

Heterogeneidad a pequeña escala en laderas semiáridas: Propuesta metodológica e implicaciones ecohidrológicas para la restauración

Small-scale heterogeneity in semi-arid slopes:
Methodological proposal and ecohydrological implications for restoration

Jorge Mongil-Manso ^{a*} , José Luis de Ancos-Siguero ^a

* Autor de correspondencia: ^a Universidad Católica de Ávila, Forest, Water & Soil Research Group, Ávila, España, jorge.mongil@ucavila.es

RESUMEN

En el momento de abordar una restauración ecológica, es necesario evaluar la situación de los procesos ecológicos en términos de funcionalidad o disfuncionalidad, para así poder planificar correctamente las actuaciones restauradoras. Para este fin, la metodología EFA/LFA es muy útil, puesto que utiliza una serie de indicadores ecohidrológicos apoyados en la heterogeneidad a pequeña escala de laderas semiáridas. Se basa en que los ecosistemas altamente funcionales retienen fuertemente recursos vitales (agua, suelo, nutrientes y materia orgánica), mientras que a medida que la función se deteriora se produce una creciente pérdida de estos recursos vitales. El objetivo de este trabajo fue proponer una modificación a la técnica de muestreo de la mencionada metodología. Mientras que la metodología original propone un muestreo mediante transectos lineales, este trabajo abogó por muestreos superficiales, que consiguen una mejor y más precisa evaluación de la funcionalidad ecológica de las laderas. Para comparar ambas metodologías, se han empleado, entre otras, pruebas estadísticas como *t* de Student, *U* de Mann-Whitney y ANOVA. Los resultados obtenidos mostraron que en todas las variables se han encontrado diferencias significativas ($P < 0,05$) entre el método de muestreo original (lineal o unidimensional) y el propuesto como mejora (superficial o bidimensional). Se pudo afirmar, además, que la aplicación de ambas metodologías fue independiente de la zona en la que se desarrolle el muestreo, así como de la mayor o menor funcionalidad ecohidrológica.

Palabras clave: metodología EFA, escorrentía, indicadores ecohidrológicos, infiltración, rehabilitación.

SUMMARY

When engaging in ecological restoration, it's crucial to assess the status of ecological processes in terms of functionality or dysfunctionality to properly plan restoration efforts. In this regard, the EFA/LFA methodology proves highly beneficial as it employs a set of ecohydrological indicators based on the small-scale heterogeneity of semi-arid slopes. This methodology operates on the premise that highly functional ecosystems effectively retain essential resources like water, soil, nutrients, and organic matter, while declining functionality leads to a progressive loss of these vital resources. The aim of this study was to propose a modification to the sampling technique used in the aforementioned methodology. While the original method suggests sampling via linear transects, this research advocates for surface sampling, which provides a more thorough and precise assessment of the ecological functionality of slopes. To compare both methodologies, statistical tests such as Student's *t*-test, Mann-Whitney *U* test, and ANOVA were employed. The results showed significant differences ($P < 0.05$) in all variables between the original linear or unidimensional sampling method and the proposed surface or bidimensional method. Furthermore, it could be concluded that the application of both methodologies was independent of the sampling area and the degree of ecohydrological functionality.

Keywords: EFA methodology, ecohydrological indicators, infiltration, rehabilitation, runoff.

INTRODUCCIÓN

Cuando se aborda una restauración ecológica en laderas semiáridas degradadas, se hace necesario un correcto diagnóstico de la situación actual de los procesos ecológicos (Berdugo et al., 2017), para así cuantificar el esfuerzo o la intensidad necesaria de restauración y el éxito esperado (Thompson & Thompson, 2004; Ruíz-Jaen & Aide, 2005; Dowo et al., 2013). La metodología Ecosystem

Function Analysis o Landscape Function Analysis (EFA/LFA) es de uso generalizado (Randall, 2004; Tongway & Ludwig, 2006; Lacy et al., 2008; Humphries, 2016) y aborda esta necesidad, integrando la función del ecosistema con la estructura y la complejidad de la vegetación, identificando los procesos vulnerables del ecosistema, y facilitando su rehabilitación o restauración (Ludwig et al., 1997; Tongway & Hindley, 2004). Esta metodología utiliza unos indicadores evaluados visualmente para determi-

nar la funcionalidad del ecosistema (Tongway et al., 1998; Merino-Martín, 2010), basándose en que los ecosistemas altamente funcionales retienen fuertemente recursos vitales (agua, suelo, nutrientes y materia orgánica); sin embargo, a medida que la función se deteriora se produce una creciente “fuga” de estos recursos vitales del paisaje.

Los paisajes semiáridos funcionan, según Ludwig et al. (1997), como sistemas que conservan agua y nutrientes escasos. Los desencadenantes (o entradas al sistema), tales como la precipitación y las partículas del suelo, son redistribuidos en el espacio o transferidos dentro del paisaje por procesos como escorrentía-infiltración y erosión-depósito. Estas entradas son capturadas por sumideros, que obstruyen o capturan el agua, y que funcionan como reservas de agua, nutrientes y materia orgánica (Mayor et al., 2009; Urgeghe & Bautista, 2014). Si la disponibilidad de estos recursos supera un umbral crítico para las plantas y animales, estos organismos producirán una respuesta de supervivencia o crecimiento. Los materiales generados en estas respuestas (por ejemplo, semillas), son enterrados en las reservas y alimentan a las estructuras del paisaje que actúan como sumideros. A este proceso se le denomina “dinámica fuente-sumidero”.

Los paisajes semiáridos poseen sumideros de diferentes tamaños y formas, dispuestos de forma dispersa en su superficie (Tongway, 2003). Grandes sumideros son, por ejemplo, los bosquetes separados por espacios abiertos, mientras que sumideros de menor tamaño pueden considerarse los montones de troncos o ramas, piedras y bloques, o matas de especies leñosas o herbáceas (Figura 1). Por su parte, los espacios entre sumideros son zonas en las que

recursos como el agua, materiales del suelo y nutrientes pueden ser transportados y movilizadas, como por ejemplo una costra de suelo desnudo o un suelo pedregoso desnudo. A estas escalas operan muchos de los procesos que intervienen en la conservación de aguas y suelos. Son también las escalas donde se aplican las técnicas de manejo, de restauración de espacios degradados, de lucha contra la desertificación y oasisificación (Martínez de Azagra et al., 2006).

El agua es repuesta en el paisaje a intervalos periódicos, mediante la lluvia, y sufre cambios rápidos en periodos cortos (días o semanas), dependiendo de los episodios de precipitación y de los fenómenos de escorrentía, evaporación, transpiración y drenaje profundo. La redistribución espacial del agua a través del paisaje está regulada por dos factores: el terreno y la vegetación (Tongway, 2003).

Respecto al terreno, hay que tener en cuenta, en primer lugar, la morfología, es decir, lo que puede denominarse rugosidad del paisaje. Un paisaje muy rugoso tiene mayor influencia en el transporte de materiales a gran extensión que una ladera lisa, larga y abierta. Un terreno liso tenderá a tener importantes flujos de agua, creando un incremento en las turbulencias, que aumentará la transferencia de materiales (erosión). La pendiente del terreno altera también la capacidad de transporte de flujos superficiales. Una disminución de la pendiente provocará la ralentización, encharcamiento e infiltración del agua, mientras que un incremento de la pendiente provocará un mayor escurrimiento del agua por gravedad (Mongil, 2003).

