en los regímenes fluviales son algunos de los procesos que pueden observarse como consecuencia de los cambios experimentados en la media montaña mediterránea (Arnáez *et al,* 2011; Arnáez *et al.,* 2015; Lana-Renault *et al,* 2018; Moreno de las Heras *et al.,* 2019). Disponer de información sobre estos procesos, sin duda, ayudará a conocer la disponibilidad de los servicios ambientales que pueden ofrecernos estos espacios en un contexto de Cambio Global en el que también se enmarcan las transformaciones de la cubierta vegetal y usos del suelo. En esta tarea varios grupos de investigación, distribuidos por diferentes comunidades autónomas y vinculados a distintas universidades y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas, llevan trabajando y aportando información durante las últimas décadas. Los objetivos de este trabajo son conocer el comportamiento de la infiltración en diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo de la media montaña mediterránea (matorral, pasto, desbroces, bosque natural, dehesas y repoblaciones forestales), analizar los factores que condicionan este comportamiento y establecer cómo el agua en el suelo se ve afectada por el manejo humano del territorio. Dado el amplio número de cubiertas vegetales y usos de suelo seleccionados, se ha utilizado una sencilla metodología que ha permitido la movilidad y el ahorro de tiempo en la obtención de datos.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la cuenca del alto valle del Leza, en el Sistema Ibérico noroccidental (La Rioja). La altitud máxima se alcanza a los 1760 m s.n.m. y la mínima a 600 m s.n.m. (Figura 1). Desde un punto de vista litológico, los materiales corresponden a una sedimentación continental de origen fluvial o lacustre en una cuenca subsidente de la facies Weald. Predominan los conglomerados, las cuarzoarenitas y las calizas. Salvo excepciones (frentes de cuesta o afloramientos calizos), las formas generales del relieve son pesadas y alomadas. Se diría que estas sierras son simples divisorias redondeadas puestas en resalte por el encajamiento de la red fluvial.

En el área de estudio el mes más frío es enero. A lo largo de seis meses (de noviembre a abril) las temperaturas medias no superan los 10ºC y las mínimas diarias pueden fácilmente situarse por debajo de los 0ºC. Así pues, en la cuenca los inviernos son fríos y prolongados. El mes más cálido es agosto con temperaturas medias que no superan los 20ºC. En la cabecera del Leza, las precipitaciones totales anuales son ligeramente inferiores a los 1000 mm y se sitúan en torno a los 600 mm en la entrada del valle. El régimen de las lluvias es claramente equinoccial. Los meses primaverales son los que registran una mayor pluviometría (32-33% del total anual). El invierno y el verano son las estaciones más secas.

Figura 1. Área de estudio



En el valle del Leza domina principalmente el piso de vegetación supramediterráneo, ámbito propio de los bosques caducifolios. Toda el área de estudio, con una orografía suave y, en general, poco accidentada y con un clima relativamente benigno de montaña mediterránea, ha resultado ser un espacio relativamente favorable para los asentamientos de población a lo largo de la historia. El valle del Leza ha estado sujeto a una intensa presión humana. En 1956 la superficie cultivada superaba las 10.000 ha (casi el 43% de la cuenca). La evolución demográfica, en líneas generales, ha seguido el mismo proceso de despoblamiento con el consiguiente abandono del espacio agrario observado en la mayor parte de las áreas montañosas peninsulares. En la actualidad apenas se cultivan 25 ha.

3. MÉTODOS

La metodología se ha basado en el uso de un instrumental sencillo, de fácil manejo, transportable y que aporta información de precisión sobre las condiciones de humedad del suelo y las tasas de infiltración. En concreto, se han utilizado:

a) Un infiltrómetro mini-disco comercializado por Meter Group©. Con este instrumento se ha calculado la infiltración acumulada (cantidad de agua que se introduce en el suelo a lo largo de un determinado periodo de tiempo) y la conductividad hidráulica no saturada (velocidad a la que el agua puede moverse a través del suelo en determinadas condiciones y gradientes hidráulicos). Para el cálculo de la conductividad se ha utilizado el método propuesto por Zhang (1997) que requiere medir la infiltración acumulada en función del tiempo y ajustar los resultados con la fórmula:

$$Kns = C_1/A$$

donde C_1 es la pendiente de la curva de la infiltración acumulada versus la raíz cuadrada del tiempo de experimentación y A es un valor obtenido a partir de los parámetros de Van Genuchten para una textura determinada del suelo.
Una descripción del procedimiento, así como de las características del instrumental, puede encontrarse en Ruiz Sinoga *et al.* (2003) y en el manual del propio instrumento. La tasa de succión utilizada en los experimentos ha sido de 1 cm adecuada para el tipo de suelos que predominan en el área de estudio (suelos compactos). La duración de cada una de las pruebas ha sido de 10 minutos.

