



Ratio LE para el ajuste de perfiles longitudinales en cursos fluviales de montaña. Aplicación a la cuenca del río Almáchar (Málaga, España)

*LE rate to adjust longitudinal profiles on mountain fluvial courses.
Application on Almáchar river (Malaga, Spain)*

Rodrigo-Comino, J.^(1 2), Senciales-González, J.M.⁽²⁾

(1) Departamento de Geografía Física, Universidad de Trier. Behringstraße, Campus II,
C.P. 54296, Trier, Alemania (geo.jrc@gmail.com).

(2) Departamento de Geografía, Universidad de Málaga, Málaga, España.

Resumen

La ratio LE (Logarítmica exponencial) puede ser una herramienta geomorfológica eficaz para ajustar perfiles longitudinales de cuencas fluviales montuosas de pequeña extensión. Debe ser aplicada utilizando la altitud como variable independiente. Para el río Almáchar de la provincia de Málaga (España), con elevadas pendientes y una vocación agrícola fundamentalmente vitivinícola, se ha conseguido un ajuste final de $R^2=0,96$. Estos cálculos permiten detectar y cuantificar en qué intervalos se han producido anomalías o rupturas (knickpoints) de origen geomorfológico y/o geológico. Para este caso, los tramos con mayores diferencias entre el perfil real y el ajustado fueron los intervalos de altitud comprendidos entre 200-300 m y mayores a 500 m.s.n.m. Los resultados muestran una correlación directa entre la disminución de las anomalías con la aparición de vegetación natural (0,86), y un aumento de ellas con el incremento de los cultivos de la vid y la construcción de caminos.

Palabras clave: Ratio LE; río Almáchar; perfil longitudinal; topografía; usos del suelo.

Abstract

To adjust longitudinal profiles of little hilly fluvial streams, the LE ratio (exponential logarithmic) can be a useful geomorphological tool. It should be applied using height as independent variable. $R^2=0.96$ has been the final adjusted for the Almáchar River (Málaga, Spain), which is characterized by elevated slopes along large extensions of conventional vineyards. Furthermore, anomalies or ruptures (knickpoints) with different geomorphological and geological origins were detected and quantified. For this case, the intervals of heights with the most differences between the real and the adjusted profile were noted between 200-300 m and



more than 500 m.a.s.l. The results showed a direct correlation between the decreasing of the anomalies with geomorphological origin and the natural vegetation extensions (0.86), and an increasing generated by the expansion of the vineyards and constructions of roads.

Key words: LE ratio; Almáchar River; longitudinal profile; topography; land uses.

1. Las cuencas fluviales y el perfil longitudinal

La red fluvial se articula en forma de esqueleto a través del paisaje que observamos (Antón *et al.*, 2014). Sus marcas en el territorio plasman los principales cambios inducidos por la actividad tectónica, la variabilidad climática (Whipple, 2004) y la actividad del ser humano durante el holoceno. Estas sucesiones e inestabilidades son el resultado de la competencia entre fuerzas de diferente intensidad y procedencia, que están en continua evolución (Willet *et al.*, 2001; Scotti *et al.*, 2014).

W.M. Davis propuso en 1899 el Ciclo Geográfico y la Teoría del Perfil de Equilibrio de los ríos (Davis, 1909, 1932). Este concepto habría podido ser aplicado a todos los cursos de agua que fluyen a través de las cadenas de plegamiento alpinas si la intervención de los movimientos tectónicos en su evolución no fuera, en ocasiones, tan determinante (Radoane *et al.* 2003; Monteiro *et al.*, 2010; Demoulin, 2011).

A pesar de esta afirmación, actualmente tampoco existe una argumentación climática, hidrogeológica, geomorfológica o ingenieril precisa que aclare las causas únicas del desarrollo de la red de drenaje en dichos medios montañosos, afectados o no por el ser humano (Allen, 2008; Strak *et al.*, 2011; Scotti *et al.*, 2014).