La vegetación perenne tiene también una gran influencia en la transferencia de agua. Por ejemplo, cuando la escorrentía encuentra matas de herbáceas o leñosas, su tra-

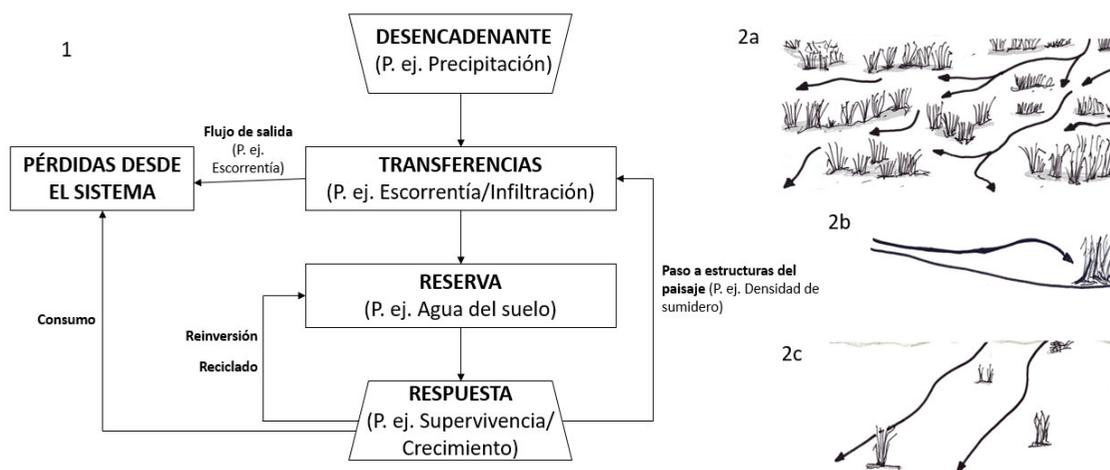


Figura 1. Esquema Desencadenante-Transferencia-Reserva-Respuesta (modificado de Ludwig et al., 1997) (1). Laderas cubiertas por matas de leñosas o herbáceas en gran densidad hacen que el agua fluya de forma tortuosa (2a); Mata absorbiendo agua de escorrentía (2b); Flujos de escorrentía largos y rectos, en un paisaje o ladera disfuncional con pocas matas (2c), es la situación contraria al paisaje funcional con flujo corto y tortuoso motivado por numerosas matas del 2a.

Trigger-Transfer-Storage-Response Scheme (modified from Ludwig et al., 1997) (1). Slopes covered by dense stands of woody or herbaceous vegetation cause water to flow in a tortuous manner (2a); Vegetation absorbing runoff water (2b); Long, straight runoff flows in a dysfunctional landscape or slope with few stands of vegetation (2c), contrasting with the functional landscape characterized by short, tortuous flows driven by numerous stands of vegetation in 2a.

yectoria se hace más tortuosa (Figura 1), favoreciéndose la infiltración al incrementarse el tiempo de oportunidad de infiltración. Por esta razón, se incrementa la cantidad de agua infiltrada y almacenada en el perfil edáfico de sumideros o reservas (Mongil 2003).

La evaluación de la heterogeneidad espacial a pequeña escala en laderas semiáridas sirve, en consecuencia, para conocer la funcionalidad o disfuncionalidad ecohidrológica de estas laderas y, por lo tanto, las posibilidades para su recuperación ecológica (Tongway et al., 2004). Por otra parte, basándose en esta evaluación, pueden establecerse criterios y pautas para afrontar la restauración forestal de este tipo de terrenos (Urgeghe & Bautista, 2014; Fuentes et al., 2016).

El objetivo de este trabajo es proponer una modificación de la metodología EFA/LFA, en lo que se refiere a la forma de llevar a cabo el muestreo de indicadores en las laderas semiáridas, para evaluar su funcionalidad ecohidrológica. Se plantea la hipótesis de que es posible optimizar el muestreo de los indicadores y, consecuentemente, mejorar el conocimiento de la funcionalidad de las laderas semiáridas, sustituyendo los transectos lineales por bandas superficiales. Se trata, por lo tanto, de aplicar la metodología original y la modificada, que se propone en este trabajo, a diferentes tipos de laderas, para compararlas y demostrar la validez y las ventajas de la metodología propuesta frente a la original.

MÉTODOS

Área de estudio. Se estudiaron dos laderas semiáridas degradadas (zonas A y B) situadas en los municipios de Blascosancho y Maello (Provincia de Ávila, centro de España),

muy próximos entre sí (Figura 2). La precipitación anual media en la zona es de 403 mm. La temperatura anual media es 11,1 °C. La pendiente media de las laderas es del 20%. Los suelos son poco evolucionados (Entisoles) formados principalmente sobre fangos arcósicos y arenas con cantos (IGME 1982). La vegetación es escasa (cubierta aproximada del 10%), con algunas matas de *Retama sphaerocarpa* (L.) Boiss., *Rosa canina* L., *Astragalus glaux* L., *Astragalus granatensis* Lam., *Genista cinérea* DC., *Thymus* sps. L., 1753, *Lavantula stoechas* Lam. y *Quercus ilex* ssp. *ballota* (Desf.) Samp.

Metodología. En este trabajo, se aplicó la metodología propuesta por Ludwig et al. (1997), que forma parte del *Ecosystem Function Analysis* (EFA); pero, atendiendo al objetivo de este trabajo, se ha aplicado también esta metodología de manera modificada.

La metodología original (para una explicación más detallada: Tongway, 2003) consiste en la realización de secciones transversales o transectos, es decir, recorridos a lo largo de una ladera desde la parte alta a la baja (esto facilita el reconocimiento de secuencias de escorrentía e infiltración), perpendiculares a las curvas de nivel. Para ello, se coloca una cinta métrica, perpendicular a las curvas de nivel, procurando que quede tensa (Figura 3). Se inspecciona la forma del terreno a lo largo de la sección transversal para localizar características topográficas (por ejemplo, depresiones o montículos). También se anotan las localizaciones de diferentes sumideros de suelo y vegetación (grandes matas de herbáceas o leñosas, acumulaciones de troncos, grupos de matorral, espesuras de arbustos, árboles aislados o en pequeños grupos).

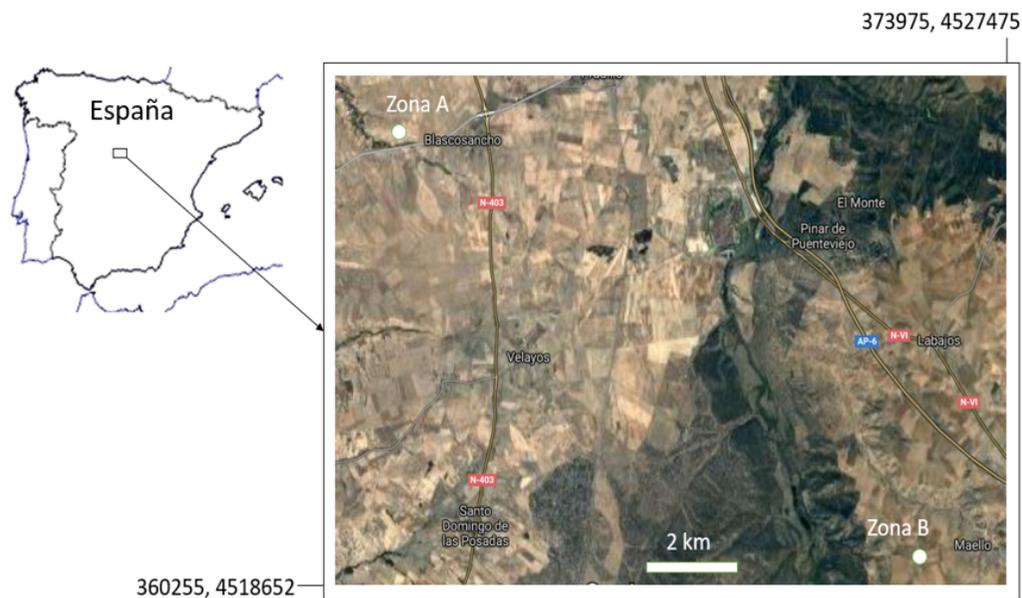


Figura 2. Localización del área de estudio. Coordenadas UTM, Huso 30 T.