b) Un sensor portátil ThetaProbe Soil Moisture Sensor-Type ML2x (Delta-T Devices)© para obtener datos del contenido de agua en los primeros centímetros de suelo. Cuenta con una unidad portátil de lectura y un sensor configurado por varillas de 60 mm de longitud que se introducen en el suelo y calculan el contenido de humedad. Este instrumento, de fácil manejo, calcula el volumen de agua ($m^3\ m^{-3}$ o % vol) y ofrece una precisión de ±0,01 $m^3\ m^{-3}$.

c) Adicionalmente se han realizado una recogida y análisis de suelos en laboratorio según procedimientos estándares. En concreto, para este estudio se consideró la textura (porcentaje de arenas, limos y arcillas), la densidad aparente, el porcentaje de materia orgánica, el carbono orgánico del suelo (SOC) y el pH. Las propiedades del suelo fueron determinadas en el laboratorio del Instituto Pirenaico de Ecología (IPE-CSIC).

Figura 2. Cubiertas vegetales y usos del suelo incluidos en el estudio

Las pruebas se han realizado en 9 tipos de vegetación y usos del suelo (Figura 2):

- Laderas cubiertas por un matorral más o menos denso compuesto por formaciones prácticamente monoespecíficas de jara *(Cistus laurifolius),* en suelos silíceos, y aliagas *(Genista scorpius)*, acompañadas de enebros *(Juniperus communis),* majuelo *(Crataegus monogyna)*, boj *(Buxus sempervirens),* tomillo *(Thymus vulgaris)* y lavanda *(Lavandula latifolia),* en suelos más básicos.
- Laderas cubiertas por prado natural sometidas a un pastoreo equilibrado, localizadas en áreas más húmedas y de menor pendiente. En estos prados se localizan comunidades de *Lolio perennis-Plantaginetum majoris* y *Cynosurion cristati* (Lasanta *et al.,* 2013).
- Laderas desbrozadas. El Gobierno de La Rioja, desde 1986, subvenciona la práctica del desbroce de matorrales en la sierra riojana con el fin de favorecer la regeneración de pastos y mejorar el control del riesgo de incendios (Lasanta *et al.,* 2013). En el área de estudio se han desbrozado entre los años 1986-2021, 6537 ha (35,9% de la superficie de matorral). Para este estudio se han analizado desbroces de diferente edad: 5, 15 y 25 años.
- Bosque natural. Debido a la fuerte presión antrópica, en el área de estudio los bosques han quedado confinados a los lugares más inaccesibles donde se mantienen pequeñas manchas forestales de encinas *(Quercus rotundifolia sp. ballota),* robles *(Quercus pyrenaica)* o hayas *(Fagus sylvatica)* en las laderas más húmedas y elevadas. Las pruebas de nuestro estudio fueron realizadas en bosques de roble.
- Dehesa gestionada. Se trata de pequeñas superficies en las que todavía se introduce el ganado, por lo que son sometidas a desbroce y limpieza. Las dehesas gestionadas incluidas en el estudio están ocupadas por un arbolado disperso de *Quercus pyrenaica.*
- Dehesa no gestionada. Al contrario que las anteriores, ya no son cuidadas por parte de los ganaderos, de modo que en su interior ya empieza a desarrollarse una importante cubierta vegetal de matorral.

- Finalmente, se han seleccionado repoblaciones forestales de coníferas *(Pinus sylvestris),* localizadas en las líneas de cumbres del valle, entre 1200 y 1400 metros de altitud.