La morfometría, en general, estudia las “formas y dimensiones del terreno a partir de la aplicación de procedimientos matemáticos que sirven para su estudio y catalogación” (Pedraza Gilsanz, 1996; Gosálvez *et al.* 2009). Según Bates y Jackson (2003) el análisis de las marcas concretas de tipo geomorfológico de

la superficie de la Tierra podría servir para cuantificar procesos y obtener conclusiones sobre la evolución de los ríos y su actual recorrido. Por lo tanto, entender estos cambios generados sobre las laderas a lo largo de un perfil longitudinal, podría mostrar con precisión áreas de acumulación o aceleraciones provocadas por las variaciones de la pendiente, los cambios litológicos o estructurales y, por consiguiente, la evolución del paisaje percibido. Sin duda, una herramienta poderosa e interesante desde el punto de vista del conocimiento científico (Capó y García, 2014).

Numerosos autores han abordado el estudio de los perfiles longitudinales de los ríos para este cometido y difieren en que tenga cualquier similitud la línea obtenida con una teórica curva semilogarítmica (Chen *et al.*, 2006; Vágó, 2010). De esta forma, la mayoría de corrientes de corto recorrido mostrarían perfiles cóncavos que, teniendo en cuenta una serie de variables dependientes e independientes, podrían llegar a ajustarse a ecuaciones de tipo logarítmico o exponencial logarítmico (Morisawa, 1985).

Tradicionalmente, el método más utilizado ha sido la ecuación de Hack sobre medios naturales (1957, 1973, 1975), siendo la base para la creación de algunas modificaciones publicadas recientemente según el ámbito estudiado (Chen *et al.*, 2006; Vágó, 2010). Dicho modelo fue aplicado para comprender las diversas relaciones (parciales) entre la altura (variable dependiente) y la longitud (variable independiente). El índice propuesto se denominó “SL”. Dicha ratio debe entenderse como la “diferencia entre la altitud de dos puntos en el perfil, dividida por la resta entre los logaritmos naturales de las longitudes en ese mismo punto (Hack, 1957)”.

Por otra parte, otro de sus objetivos fue determinar las anomalías o cambios producidos en el perfil conforme variaba la litología, ligada a las relaciones entre la pendiente, la carga y el volumen del caudal de la corriente. Más adelante, Hack simplificaría este índice de tal modo que fuera medida la longitud de la corriente desde la divisoria, utilizando la diferencia en elevación de cada tramo, dividido por la longitud del mismo (Hack, 1973). Sin embargo, cuando se analiza un terreno con numerosas evidencias de influencias neotectónicas o con contrastados pulsos erosivos (de origen antrópico o natural) en los perfiles longitudinales (Whipple, 2001; Castillo y Lugo-Hubb, 2011; Troiani y Della Seta, 2008, 2011), la cuestión sería por qué debe ser la longitud la variable independiente.

La longitud de un río puede estar influenciada por cambios en el nivel del mar, por la erosión remontante, por el efecto de una falla, por el cambio en la altura del relieve o, simplemente, la construcción de una presa (en este caso, variable independiente). De esta forma, al abordar el análisis de un perfil longitudinal, también sería pertinente ajustar dicha ecuación aplicando la longitud como variable dependiente y la altitud como independiente, teniendo en cuenta después los elementos del territorio por los que fluye el cauce. Dichas convexidades o anomalías de origen geomorfológico que quedarían en resalte en relación al ajuste del perfil, serían definidas como “rupturas”, o “knickpoints” (Penck, 1924; Gardner, 1983; Castillo y Lugo-Hubb, 2011; Troiani y Della Seta, 2008, 2011; Whipple *et al.*, 2011).

Para su localización concreta en el territorio, los Sistemas de Información Geográfica se presentan como una herramienta fundamental (Chen *et al.*, 2006). Además, a través de diferentes módulos de análisis espacial como la *crostabulación*, los *buffers*, o el *Land Change Modeller* (Paegelow *et al.*, 2004; Galacho y Arrebola, 2008; Alonso *et al.* 2010; Rodrigo Comino *et al.*, 2014) también sería pertinente poder correlacionar tramos de los cauces con diferentes tipos de usos del suelo, litologías,

tipos de mantos edáficos o gradientes climáticos específicos.

De forma general, desde el punto de vista de la geografía física y, más concretamente, desde la hidrogeografía, se pretende mostrar en este trabajo el desarrollo de un nuevo ajuste longitudinal del perfil de un curso fluvial como herramienta para comprender el comportamiento actual de un territorio condicionado (o no), por los usos actuales del suelo y por su topografía (altitud y pendientes).