Location of the study area. UTM coordinates, Zone 30 T.



Figura 3. Ejemplos de transectos lineales (L) y bidimensionales (S). De arriba abajo y de derecha a izquierda: 4L, 1S, 6L y 5S.
Examples of linear (L) and bidimensional (S) transects. From top to bottom and from right to left: 4L, 1S, 6L, and 5S.

En concreto, las mediciones y observaciones efectuadas fueron:

- Conteo de todos los sumideros, a partir del cual se obtuvo el número de sumideros (distinguiendo por tipos).
- Longitud de cada sumidero en la dirección de la sección transversal (a partir de la cual se calculó la longitud total de sumideros), y la anchura de cada sumidero en dirección perpendicular a la sección (calculándose la anchura total, que refleja la obstrucción total al flujo superficial). Sólo se tuvo en cuenta la anchura de aquellas estructuras que estén en contacto cerrado con el suelo (a una distancia menor de 1 cm).
- Separación entre sumideros, a partir de la cual se calculó la distancia media de espacio abierto entre sumidero y sumidero a lo largo de la sección transversal, que indica la longitud por la que fluye el agua antes de chocar contra obstrucciones (sumideros).

- Información adicional como: pendiente, orientación, anidamiento jerárquico de los sumideros, tamaño y densidad de sumideros a pequeña escala, características del espacio entre sumideros, suelo en el espacio entre sumideros, oscuridad del suelo en sumideros debida a la materia orgánica y presencia de humedad en los sumideros.

En el presente trabajo se propuso, como mejora a la metodología de muestreo, la realización de transectos bidimensionales, de 50 m de largo y 2 m a ambos lados del eje del transecto (señalizados con otra cinta métrica dispuesta perpendicularmente), es decir, se realizaron mediciones en transectos superficiales de 200 m², llevando a cabo en esta superficie todas las mediciones anteriormente mencionadas.

Para aplicar ambas metodologías, se seleccionaron dos zonas próximas entre sí (A y B), con vegetación degradada (Cuadro C1). En cada una de las zonas, se realizaron 4 transectos lineales o unidimensionales (metodología original) y otros 4 superficiales o bidimensionales (metodo-

logía modificada). La ubicación de los transectos en las laderas fue aleatoria.

Análisis estadístico. El análisis estadístico, llevado a cabo con IBM SPSS Statistics 20, se dividió en dos partes:

- Exploración y descripción de las variables utilizadas, según zona y metodología: Si existen o no valores atípicos (*outliers*) y el grado de ajuste al modelo normal de Gauss. Para ello se emplearon, diagramas de caja y el test de bondad de ajuste de Shapiro-Wilk específico para muestras pequeñas, junto a los estadísticos descriptivos de asimetría y curtosis.
- Análisis de la significación de las diferencias, en cada variable, en función de los factores zona y metodología: Se analizó si había diferencias significativas entre las dos metodologías empleadas. Para ello, se realizaron estos contrastes de diferencias entre las medias de las siete variables medidas con la prueba *t* de Student, para dos muestras con medidas independientes. Se corroboró el resultado con la alternativa no-paramétrica del test *U* de Mann-Whitney, para muestras pequeñas. Se tomaron como variables independientes la zona y la metodología, con dos niveles en cada una de ellas. Así mismo, se empleó el análisis de varianza (ANOVA) con dos factores de efectos fijos, como test multivariado para el estudio simultáneo de ambas variables independientes, como factores explicativos de las posibles diferencias. Previamente a la utilización de las técnicas paramétricas se comprobó la condición de igualdad de varianza con el test de Levene.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología LFA/EFA se basa en la medición de una serie de atributos del paisaje, el suelo y la vegetación a lo largo de unos transectos de 100 m de longitud orientados a lo largo de la pendiente (Tongway & Hindley, 2003). Esta aplicación por transectos lineales es la que se emplea habitualmente (Mongil, 2003; Oyarzábal, 2013). Sin embargo, es posible mejorar el muestreo de los indicadores, y por lo tanto mejorar el conocimiento de la funcionalidad de las laderas semiáridas, sustituyendo los transectos lineales por unas bandas superficiales, igualmente orientadas a favor de la pendiente. Esta hipótesis se demuestra estadísticamente a continuación.

En los Cuadros 1 y 2, se exponen los resultados de los muestreos realizados en las zonas A y B, tanto en transectos unidimensionales (metodología original) como bidimensionales (metodología modificada).

En la zona A, la escorrentía encuentra pocos obstáculos que sirvan para interrumpir el flujo de agua y favorezcan la infiltración, y estos están bastante separados entre sí. Entre

los tipos de sumideros presentes, las matas de retama son poco eficientes respecto a la captura del agua y nutrientes, debido fundamentalmente a su constitución morfológica, oponiendo poca resistencia al flujo, siendo mucho más eficientes las matas de *Astragalus* o tomillos, ya que son especies más tapizantes y de conformación más almohadillada, con más superficie en contacto con el suelo. El número de sumideros por 10 m es más bajo en la zona B, algo más de la mitad, lo cual supone que en esta ladera la escorrentía encontrará menos obstáculos que interrumpan su flujo y que favorezcan la infiltración (Ludwig et al., 1997). El tipo de sumideros predominante en la zona B es el de troncos de encina en pie de pequeño diámetro, que son poco eficientes respecto a la captura del agua y nutrientes, debido fundamentalmente a su constitución morfológica, oponiendo poca resistencia al flujo, siendo más escasas las matas leñosas más pegadas al suelo, que son por lo tanto más eficientes. La longitud de sumideros por 10 m es el doble en la zona A que en la B. Este parámetro implica una mayor superficie donde puede recogerse escorrentía. La anchura de los sumideros es la responsable de obstruir el flujo superficial. En la zona A la escorrentía encuentra casi 0,71 m de obstrucción por cada 10 m de ladera, mientras que en la zona B se reduce a los 0,39 m de obstrucción. La distancia entre sumideros es el indicador más parecido entre ambas zonas, algo mayor en la A que en la B. Todos los parámetros obtenidos indican una manifiesta disfuncionalidad en ambas zonas, siendo algo más funcional la zona A que la B, a pesar de poseer esta última una vegetación más avanzada sucesionalmente, con la presencia de la especie del bosque original (*Quercus ilex*). Con el muestreo mediante transectos bidimensionales (superficiales) se observa un mayor número de sumideros, como es lógico, al muestrearse una superficie mayor. Pero los indicadores son reducidos también, similares en ambas zonas, aunque algo más bajos en la zona B.

En conclusión, se puede decir que los sumideros de la zona B, matas de monte bajo de encina con pies de pequeños diámetros, por sí solos son poco eficientes como sumideros respecto a la captura de agua y nutrientes, debido fundamentalmente a su escaso contacto basal con el suelo, oponiendo una menor resistencia al flujo y siendo mucho menos eficiente que la vegetación arbustiva y de matorral en contacto con el suelo. Los diagramas de caja (Figura 4) muestran que no han aparecido valores anómalos o atípicos por su separación del resto de valores del grupo.