En total -para todos los usos del suelo- se dispuso de 27 puntos de muestreo sobre los que se realizaron 108 pruebas de infiltración (4 pruebas en cada punto). Antes de proceder a la prueba, se cortó, sin alterar las condiciones de suelo, la cubierta vegetal con un cuchillo. En cada uno de los 27 puntos se recogieron 3 muestras de suelo entre 0 y 10 cm de profundidad, disponiendo, por lo tanto, de 81 análisis de suelos. El muestreo se realizó entre los meses de marzo y abril de 2021. Durante este periodo la temperatura media del área de estudio fue de 9,4ºC y el total de precipitación recibida alcanzó los 57,3 mm. Para el análisis estadístico de los datos se utilizaron las últimas versiones de los programas SPSS© y Microsoft Excel©. Para establecer relaciones y diferencias entre las variables se calcularon ANOVAS de un factor, coeficientes de correlación y ajustes de regresión. Los niveles de significación fueron establecidos en <0,01 y <0,05.

4. RESULTADOS

En la Tabla 1 se incluyen los valores medios de las propiedades de los suelos, el contenido de humedad, la conductividad hidráulica y la infiltración acumulada de todas las pruebas realizadas en el área de estudio. En general, dominan los suelos franco-limosos, con un pH neutro (6,6), una densidad aparente (DA) de 1,18 g cm^{-3}, un porcentaje de materia orgánica (MO) del 7,4%, justificable, en parte, por el papel del ganado, y una cantidad de carbono orgánico (SOC) de 42,5 Mg ha^{-1}. El contenido medio de humedad (Ch) antes de comenzar las pruebas fue de 25,2%. La conductividad hidráulica (Kns) alcanzó los 11,1 mm h^{-1} y la infiltración acumulada (Iac) los 9,9 cm h^{-1}. En la Figura 3 se han relacionado este conjunto de variables. Centrándonos en las variables hídricas, se comprueba un comportamiento positivo y significativo (p= 0,01/0,05) entre Ch, Iac, Kns. Aunque sin significación, es interesante observar una disminución de Iac y Kns a medida que aumentan los porcentajes de arenas, arcillas y DA. Por el contrario, se constata una relación positiva, también sin significación, entre Iac, Kns, porcentajes de limos y MO. Es significativa y positiva la relación entre Ch y SOC.

Tabla 1. Datos medios para el área de estudio de las características físico-químicas de los suelos, contenido de humedad, infiltración acumulada y conductividad hidráulica

	Media	Desviación Estándar
DA (g cm^{-3})	1,18	0,17
pH	6,6	0,9
SOC (Mg ha^{-1})	42,5	13,8
MO (%)	7,4	3,7
Arenas (%)	32,4	10,9
Limos (%)	52,6	8,06
Arcillas (%)	15,0	8,5
Ch (%)	25,2	10,7
Iac (cm h^{-1})	9,9	7,3
Kns (mm h^{-1})	11,1	11,5

En la Tabla 2 se han incluido los valores medios de las propiedades de los suelos para los diferentes tipos de cubierta vegetal y usos del suelo. En general, los suelos cuentan con altos porcentajes de limos y arenas, siendo las arcillas inferiores al 20%. Solamente se supera este valor en los suelos de las dehesas no gestionadas (21,2%) y repoblaciones forestales (31,2%). Así pues, se concluye que estamos ante unos suelos principalmente franco-limosos. No obstante, en las repoblaciones forestales los suelos son franco-arcillosos. El cálculo de una ANOVA nos indica que existen diferencias significativas (0,001) entre los porcentajes de arenas y arcillas de los suelos de las distintas cubiertas vegetales y usos del suelo. Los suelos de parcelas desbrozadas hace 5 años presentan datos elevados de DA (1,29 g cm^{-3}). Los correspondientes a los bosques naturales registran los valores más altos en SOC (53,5 Mg ha^{-1}) y MO (9,6%). En los campos desbrozados, la DA disminuye a medida que transcurre el tiempo (desbroce 25 años

< desbroce 15 años < desbroce 5 años) mientras que aumenta SOC y MO (desbroce 25 años > desbroce 15 años > desbroce 5 años). DA, SOC y MO no muestran diferencias significativas entre las cubiertas vegetales y usos del suelo.

Figura 3. Relaciones entre las diferentes variables edáficas

Círculo marrón: correlación significativa en el nivel 0,05; Círculo rojo: correlación significativa en el nivel 0,01.