Para este trabajo, se ha seleccionado una cuenca experimental de pequeño tamaño, con elevadas tasas de erosión y una actividad agrícola ligada al viñedo desde hace siglos (Navarro Rodríguez y Larrubia Vargas, 2008). Se parte de una zona montuosa en la provincia de Málaga, dentro de la comarca de la Axarquía (área oriental de la provincia): el río Almáchar.

De forma específica, por un lado, se llevará a cabo el estudio del perfil longitudinal de dicho río con el uso de la altitud como variable independiente y la longitud como dependiente para generar una función de ajuste. Este índice ha sido denominado como *ratio LE* (logarítmico exponencial). Por otra parte, se pretende aplicar para: i) observar las áreas de aceleración y acumulación de sedimentos en el curso, ii) detectar sus anomalías o rupturas, iii) correlacionar dichos “knickpoints” según el tipo de uso del suelo actual y sus características topográficas.

2. Material y métodos

2.1. Área de estudio

Se ha optado para este estudio utilizar el curso del río Almáchar (Fig. 1), tributario del Vélez cuya red ha sido ampliamente estudiada con anterioridad (Perles Roselló y Senciales, 1994; Senciales y Perles, 1994; Senciales, 1995, 1996; Senciales y Malvárez, 2003). Dicha subcuenca ha sido delimitada con un área experimental de 6,64 km² y seleccionada por

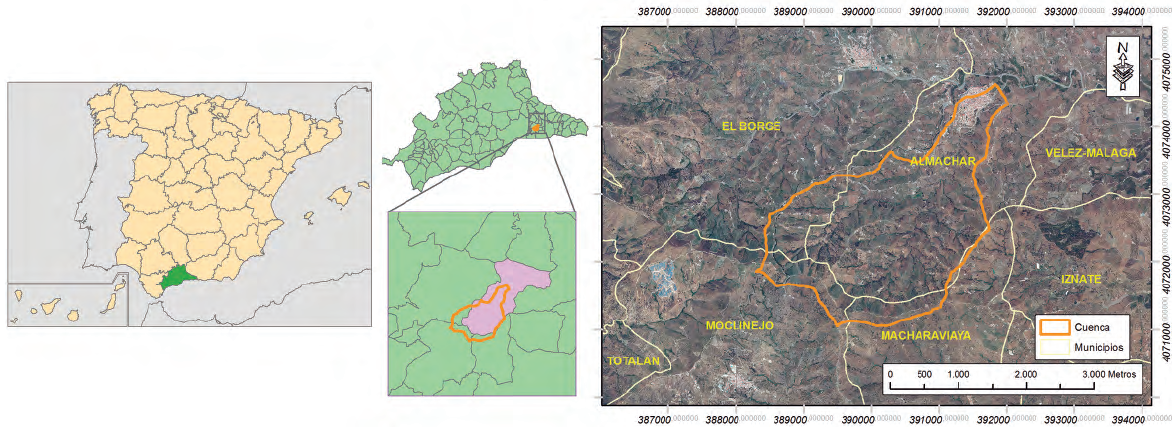


Figura 1: Localización de la cuenca del río Almáchar.

Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Hoja 1053. Elaboración propia.

Figure 1: Localization of the Almáchar river

Source: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Data sheet 1053. Own elaboration.

la existencia de cartografía, datos y bibliografía completa al respecto.

Posee un sentido W-E y se enmarca en un área sobre fuertes pendientes (21-47%), con un uso agrícola (Tabla 1 y Fig. 2), predominantemente vitivinícola (34% de la superficie), y de forma semi-extensiva de olivar y/o almendro, con matorral xerófilo tras ser abandonado el terreno (47%). Recientemente, algunas laderas que habían sido roturadas por su baja rentabilidad, han vuelto a ser activas con el emplazamiento de cultivos subtropicales como el aguacate (*Persea americana*) o el mango (*Mangifera indica*). Ligadas a ellas, durante el último siglo se ha generado una red de caminos (sin y con asfalto) indispensable para interconectar tanto el núcleo principal de población (Almáchar), como los numerosos lagares, con sus paseros, albercas y acequias (6% del área de estudio). Todo ello generará que conforme avance el tramo del río, se puedan observar distintos procesos ero-

sivos en las laderas, influyentes en su perfil final. En la actualidad, solo se observa un 10% de cobertera de vegetación natural asociada a superficies donde el actual cauce del río y sus torrentes todavía fluyen de forma espasmódica.