En cuanto al ajuste al modelo normal de Gauss, el Cuadro C2 resume los estadísticos descriptivos obtenidos por zona y metodología. Con las medidas de curtosis y asimetría obtenidas, en la mayoría de las mediciones realizadas se ha observado que las variables no difieren significativamente ($P > 0,05$) del modelo normal, presentando por tanto buen ajuste. Se han encontrado algunos desvíos significativos pero leves ($P < 0,05$) y solamente hay una variable (distancia media en la zona B) que tiene un desvío notable del modelo de Gauss ($P < 0,01$). Esto permite, en general,

Cuadro 1. Resultados de los transectos lineales en las zonas A y B.

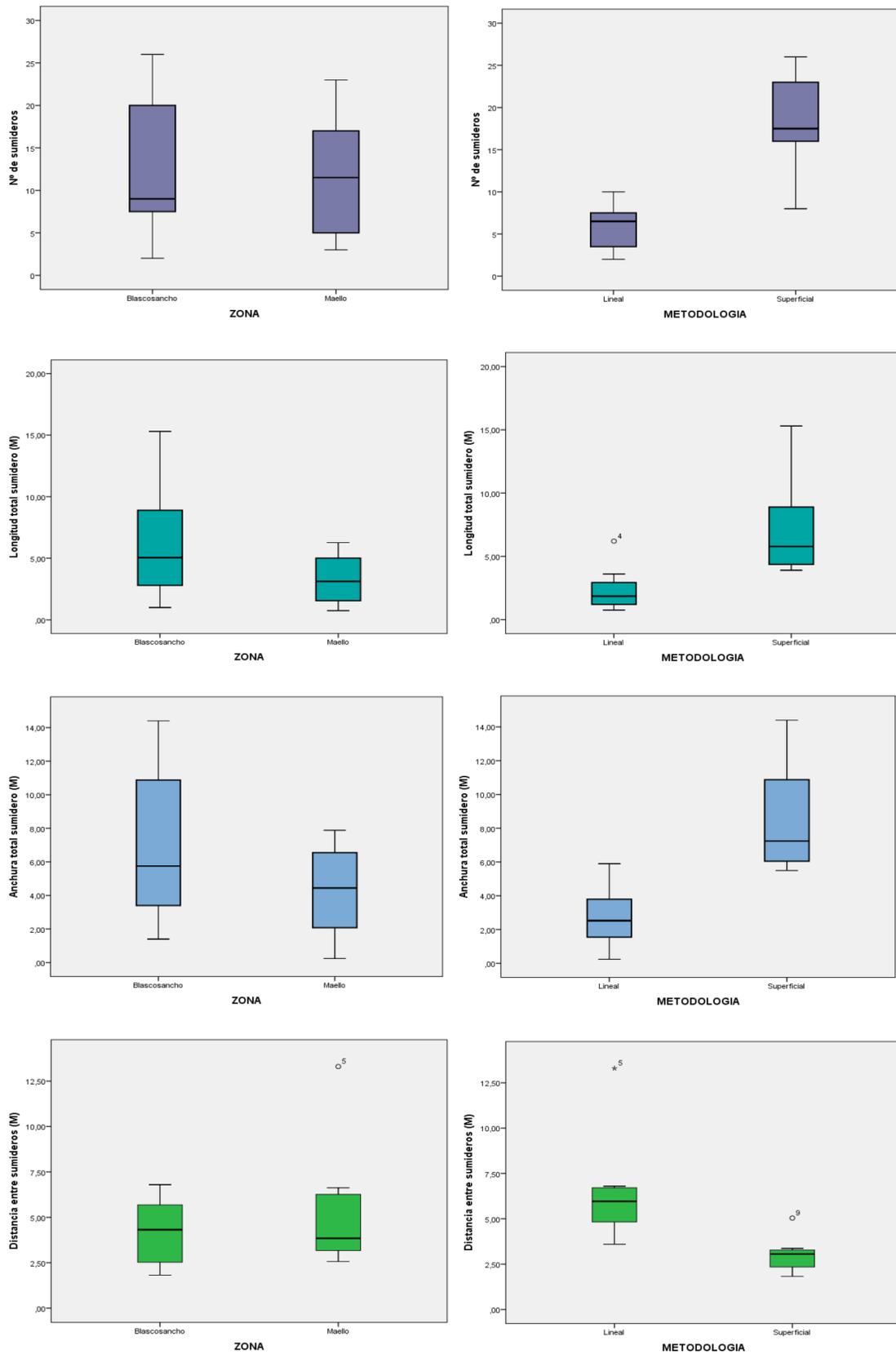
Results of linear transects in zones A and B.

Indicador	T1LA	T2LA	T3LA	T4LA	Media (DT)	T1LB	T2LB	T3LB	T4LB	Media (DT)
Longitud muestreada (m)	50	50	50	50		50	50	50	50	
Nº sumideros	2	8	7	10	6,75 (3,40)	3	4	7	6	5,00 (1,83)
Tipo sumideros	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas		Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	
Sumideros/10 m	0,40	1,60	1,40	2,00	1,35 (0,68)	0,60	0,80	1,40	0,34	0,79 (0,45)
Longitud total sumideros (m)	1,00	3,60	2,00	6,20	3,20 (2,27)	0,75	1,40	2,25	1,70	1,53 (0,63)
Longitud/10 m (m)	0,20	0,72	0,40	1,24	0,64 (0,45)	0,15	0,28	0,45	0,49	0,34 (0,16)
Anchura total sumideros (m)	1,40	4,20	2,60	5,90	3,53 (1,96)	0,24	1,70	3,39	2,45	1,95 (1,33)
Anchura/10 m (m)	0,28	0,84	0,52	1,18	0,71 (0,39)	0,05	0,34	0,68	0,49	0,39 (0,27)
Distancia media entre sumideros (m)	3,40	4,67	5,17	3,24	4,12 (2,95)	8,87	3,24	5,69	4,42	5,56 (2,43)
Pendiente	16	20	16	21	18,25 (2,63)	21	20	22	26	22,25 (2,63)
Orientación	SW	SW	SW	SW		NE	NE	N	W	
Andamiajo jerárquico sumideros	Escaso	Nulo	Escaso	Nulo		No apreciable	No apreciable	No apreciable	No apreciable	
Tamaño y densidad de sumideros a pequeña escala	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Escasos	Escaso tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Muy escasos		Tapiz herbáceo de gramíneas anuales				
Características de espacio entre sumideros	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Zonas sin vegetación	Zonas sin vegetación	Zonas sin vegetación		Amplios espacios con tapiz herbáceo	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Escaso tapiz herbáceo	
Suelo en espacio entre sumideros	Pedregosidad escasa, sin costra	Bastante pedregoso y erosión incipiente	Pedregosidad media	acarcavamiento incipiente. Costras. Pedregosidad media.		Pedregosidad escasa	Pedregosidad escasa	Pedregosidad escasa	Pedregosidad muy alta	
Oscuridad de suelo en sumideros	Baja	Baja	Baja	Nula		Notable	Notable	Notable	Escasa	
Humedad en sumideros	Escasa	Escasa	Escasa	Escasa		Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	