Tabla 2. Características de los suelos bajo diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo

	DA (g cm^{-3})	pH	SOC (Mg ha^{-1})	MO (%)	Aren. (%)	Lim. (%)	Arc. (%)
Matorral	1,16 (±0,20)	6,9 (±0,9)	42,3 (±16,5)	7,7 (±4,6)	34,9 (±9,11)	50,09 (±10,3)	15,01 (±9,06)
Desb5	1,29 (±0,13)	6,9 (±0,7)	31,5 (±10,4)	4,8 (±2,2)	36,9 (±5,04)	54,6 (±3,7)	8,5 (±1,45)
Desb15	1,21 (±0,13)	7,1 (±0,7)	38,1 (±11,5)	6,3 (±2,7)	34,6 (±5,9)	51,2 (±4,08)	14,2 (±5,6)
Desb25	1,13 (±0,15)	6,5 (±0,3)	45,3 (±11,3)	8,5 (±3,9)	30,9 (±6,8)	50,8 (±3,3)	18,3 (±7,7)
Pasto	1,13 (±0,12)	6,9 (±0,7)	46,9 (±9,1)	7,6 (±3,1)	35,9 (±11,3)	49,7 (±3,9)	14,4 (±7,3)
Bosque	1,15 (±0,26)	6,8 (±0,8)	53,5 (±11,6)	9,6 (±4,8)	43,7 (±15,5)	51,1 (±12,7)	5,2 (±2,9)
Dgest	1,22 (±0,13)	5,4 (±0,3)	43,0 (±12,0)	6,9 (±2,5)	28,1 (±13,2)	57,1 (±10,4)	14,8 (±9,3)
Dnogest	1,14 (±0,09)	6,7 (±0,9)	43,5 (±8,5)	7,7 (±2,1)	19,6 (±3,3)	59,2 (±6,4)	21,2 (±6,7)
Repobl	1,12 (±0,28)	6,6 (±1,7)	41,6 (±26,4)	8,5 (±6,9)	21,5 (±6,6)	47,3 (±5,6)	31,2 (±1,8)
Sig, Anov	0,674	<0,001	0,287	0,510	0,001	0,136	<0,001

Entre paréntesis, desviación estándar. Desb5 (Desbroce 5 años), Desb15 (Desbroce 15 años), Desb25 (Desbroce 25 años), Dgest (Dehesa gestionada), Dnogest (Dehesa no gestionada), Repobl (Repoblación).

La Tabla 3 recoge los valores medios de Ch, Iac y Kns para diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo. Las repoblaciones forestales y los desbroces de 15 años son las que cuentan con un menor Ch en los suelos antes de realizar las pruebas (18,3 y 18,0%, respectivamente). Por el contrario, el bosque natural (31,7%), la dehesa gestionada (30,2%) y el matorral (30,1%) disponen de los suelos más húmedos, aunque en este último caso la variabilidad de las muestras es bastante elevada (±19,4). Kns disminuye en el siguiente orden: bosque natural > matorral > pastos > desbroce 15 años > desbroce 5 años > dehesa gestionada > desbroce 25 años > dehesa no gestionada > repoblación forestal. Iac sigue un comportamiento muy parecido. Puede observarse en la Tabla 3 cómo en el caso de las dehesas no gestionadas y las repoblaciones forestales los valores de Iac y Kns son muy bajos. En este último caso, 4,8 y 2,8 mm h^{-1}, respectivamente. La diferencia entre los grupos es significativa en el nivel 0,001 para el caso de Ch.

Tabla 3. Contenido de humedad, infiltración acumulada y conductividad hidráulica no saturada en diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo

	Ch (%)	Iac (cm h^{-1})	Kns (mm h^{-1})
Matorral	30,1 (±19,4)	12,2 (±6,7)	16,3 (±12,1)
Desbroce 5 años	28,3 (±1,3)	11,7 (±8,1)	11,1 (±14,0)
Desbroce 15 años	18,0 (±5,5)	10,6 (±6,5)	12,0 (10,9)
Desbroce 25 años	21,4 (±1,8)	8,8 (±5,7)	10,0 (±10,9)
Pasto	27,5 (±3,1)	11,06(±8,3)	12,1 (±11,5)
Bosque natural	31.7 (±8,1)	13,8 (±9,9)	17,8 (±12,1)
Dehesa gest,	30,2 (±8,0)	9,9 (±9,1)	10,4 (±13,4)
Dehesa no gest,	21,9 (±4,3)	7,4 (±5,1)	4,8 (±4,6)
Repoblación	18,3 (±2,8)	3,3 (±2,5)	2,8 (±5,0)
Sig, Anova	0,001	0,089	0,095