La cuenca del río Almáchar se inscribe con una forma dendrítica o subdendrítica dentro de dos líneas de divisorias de aguas: por el norte un promontorio alomado que, desde la confluencia con el río Benamargosa, a 48 m.s.n.m. de altitud, asciende hasta el monte Santopitar, a 1020 m.s.n.m., pasando por el monte Carrión (756 m.s.n.m.), y que separa a esta cuenca de las de otros tributarios del Benamargosa (Senciales, 1991 y 1995). Por el sur, otro promontorio alomado, alineado de este a oeste, semejante al anterior, con alturas similares y convergiendo también en el monte Santopitar (pasando por el cerro de Córdoba, 730 m.s.n.m.), separa la cuenca del río Almáchar de cauces que vierten directa-

Tabla 1: Porcentaje de tipos de usos del suelo de la cuenca del río Almáchar.

Table 1: Percentage of the types of land uses in the Almáchar river.

	Asfaltado	Caminos	Cauce	Lagar	Semiabandonado y/o semi-extensivo de secano	Urbanizado	Vegetación natural	Vid	Total
has	4,2	20,7	3,1	14,6	314,9	16,4	64,6	226,3	664,7
%	0,6	3,1	0,5	2,2	47,4	2,5	9,7	34	100

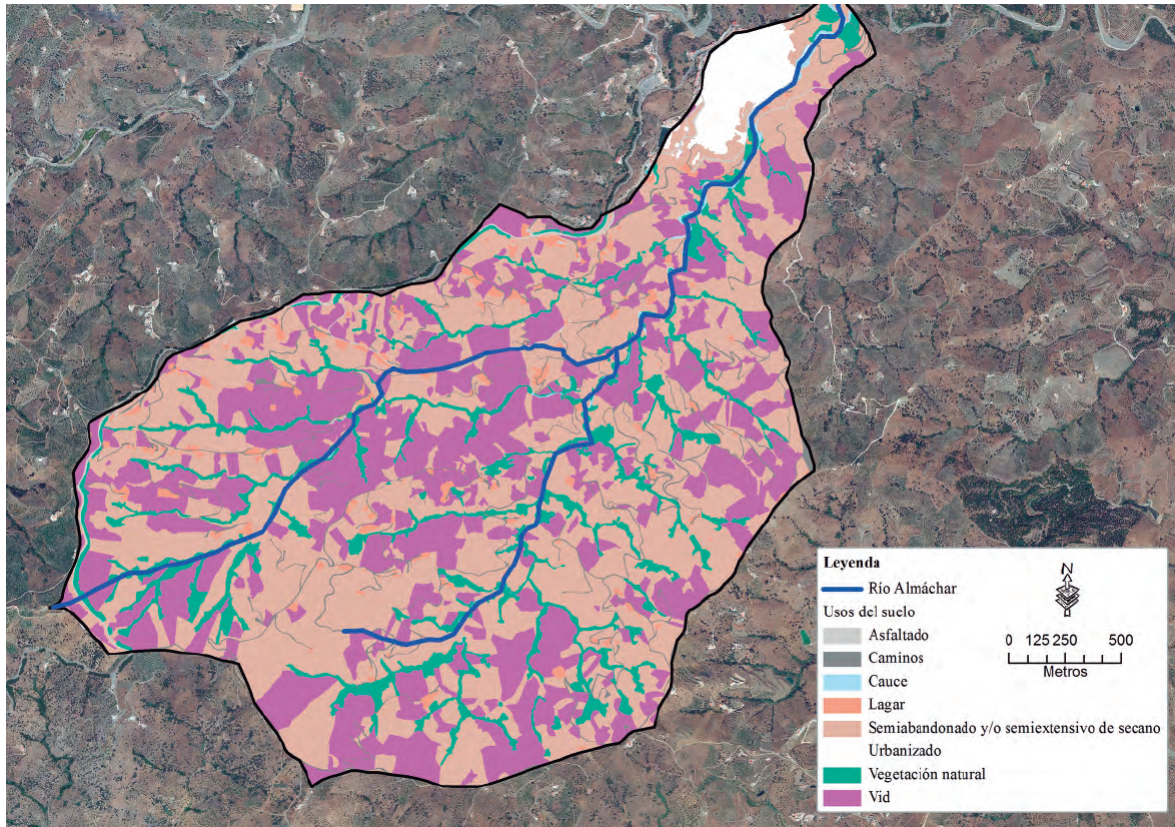


Figura 2: Mapa de usos del suelo actuales de la cuenca del río Almáchar.
Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Hoja 1053. Elaboración propia.

Figure 2: Map of actual land uses of the Almáchar river.
Source: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Data sheet 1053. Own elaboration.

mente al mar. Geológicamente, su situación se enmarca dentro de la unidad fisiográfica de los Montes de Málaga, con la predominancia de materiales antiguos de origen precámbrico y paleozoico fuertemente metamorfizados, como las filitas, esquistos o cuarcitas (Senciales y Rodrigo Comino, 2011). A lo largo del curso, materiales de origen cuaternario como arcillas y arenas son transportados junto con los anteriores erosionados cada vez que se origina un episodio lluvioso (Perles Roselló y Senciales, 1994; Senciales y Perles Roselló, 1994).

2.2. Diseño del ratio LE

El punto de inicio de esta investigación, parte de los supuestos teóricos desarrollados por

Green (1934), Shulits (1941) y Hack (1957) sobre perfiles longitudinales:

$$(1) x = e^{-y}$$

$$(2) y = e^{-ax}$$

$$(3) SL = \frac{H1 - H2}{\ln L2 - \ln L1}$$