Cuadro 2. Resultados de los transectos superficiales en las zonas A y B

Results of surface transects in zones A and B

Indicador	T1SA	T2SA	T3SA	T4SA	Media (DT)	T1SB	T2SB	T3SB	T4SB	Media (DT)
Longitud muestreada (m)	50	50	50	50	18,50 (7,94)	50	50	50	50	18,25 (7,94)
Superficie muestreada (m ²)	200	200	200	200	9,25 (5,13)	200	200	200	200	5,07 (5,13)
N° sumideros	8	23	17	26	0,05 (0,03)	23	16	16	18	0,03 (0,03)
Tipo sumideros	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas y bloques	0,34 (0,21)	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	Matas leñosas	0,09 (0,21)
Sumideros/m ²	0,04	0,46	0,34	0,52	9,25 (5,13)	0,12	0,08	0,08	0,09	5,07 (5,13)
Longitud total sumideros (m)	3,90	11,50	6,30	15,30	10,44 (3,88)	6,27	4,00	5,29	4,73	6,62 (3,88)
Longitud/m ² (m)	0,02	0,06	0,03	0,08	0,04 (0,03)	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03 (0,03)
Anchura total sumideros (m)	5,60	12,55	9,20	14,40	2,74 (1,19)	7,88	5,50	6,60	6,50	2,90 (1,19)
Anchura/m ² (m)	0,028	0,003	0,05	0,07	18,25 (2,63)	0,04	0,03	0,03	0,03	22,25 (2,63)
Distancia media entre sumideros (m)	4,41	2,03	2,76	1,75	No apreciable	2,46	3,16	2,97	3,00	No apreciable
Pendiente	16	20	16	21	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	21	20	22	26	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales
Orientación	SW	SW	SW	SW	Amplios espacios con tapiz herbáceo	NE	NE	N	W	Amplios espacios con tapiz herbáceo
Anidamiento jerárquico sumideros	Escaso	Nulo	Escaso	Nulo	Erosión y acaravamiento incipiente. Costras. Pedregosidad media.	No apreciable				
Tamaño y densidad de sumideros a pequeña escala	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Escasos	Escaso tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Muy escasos	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales	Tapiz herbáceo de gramíneas anuales
Características de espacio entre sumideros	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Zonas sin vegetación	Zonas sin vegetación	Zonas sin vegetación	Escasos	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Amplios espacios con tapiz herbáceo	Escaso tapiz herbáceo	Escaso tapiz herbáceo
Suelo en espacio entre sumideros	Pedregosidad escasa, sin costra	Bastante pedregoso y erosión incipiente	Pedregosidad media	Pedregosidad media	Pedregosidad escasa	Pedregosidad escasa	Pedregosidad escasa	Pedregosidad escasa	Pedregosidad muy alta	Pedregosidad muy alta
Oscuridad de suelo en sumideros	Baja	Baja	Baja	Nula	Notable	Notable	Notable	Notable	Escasa	Escasa
Humedad en sumideros	Escasa	Escasa	Escasa	Escasa	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia



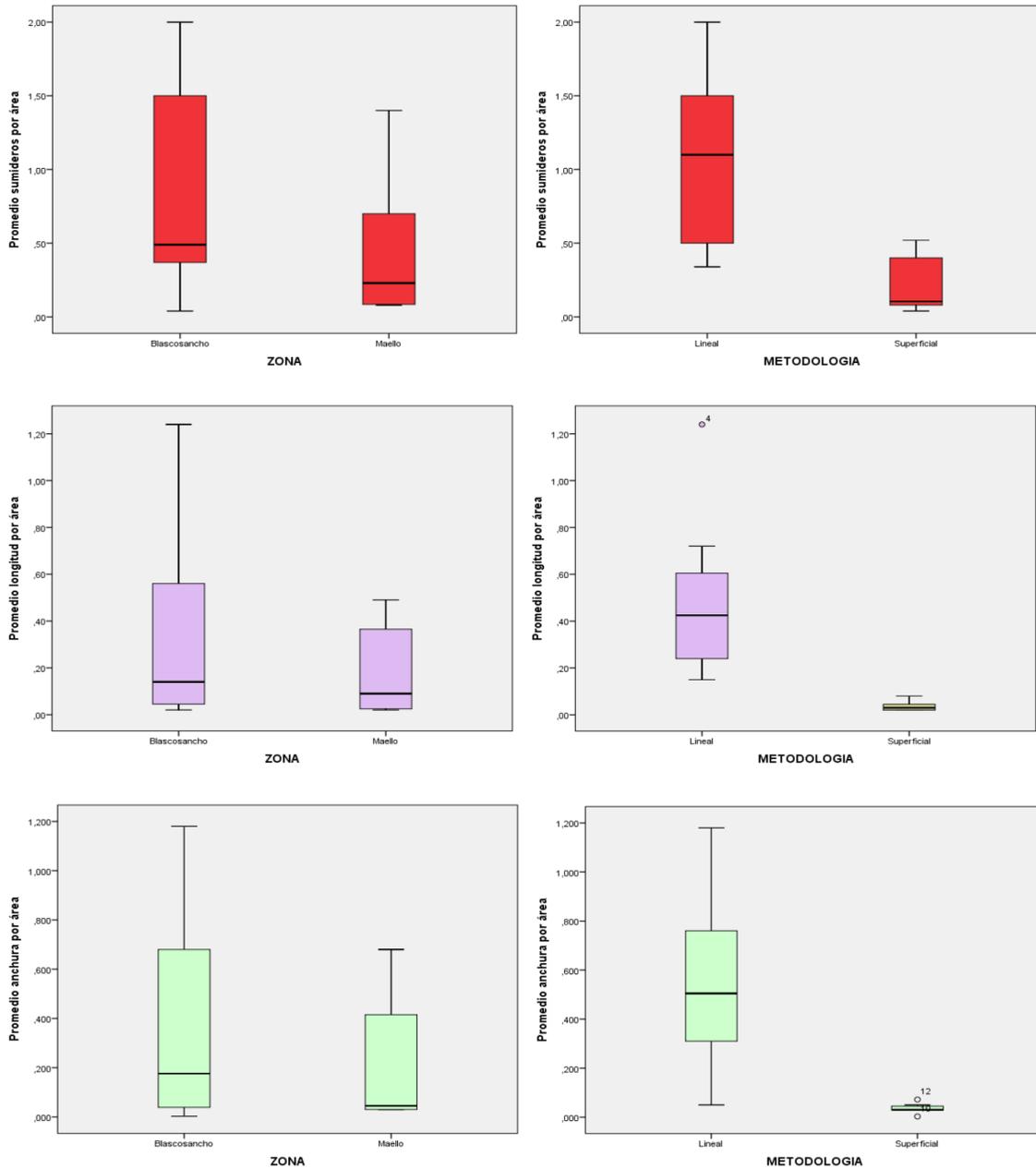


Figura 4. Diagramas de cajas para distintas variables, por zona y metodología.

Box plots for different variables, by zone and methodology.

la utilización de métodos estadísticos paramétricos, aunque por prudencia se van a corroborar los resultados con las alternativas no-paramétricas, cuando esto sea posible.

En los Cuadros C3 y C4 se exponen los estadísticos descriptivos de todas las variables, respectivamente según la zona y la metodología. Para todos los parámetros el rango es pequeño, por lo que se puede decir que la muestra tiene una dispersión pequeña. Por lo tanto, se considera que las medias resultan representativas de la muestra, como índice de tendencia central de la población, al ser la media muy sensible a los valores extremos.