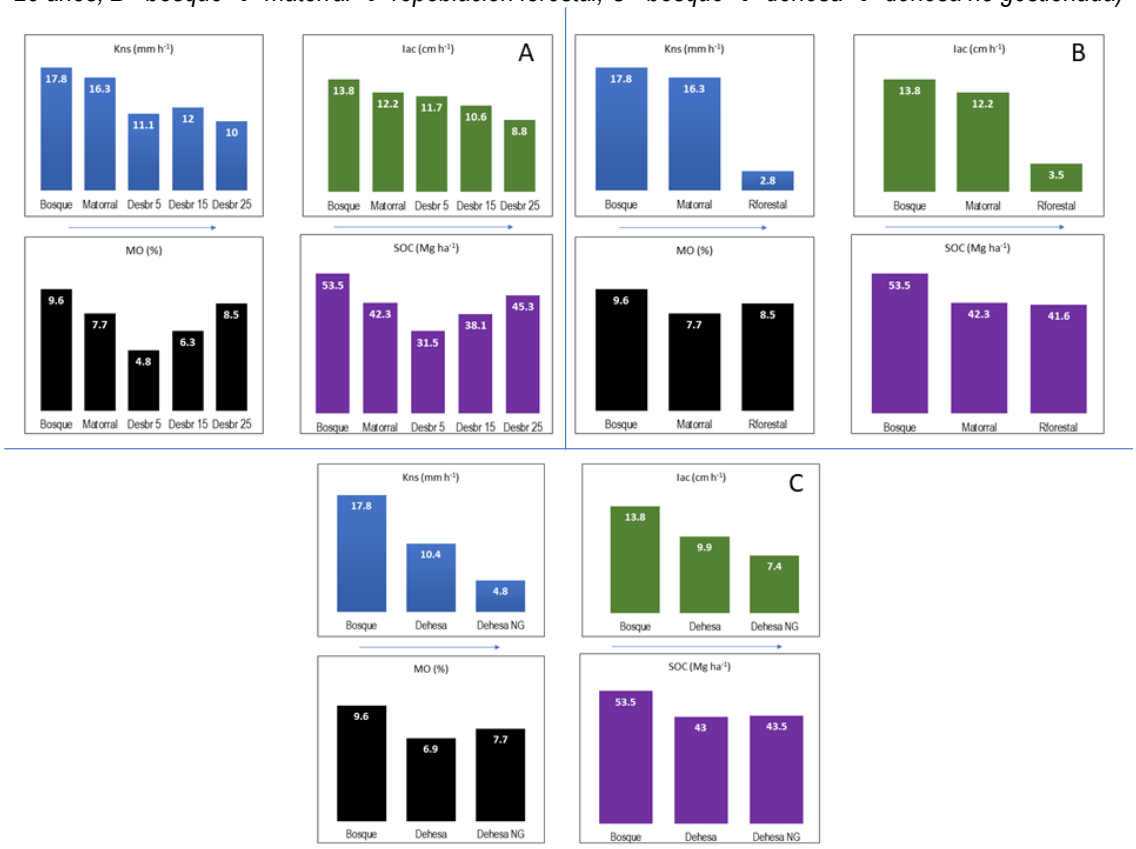
Entre paréntesis, desviación estándar.

En la Figura 4 se ha representado el comportamiento de algunos de los parámetros del suelo y agua en diferentes procesos de evolución del paisaje del área de estudio. La Figura 4A representa el paso de un espacio forestal inicial que, tras la deforestación y probable puesta en cultivo, fue abandonado y colonizado por el matorral. Este proceso, como puede comprobarse, implica unas pérdidas de Kns (8,4%), Iac (11,5%), MO (19,7%) y SOC (20,9%). Como consecuencia de políticas recientes de ampliación de áreas pastables y de reducción de incendios, se han llevado a cabo desbroces de matorral. En general, los desbroces implican una reducción importante de algunos de los parámetros analizados en relación con el bosque y el matorral. En desbroces recientes (5 años) el paso de matorral a desbroce implica una reducción del 31,9% de Kns, 4,1% de Iac, 19,7% de MO y 25,5% de SOC. Por otro lado, la entrada de agua en el suelo disminuye, en general, en mayor proporción a medida que el desbroce es más antiguo. Contrariamente, tanto MO como SOC se van recuperando a medida que transcurre el tiempo del desbroce.