Para ver cómo están agrupados los datos respecto a la media, se recurre a los índices de dispersión, es decir, a la desviación típica y a la varianza, y sus bajos valores nos confirman la escasa dispersión de los datos. En todos los casos, los parámetros que tienen un mayor coeficiente de variación y, por lo tanto, una variabilidad más alta, son los promedios (nº de sumideros, anchura y longitud media/10 m o m²), por lo que presumimos que estos tres parámetros no se deben de considerar como variables, sino como resultados.

Otro aspecto interesante que se deduce de los resultados obtenidos, es el hecho de que las medias y las media-

nas presentan valores muy cercanos, por lo tanto, podemos suponer que la distribución no tiene una asimetría claramente definida, para la mayoría de los parámetros, si bien no afecta a la distribución de una forma significativa.

Los valores medios obtenidos en los muestreos son más negativos (menos funcionales) que los indicados por Tongway (2003) en el semiárido de Australia. Por ejemplo, el número de sumideros/10 m es 2,44 en el caso australiano, mientras que en este trabajo resulta 1,35 y 0,79, respectivamente para las zonas A y B. La anchura de sumideros (m/10 m) es en Australia 4,13 frente a los 0,71 y 0,39 en nuestro caso. Finalmente, la distancia media entre sumideros (m) es 3,17 en el muestreo australiano y 4,12 y 5,56 en este trabajo. Oyarzábal (2013), en taludes de explotaciones mineras de la provincia de Teruel (este de España), obtiene 4,81 sumideros/10 m y 2,03 m de distancia media entre sumideros, valores menos funcionales que en el caso australiano y en el presente trabajo.

Análisis de significación de las diferencias. Previa a la utilización de las técnicas paramétricas se comprobó la condición de igualdad de varianza con el test de Levene. Los resultados que se presentan son los adecuados a cada caso según se cumpla o no esta condición. Los valores de P se han tomado en forma bilateral ante falta de expectativa de diferencia en una dirección determinada, por ello

se considerarían diferencias casi significativas a aquellas con valores de P comprendidos entre 0,05 y 0,10. El Cuadro 3 contiene los resultados obtenidos con la metodología lineal comparando las dos zonas. Como se puede apreciar en ella, no se han encontrado en ninguna de las variables diferencias que puedan ser consideradas como estadísticamente significativas con $P > 0,05$ en ambos test estadísticos (t de Student y U de Mann-Whitney).

El Cuadro 4 resume los contrastes realizados entre ambas zonas por método superficial. Como se puede apreciar en ella, tampoco se han encontrado diferencias que puedan ser consideradas como estadísticamente significativas con $P > 0,05$ en ambos procedimientos estadísticos. Es cierto que en la variable promedio del número de sumideros por transecto en el test paramétrico se ha encontrado una $P > 0,05$ pero $< 0,10$ que nos hace pensar que la diferencia es casi significativa, pero en la alternativa no paramétrica esta posible significación desaparece con un valor $P > 0,05$.

Así mismo, se ha empleado el Análisis de Varianza (ANOVA) con dos factores de efectos fijos, como test multivariado para el estudio simultáneo de ambas variables independientes, como factores explicativos de las posibles diferencias (Cuadro 5). Los resultados muestran que, en todas las variables, se han encontrado diferencias altamente significativas con $P < 0,01$ entre un método y otro, generando, como es lógico, valores medios mayores cuando se

Cuadro 3. Test de diferencias entre medias. Variables medidas en los transectos con metodología lineal, según zona.

Test of differences between means. Variables measured in linear transects methodology, by zone.

Variables/zona	n	Media	D.T.	Diferencia entre medias (95%)	Prueba t de Student			Test M-W	
					t	gl	P-valor	P-valor	
Número de sumideros	A	4	6,75	3,40	NS	0,91	6	0,400 ^{NS}	0,309 ^{NS}
	B	4	5,00	1,83					
Longitud total sumideros (metros)	A	4	3,20	2,27	NS	1,42	6	0,204 ^{NS}	0,248 ^{NS}
	B	4	1,52	0,62					
Anchura total sumideros (metros)	A	4	3,52	1,96	NS	1,34	6	0,230 ^{NS}	0,248 ^{NS}
	B	4	1,94	1,33					
Distancia media entre sumideros (metros)	A	4	5,44	1,36	NS	-1,00	6	0,356 ^{NS}	0,564 ^{NS}
	B	4	7,54	3,96					
Promedio del número de sumideros por transecto	A	4	1,35	0,69	NS	1,38	6	0,216 ^{NS}	0,191 ^{NS}
	B	4	0,78	0,45					
Promedio de la longitud del sumidero / metro	A	4	0,64	0,45	NS	1,24	6	0,262 ^{NS}	0,386 ^{NS}
	B	4	0,34	0,16					
Promedio de la anchura del sumidero / metro	A	4	0,70	0,39	NS	1,33	6	0,231 ^{NS}	0,248 ^{NS}
	B	4	0,39	0,26					

NS = no significativo ($P > 0,05$), * Significativo al 5%, ** Altamente significativo al 1%.

Cuadro 4. Test de diferencias entre medias, para metodología bidimensional, según zona.

Test of differences between means, for bidimensional methodology, by zone.

Variables/zona	n	Media	D.T.	Diferencia entre medias (95%)	Prueba t de Student			Test M-W	
					t	gl	P-valor	P-valor	
Número de sumideros	A	4	18,50	7,94	NS	0,06	6	0,956 ^{NS}	0,661 ^{NS}
	B	4	18,25	3,30					
Longitud total sumideros (m)	A	4	9,25	5,13	NS	1,60	3,2	0,202 ^{NS}	0,248 ^{NS}
	B	4	5,07	0,96					
Anchura total sumideros (m)	A	4	10,44	3,88	NS	1,91	3,4	0,142 ^{NS}	0,149 ^{NS}
	B	4	6,62	0,98					
Distancia media entre sumideros (m)	A	4	2,98	1,45	NS	-0,12	6	0,905 ^{NS}	0,386 ^{NS}
	B	4	3,07	0,35					
Promedio del número de sumideros por transecto	A	4	0,34	0,21	NS	2,31	6	0,060 ^{NS}	0,245 ^{NS}
	B	4	0,09	0,02					
Promedio de la longitud del sumidero / m	A	4	0,05	0,03	NS	1,60	3,3	0,201 ^{NS}	0,225 ^{NS}
	B	4	0,02	0,01					
Promedio de la anchura del sumidero / m	A	4	0,04	0,03	NS	0,38	3,2	0,726 ^{NS}	0,999 ^{NS}
	B	4	0,03	0,01					

NS = no significativo ($P > 0,050$), * Significativo al 5%, ** Altamente significativo al 1%.

Cuadro 5. ANOVA. Contraste del efecto de la metodología y su interacción con la zona.

ANOVA. Contrast of the effect of methodology and its interaction with the zone.

Variable	Factor	g.l.	MC	F	P-valor
Número de sumideros	Metodología	1	625,00	28,14	0,000 **
	Metodología / Zona	1	2,25	0,10	0,756 ^{NS}
Longitud total de los sumideros	Metodología	1	92,12	11,14	0,006 **
	Metodología / Zona	1	6,26	0,76	0,399 ^{NS}
Anchura total de los sumideros	Metodología	1	134,260	24,89	0,000 **
	Metodología / Zona	1	5,01	0,93	0,354 ^{NS}
Distancia media entre sumideros	Metodología	1	47,99	9,70	0,009 **
	Metodología / Zona	1	4,01	0,81	0,386 ^{NS}
Promedio del número de sumideros	Metodología	1	2,90	16,26	0,002 **
	Metodología / Zona	1	0,10	0,57	0,466 ^{NS}
Promedio de longitud	Metodología	1	0,83	14,31	0,003 **
	Metodología / Zona	1	0,08	1,31	0,275 ^{NS}
Promedio de anchura	Metodología	1	1,05	18,69	0,001 **
	Metodología / Zona	1	0,10	1,70	0,216 ^{NS}

NS = no significativo ($P > 0,05$), * Significativo al 5%, ** Altamente significativo a 1%.

emplea la metodología bidimensional o superficial. Pero estas diferencias son independientes de la zona (A o B) en que se tomen las medidas.