La Figura 4B tiene como punto de partida un bosque que, posteriormente, es eliminado para la puesta en cultivo y, tras el abandono, da paso a una cubierta de matorral. Después se lleva a cabo una repoblación forestal que conlleva una drástica reducción de la infiltración y conductividad hidráulica en relación con el bosque (84,2% para Kns y 74,6% para Iac) y matorral (82,8% para Kns y 71,3% para Iac). De hecho, la repoblación forestal registra los valores más bajos de todos los usos del suelo testados. Tanto MO como SOC, sin embargo, permanecen con valores semejantes especialmente entre la cubierta de matorral y repoblación forestal, aunque siempre por debajo del bosque.

La Figura 4C conlleva el aclarado del bosque para convertirlo en un espacio adehesado con el objeto de introducir al ganado. La reducción de la actividad ganadera trae como consecuencia el abandono de estas dehesas que, sin gestionar, comienzan a ser invadidas por el matorral. En este proceso se comprueba que el aclarado del bosque supone una reducción de Kns (41,5%) e Iac (28,2%). Los valores son más bajos en la dehesa no gestionada. El comportamiento de MO y SOC implica un descenso en el paso de bosque a dehesa y permanece más o menos estable con la dehesa no gestionada.

Figura 4. Comportamiento de algunos parámetros del suelo y agua a partir de la sucesión de cubiertas vegetales y usos del suelo (A= bosque → matorral → desbroce 5 años → desbroce 15 años → desbroce 25 años; B= bosque → matorral → repoblación forestal; C= bosque → dehesa → dehesa no gestionada)



5. DISCUSIÓN

Los cambios de cubierta vegetal y usos del suelo van acompañados de modificaciones tanto en la capacidad de infiltración como en la conductividad hidráulica de los suelos (Zimmermann *et al.,* 2006). Disponer de información sobre la infiltración puede ser de gran interés, pues es un proceso clave en el funcionamiento hídrico de las laderas de montaña al ser el distribuidor de las escorrentías superficiales y subterráneas. También esta información puede ayudar a definir qué tipos de actuaciones deben llevarse a cabo en los diferentes espacios de montaña de cara a conservar o mejorar los servicios ambientales relacionados con la regulación de los recursos hídricos.

Del análisis realizado los datos indican que el agua en el suelo -tanto el contenido de humedad, como la infiltración acumulada y la conductividad hidráulica- está relacionada con la textura del suelo. Los suelos arenosos disponen de vacíos amplios y distribuidos de forma tortuosa que se llenan de aire y dificultan la circulación del agua en condiciones no saturadas. En estas circunstancias, Iac y Kns disminuyen (González Pelayo, 2011). En el lado opuesto, los suelos con mayor proporción de arcillas cuentan con escasos espacios vacíos que dificultan la incorporación del aire y agua. Así pues, son las texturas limosas las más favorables para la infiltración y circulación del agua en los primeros centímetros del suelo. Los valores altos de MO, como indicador de la calidad de los suelos, y SOC también ayudan a la circulación del agua en el suelo, relacionándose positivamente. Los valores altos de DA suelen ser indicativos de suelos compactos, poco estructurados y con bajos contenidos de MO y SOC, por lo que la infiltración del agua será más lenta (Belmonte Serrato *et al*., 2016). De hecho, en el estudio se comprueba que, efectivamente, a medida que es más elevada la densidad aparente, disminuyen MO, SOC, Iac y Kns.

La sucesión de diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo provocada por la acción antrópica en la media montaña mediterránea ha supuesto alteraciones en el funcionamiento hídrico de los suelos. Las laderas cubiertas con bosque natural de frondosas son las que cuentan con una mayor Iac y Kns. Son espacios, además, que cuentan con un mayor porcentaje de MO y de SOC, así pues, estaríamos ante unos suelos bien estructurados, con raíces que ayudan a la formación de pequeños canales para la circulación

del agua. Ramos *et al.* (2019) señalan que los bosques incrementan la infiltrabilidad más que ningún tipo de vegetación debido a la profundidad y longitud de sus raíces, un alto contenido de hojarasca superficial y de materia orgánica en el suelo. La deforestación del bosque de frondosas, especialmente para obtener espacio agrícola o para crear espacios adehesados implicó un primer cambio en los paisajes del área de estudio y modificaciones en el funcionamiento hidrológico de las laderas. De hecho, los resultados indican que el adehesamiento supuso una pérdida de materia orgánica y SOC, así como Iac y Kns.

Los campos cultivados fueron abandonados a medida que la emigración y el despoblamiento de las áreas de montaña se convertía en un proceso generalizado. En estas condiciones, el matorral comenzó a ocupar las laderas. La entrada del matorral empeora ligeramente las condiciones hídricas de los suelos. Sin embargo, los valores no son muy inferiores a los registrados con los bosques naturales. La extensión de los matorrales ha obligado a asumir diferentes actuaciones: 1) desbrozar laderas o 2) repoblar. El desbroce sí supone cambios con relación a la etapa anterior de matorral. Las condiciones de circulación del agua en el suelo, incluso, empeoran a medida que pasa el tiempo, de modo que son más positivas con desbroces de 5 años y declinan en los desbroces más antiguos de 25 años. Por el contrario, tanto MO como SOC se incrementan a medida que transcurre el tiempo, de modo que son superiores a los 25 años. El uso de estos espacios por el ganado podría justificar este comportamiento. Las repoblaciones forestales presentan las peores condiciones de circulación hídrica, con descensos muy marcados de Iac y Kns. Diferentes especies arbustivas, arbóreas, y herbáceas han sido relacionadas con la presencia de hidrofobicidad en los suelos con reducción de la infiltración (Doerr *et al.,* 2000; Gimeno-García *et al.,* 2011). En este caso, los suelos de pinar del área de estudio están sometidos a este proceso. Benito *et al.* (2003) comprobaron este mismo comportamiento hidrofóbico en suelos bajo eucalipto y pino en el noroeste de España. Ambas especies generan una considerable cantidad de resinas, ceras o aceites aromáticos que alcanzan el suelo. El mecanismo de entrada de las sustancias hidrofóbicas en el suelo proviene fundamentalmente de la hojarasca o de la actividad de las raíces (Doerr *et al.,* 2000).

6. CONCLUSIONES

Tras el análisis y estudio del funcionamiento de la infiltración en diferentes cubiertas vegetales y usos del suelo:

1.- Se constatan relaciones de diferente signo entre las variables hídricas (contenido de humedad, infiltración acumulada y conductividad), la textura y algunas otras características de los suelos (materia orgánica, contenido de carbono orgánico y densidad aparente).

2.- Los suelos con cubierta forestal (bosque natural de robles) presentan los valores más elevados de infiltración acumulada y conductividad. Son suelos con elevado porcentaje de materia orgánica y retienen altos contenidos de carbono orgánico. Los datos obtenidos en suelos cubiertos de matorral también mantienen valores elevados.

3.- En el lado opuesto se encuentran las repoblaciones forestales cuyos suelos cuentan con las peores condiciones de circulación y almacenamiento de agua. Esta circunstancia con toda probabilidad está vinculada al comportamiento hidrofóbico de unos suelos que reciben resinas, aceites o acículas provenientes de los pinos.

4.- En los desbroces las condiciones de circulación del agua en el suelo (infiltración acumulada y conductividad hidráulica) empeoran con el paso del tiempo. Sin embargo, mejoran parámetros como la materia orgánica y el carbono orgánico consecuencia del uso y pastoreo del ganado.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos de investigación MANMOUNT (PID2019-105983RB-100/AEI/10.13039/501100011033) financiado por EL MICINN-FEDER, y MOUNTWATER (TED2021-131982B-I00) correspondiente a la convocatoria 2021 de Proyectos Estratégicos Orientados a la Transición Ecológica y Transición Digital 2021. Melani Cortijos-López está trabajando con un contrato de formación de personal investigador (FPI) asociado al citado proyecto MANMOUNT.

REFERENCIAS

Arnáez, J., Lasanta, T., Errea, M.P. (2011). Land abandonment, landscape evolution, and soil erosion in a Spanish Mediterranean Mountain Region: the case of Camero Viejo. *Land Degradation & Development,* 22, 537-550, https://doi.org/10.1002/ldr.1032

Arnáez, J., Lana-Renault, N., Lasanta, T., Ruiz-Flaño, P., Castroviejo, J. (2015). Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review. *Catena,* 128, 122-134, https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.021

Belmonte Serrato, F., Martínez Hernández, C., Ruíz Sinoga, J.D. (2016). Análisis de las características edáficas más significativas de las áreas abandonadas. En A. Romero Díaz (Coord.) *Abandono de cultivos en la Región de Murcia. Consecuencias Ecogeomorfológicas,* (pp. 41-62). Murcia: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia.