Por lo tanto, se puede concluir que, desde el punto de vista estadístico, es mejor la realización del muestreo mediante la metodología bidimensional, es decir, realizando transectos superficiales de 50 m x 4 m = 200 m², que la simple realización de transectos lineales de 50 m de longitud, y todo ello independientemente de la localización en donde se lleve a cabo el muestreo.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que en todas las variables se han encontrado diferencias altamente significativas entre el método de muestreo original (lineal o unidimensional) y el propuesto como mejora (superficial o bidimensional), generando, como es lógico, valores medios mayores cuando se emplea este último método, siendo estas diferencias independientes de la zona de muestreo.

Por otro lado, con los resultados estadísticos obtenidos se puede afirmar que la aplicación de ambas metodologías es independiente de la zona en la que se desarrolle el muestreo, así como de la mayor o menor funcionalidad ecológica. Por ello, es posible su aplicación en cualesquiera laderas semiáridas de pendiente moderada, para evaluar el estado de degradación del terreno y su capacidad o potencialidad de restauración.

Los resultados obtenidos de la aplicación del método a laderas con vegetación cercana a la clímax, en nuestro caso monte bajo abierto de encinas, con escasa cubierta arbustiva y subarbustiva, no son todo lo positivos que cabría esperar de una ladera en una situación funcional; ya que al aplicar la metodología, estos pies de encina se presentan como poco eficientes respecto a la captura del agua y nutrientes, debido fundamentalmente a su morfología y escaso diámetro, oponiendo poca resistencia al flujo.

Para la aplicación de esta metodología de una forma más eficiente, es necesario sistematizar el método, estableciendo unos modelos de ladera con su vegetación asociada y con diversas densidades y estructuras, asignando unos valores medios de los parámetros indicadores más útiles para evaluar la degradación, como son: el nº sumideros/10m, anchura de sumideros/10 m, nº sumideros/m², anchura de sumideros/m² y distancia media entre sumideros, tanto para situaciones disfuncionales como funcionales, y de esa forma poder realizar comparaciones.

Resulta útil la comparación de los valores de los mencionados parámetros con los valores obtenidos en otras laderas degradadas, para tener una valoración de la degradación y de la funcionalidad ecosistémica de la ladera en estudio. Es, asimismo, muy útil la comparación de los resultados de los parámetros citados con los de laderas con vegetación natural similar a la vegetación potencial de la ladera degradada, y con la misma ladera, pero suponiendo un diseño de sistematización para proceder a su restauración.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

JMM diseñó la investigación. JLAS realizó el trabajo de campo y el análisis estadístico. JMM y JLÑAS escribieron y revisaron el manuscrito original y redactaron la versión definitiva.

FINANCIAMIENTO

Esta investigación no ha recibido financiación externa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Católica de Ávila su apoyo para llevar a cabo este estudio.

REFERENCIAS

- Berdugo, M., Kéfi, S., Soliveres, S., & Maestre, F. T. (2017). Plant spatial patterns identify alternative ecosystem multifunctionality states in global drylands. *Nature Ecology & Evolution*, 1, 003. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-016-0003>
- Dowo, G. M., Kativu, S., & Tongway, D. J. (2013). Application of ecosystem function analysis (EFA) in assessing mine tailings rehabilitation: An example from the Mhangura Copper Mine tailings, Zimbabwe. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113, 923–930.
- Fuentes, D., Smanis, A., & Valdecantos, A. (2016). Recreating sink areas on semiarid degraded slopes by restoration. *Land Degradation & Development*, 28(3), 1005–1015. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2671>
- Humphries, R. N. (2016). Extended ecosystem function analysis—the next step for mine rehabilitation appraisals. In A. B. Fourie & M. Tibbett (Eds.), *Mine closure 2016*. Australian Centre for Geomechanics.
- IGME. (1982). *Mapa geológico de España, escala 1:50.000, Nava de Arévalo (481)*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Lacy, H. W. B., File, T., & Biggs, B. (2008). Ecosystem function analysis: Measuring and monitoring for mine closure and completion in Australia and abroad—1994 to 2008. In A. B. Fourie, M. Tibbett, & P. J. Weiersbye (Eds.), *Mine closure 2008*. Australian Centre for Geomechanics.
- Ludwig, J., Tongway, D., Freudenberger, D., Noble, J., & Hodgkinson, K. (Eds.). (1997). *Landscape ecology: Function and management*. CSIRO.
- Martínez de Azagra, A., Mongil, J., del Río, J., & Rojo, L. (2006). Conceptos, modelos y ejemplos sobre oasisificación. *Ecología*, 20, 453–470.
- Mayor, A. G., Bautista, S., & Bellot, J. (2009). Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(12), 1702–1711. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1875>
- Merino-Martín, L. (2010). *Ecología de laderas restauradas de la minería de carbón a cielo abierto: Interacciones ecológicas* (Tesis doctoral). Universidad de Alcalá de Henares.
- Mongil, J. (2003). Evaluación de zonas semiáridas degradadas a partir de la ecología del paisaje. El caso de dos laderas de la cuenca del Duero. *Abula, Miscelánea de la Universidad Católica de Ávila*, 3, 251–257.

- Oyarzábal, J. A. (2013). *Aplicación del método Landscape Function Analysis (LFA) para evaluar el estado de las restauraciones mineras: El caso de la minería de carbón a cielo abierto en Utrillas (Teruel)* (Trabajo de fin de grado). Universidad de Zaragoza.
- Randall, J. (2004). Ecosystem function analysis: A tool for monitoring mine-site rehabilitation success. *MESA Journal*, 35, 24–27.
- Ruiz-Jaen, M. C., & Aide, T. M. (2005). Restoration success: How is it being measured? *Restoration Ecology*, 13(3), 569–577. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00072.x>
- Thompson, S. A., & Thompson, G. G. (2004). Adequacy of rehabilitation monitoring practices in the Western Australian mining industry. *Ecological Management & Restoration*, 5(1), 30–33. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1442-8903.2004.00172.x>
- Tongway, D. (2003). *Reading the landscape: A training course in monitoring rangelands by landscape function analysis*. CSIRO.
- Tongway, D., Barnett, G., Kearns, A., & Hindley, N. (1998). Developing success indicators for minesite rehabilitation. *The Australian Coal Review*, April, 56–59.
- Tongway, D. J., & Hindley, N. L. (2003). *Indicators of ecosystem rehabilitation success. Stage two: Verification of EFA indicators* (Final Report). CSIRO.
- Tongway, D. J., & Hindley, N. L. (2004). *Landscape function analysis: Procedures for monitoring and assessing landscapes, with special reference to minesites and rangelands*. CSIRO.
- Tongway, D. J., & Ludwig, J. A. (2006). Assessment of landscape function as an information source for mine closure. In A. Fourie & M. Tibbett (Eds.), *Proceedings first international seminar on mine closure*. Australian Centre for Geomechanics.
- Tongway, D. J., Cortina, J., & Maestre, F. T. (2004). Heterogeneidad espacial y gestión de medios semiáridos. *Ecosistemas*, 13(1), 2–15.
- Urgeghe, A. M., & Bautista, S. (2014). Size and connectivity of upslope runoff-source areas modulate the performance of woody plants in Mediterranean drylands. *Ecology*, 8(7), 1292–1303. DOI: <https://doi.org/10.1002/eco.1582>

Recibido: 25.11.2024

Aceptado: 28.06.2025

MATERIAL COMPLEMENTARIO

Cuadro C1: Transectos y superficie muestreados, por zona y método.