Benito, E., Santiago, J.L., de Blas, E., Varela, M.E. (2003). Deforestation of water-repellent soils in Galicia (NW Spain). Effects on surface runoff and erosion under simulated rainfall. *Earth surface Processes and Landforms,* 28, 145-155. https://doi.org/10.1002/esp.431

Collantes, F.G. (2004). La evolución de la actividad agrícola en las áreas de montaña españolas (1860-2000). *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros,* 201, 79-104.

Doerr, S.H., Shakesby, R.A., Walsh, R.P.D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydrogenorphological significance. *Earth Science Review,* 51(1-4), 33-65. https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8

Gimeno-García, E., Pascual, J.A., Llovet, J. (2011). Water repellency and moisture spatial variations under *Rosmarinus officinalis* and *Quercus coccifera* in a Mediterranean burned soil. *Catena*, 85, 48-77. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.12.001

González Pelayo, O. (2011). *Dinámica de la humedad del suelo. Propiedades físicas y escorrentía en laderas mediterráneas afectadas por incendios forestales*. Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

Lana-Renault, N., López-Vicente, M., Nadal-Romero, E., Ojanguren, R., Llorente, J.A., Errea, P., Regüés, D., Ruiz-Flaño, P., Khorchani, M., Arnáez, J., Pascual, N. (2018). Catchment based hydrology under post farmland abandonment scenarios. *Cuadernos de Investigación Geográfica,* 44(2), 505-534. https://doi.org/10.18172/cig.3475

Lasanta, T., Arnáez, J., Ortigosa, L., Pascual, N., Ruiz-Flaño, P., Oserín, M. (2007). Efectos ambientales derivados de la marginación de Camero Viejo (Sistema Ibérico). En J. Arnáez y J.M. García-Ruiz (Eds.), *Espacios Naturales y Paisajes en La Rioja* (pp. 107-127), Logroño: Instituto de Estudios Riojanos.

Lasanta, T., Errea Abad, M.P., Bouzebboudja, M.R., Medrano Moreno, L.M. (2013). *Pastoreo y desbroce de matorrales en Cameros Viejo*. Logroño: Instituto de Estudios Riojanos.

Lasanta, T., Arnáez, J., Nadal-Romero, E. (2019). Soil degradation, restoration and management in abandoned and afforested lands. In P. Pereira (Ed.), *Advances in Chemical Pollution, Environmental Management and Protection: Soil Degradation, Restoration and Management in a Global Change Context* (pp. 71-116), Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2019.07.002

Moreno-de-las-Heras, M., Lindenberger, F., Latron, J., Lana-Renault, N., Llorens, P., Arnáez, J., Romero-Díaz, A., Gallart, F. (2019). Hydro-geomorphological consequences of the abandonment of agricultural terraces in the Mediterranean region: Key controlling factors and landscape stability patterns. *Geomorphology,* 333, 73-91, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.014

Ortigosa Izquierdo, L. (1991). *Las repoblaciones forestales en La Rioja: resultados y efectos geomorfológicos*, Logroño: Geoforma Ediciones.

Ramos, M.C., Lizaga, I., Gaspar, L., Quijano, L., Navas, A. (2019). Effects of rainfall intensity and slope on sediment, nitrogen and phosphorous losses in soils with different use and soil hydrological properties. *Agricultural Water Management,* 226, 105789. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105789

Ruiz Sinoga, J.D., Lucas Santamaría, B., Romero Lopera, A., Noguera Robles, M.J., Gallegos Reina, A., Márquez Carrero, J., Martínez Murillo, J.F. (2003). Determinación de la conductividad hidráulica en laderas mediante el uso de infiltrómetros de minidisco a lo largo de un gradiente pluviométrico mediterráneo. En J. Álvarez-Benedí y P. Marinero (Eds.), *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI.* (pp. 143-152).

Zhang, R. (1997). Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal,* 61(4), 1024–1030. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x

Zimmermann, B., Elsenbeer, H., De Moraes, J.M. (2006). The influence of land-use changers on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. *Forest Ecology and Management,* 222 (1-3), 29-38. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.070