Transects and sampled surface area, by zone and method.

	Método unidimensional		Método bidimensional		Total
	Número transectos	Longitud total muestreada (m)	Número transectos	Superficie total muestreada (m ²)	Número transectos
Zona A (Blasconsancho)	4	200	4	800	8
Zona B (Maello)	4	200	4	800	8
Total	8	400	8	1600	16

Cuadro C2. Bondad de ajuste al modelo normal de Gauss. Variables por zona y metodología.

Goodness of fit to the Gaussian normal model. Variables by zone and methodology.

Zona/método	Estadístico	Nº sumideros	Longitud	Anchura	Distancia media	Promedio sumideros	Promedio longitud	Promedio anchura
A	Asimetría	0,631	1,049	0,580	0,008	0,687	1,542	1,085
	Curtosis	-0,956	0,300	-0,967	-1,632	-1,260	1,807	-0,046
	Test SW: p-sig	0,321 ^{NS}	0,321 ^{NS}	0,532 ^{NS}	0,598 ^{NS}	0,155 ^{NS}	0,023 [*]	0,070 ^{NS}
B	Asimetría	0,242	0,197	-1,74	2,014	1,382	0,788	1,099
	Curtosis	-1,705	-1,704	-1,419	4,361	1,430	-1,269	-0,344
	Test SW: p-sig	0,267 ^{NS}	0,511 ^{NS}	0,659 ^{NS}	0,009 ^{**}	0,037 [*]	0,031 [*]	0,009 ^{**}
Lineal	Asimetría	-0,057	1,699	0,559	2,049	0,191	1,555	0,561
	Curtosis	-0,800	2,940	0,354	5,091	-1,541	2,663	0,344
	Test SW: p-sig	0,849 ^{NS}	0,055 ^{NS}	0,953 ^{NS}	0,014 [*]	0,427 ^{NS}	0,116 ^{NS}	0,952 ^{NS}
Superficial	Asimetría	-0,539	1,490	1,037	1,140	0,822	1,495	0,426
	Curtosis	0,543	1,278	-0,269	2,300	-1,364	1,242	1,577
	Test SW: p-sig	0,543 ^{NS}	0,022 [*]	0,112 ^{NS}	0,317 ^{NS}	0,032 [*]	0,010 [*]	0,434 ^{NS}

NS = no significativo $P > 0,05$ Buen ajuste; * = significativo $P < 0,05$ desvío leve; ** = significativo $P < 0,01$ desvío grave

Cuadro C3. Estadísticos descriptivos. Variables por zona.

Descriptive statistics. Variables by zone.

Zona	Estadístico	Nº sumideros	Longitud	Anchura	Distancia media	Promedio sumideros	Promedio longitud	Promedio anchura
A	Media	12,63	6,22	6,98	4,21	0,84	0,34	0,37
	IC 95%: límite inferior	5,56	2,13	3,08	2,66	0,25	0,00	0,00
	IC 95%: límite superior	19,69	10,32	10,88	5,76	1,44	0,70	0,73
	Error típico de la media	2,99	1,73	1,65	0,66	0,25	0,15	0,16
	Mediana	9,00	5,05	5,75	4,32	0,49	0,14	0,18
	Mínimo	2,00	1,00	1,40	1,82	0,04	0,02	0,003
	Máximo	26,00	15,30	14,40	6,80	2,00	1,24	1,180
	Rango	24,00	14,30	13,00	4,98	1,96	1,22	1,177
	Desviación típica	8,45	4,89	4,66	1,85	0,71	0,43	0,44
	Varianza	71,41	23,95	21,73	3,44	0,51	0,19	0,19
	Coefficiente de variación	66,90	78,62	66,76	43,94	84,52	126,47	118,92

	Media	11,63	3,30	4,28	5,30	0,44	0,19	0,21
	IC 95%: límite inferior	5,35	1,59	2,01	2,35	0,04	0,02	0,00
	IC 95%: límite superior	17,90	5,00	6,56	8,26	0,83	0,35	0,43
	Error típico de la media	2,65	0,72	0,96	1,25	0,17	0,07	0,09
	Mediana	11,50	3,12	4,44	3,84	0,23	0,09	0,04
B	Mínimo	3,00	0,75	0,24	2,57	0,08	0,02	0,030
	Máximo	23,00	6,27	7,88	13,30	1,40	0,49	0,680
	Rango	20,00	5,52	7,64	10,73	1,32	0,47	0,650
	Desviación típica	7,50	2,04	2,72	3,53	0,47	0,20	0,26
	Varianza	56,27	4,16	7,41	12,47	0,22	0,04	0,07
	Coefficiente de variación	64,49	61,82	63,55	66,60	106,82	105,26	123,81

Cuadro C4. Estadísticos descriptivos. Variables por metodología.

Descriptive statistics. Variables by methodology

Metodología	Estadístico	Nº sumideros	Longitud	Anchura	Distancia media	Promedio sumideros	Promedio longitud	Promedio anchura
	Media	5,88	2,36	2,74	6,49	1,07	0,49	0,55
	IC 95%: límite inferior	3,62	0,87	1,26	4,01	0,55	0,20	0,26
	IC 95%: límite superior	8,13	3,85	4,21	8,97	1,58	0,78	0,84
	Error típico de la media	0,95	0,63	0,62	1,05	0,22	0,12	0,12
	Mediana	6,50	1,85	2,52	5,96	1,10	0,42	0,50
Lineal	Mínimo	2,00	0,75	0,24	3,60	0,34	0,15	0,050
	Máximo	10,00	6,20	5,90	13,30	2,00	1,24	1,180
	Rango	8,00	5,45	5,66	9,70	1,66	1,09	1,130
	Desviación típica	2,70	1,78	1,76	2,96	0,61	0,35	0,35
	Varianza	7,23	3,18	3,11	8,78	0,38	0,12	0,12
	Coefficiente de variación	45,92	75,42	64,23	45,61	57,01	71,43	63,64
	Media	18,38	7,16	8,53	3,03	0,22	0,04	0,04
	IC 95%: límite inferior	13,67	3,75	5,75	2,21	0,06	0,02	0,02
	IC 95%: límite superior	23,08	10,57	11,30	3,84	0,38	0,05	0,05
	Error típico de la media	1,99	1,44	1,17	0,34	0,07	0,08	0,01
	Mediana	17,50	5,78	7,24	3,06	0,10	0,03	0,03
Superficial	Mínimo	8,00	3,90	5,50	1,82	0,04	0,02	0,003
	Máximo	26,00	15,30	14,40	5,04	0,52	0,08	0,072
	Rango	18,00	11,40	8,90	3,22	0,48	0,06	0,069
	Desviación típica	5,63	4,08	3,32	0,98	0,19	0,02	0,02
	Varianza	31,70	16,66	11,01	0,96	0,04	0,00	0,00
	Coefficiente de variación	30,63	56,98	38,92	32,34	86,36	50,00	50,00