Para la ecuación de Green x significaría la distancia desde la desembocadura, y la elevación y e la base de los logaritmos aplicados. Respecto a la propuesta de Shulits x , e y tendrían igual significado que en la ecuación de Green, siendo a un coeficiente de abrasión obtenido de forma empírica. Finalmente, en el índice de Hack se emplea L como la longitud de la corriente desde la divisoria y H equivaldría a la diferencia de elevación del tramo o sección.

Para esta nueva aportación, la inclinación de la pendiente del perfil, como consecuencia de la altitud de partida de cada sección del río, será la variable utilizada que hará depender la mayor o menor potencia y energía del agua durante su curso (que puede o no transportar sedimentos). Por consiguiente, dicha hipótesis variaría por completo la composición de la ecuación de los índices ya propuestos. Para cuencas de reducido tamaño y con laderas escarpadas, el modelo debe acercarse más a uno de tipo lineal (sin llegar a serlo). Así, con una curva de tipo logarítmico eso no sería del todo posible. Es importante resaltar que la precisión alcanzada debe superar un $R^2=0,95$, para que el modelo teórico sea más sensible ante las variaciones reales del curso de agua estudiado.

La ecuación propuesta toma la idea de expresión exponencial enunciada por Green (1934) y Shulits (1941) y los modelos logarítmicos de Hack (1973) anteriormente citados:

$$(4) y = a+(-c*(\text{Log}x)^b)$$

Debe indicarse que y es igual a la longitud total de la corriente medida en metros, x la altura absoluta en un punto del cauce cuantificada de 10 en 10 m, y a , b y c son coeficientes empíricos de cada cuenca analizada. Para los cálculos, se ha utilizado los programas estadísticos SPSS 22 y SigmaPlot 13.

En primer lugar, al aplicar dichos modelos, se obtiene para ambas ecuaciones una correlación negativa entre x e y , y a partir de la intersección con el eje el valor de la constante a . A continuación, deben ser calculados los coeficientes experimentales b y c , que según la cuenca estudiada variará para hallar el máximo ajuste, igual que ocurre al calcular los índices para los caudales de los ríos (Dingman, 2008). El ajuste es manual y depende del nivel de correlación deseado y de la forma del cauce principal de la cuenca; así, cuencas muy próximas a la linealidad (muy prolongadas, o de dimensiones reducidas), muestran exponentes muy bajos (inferiores a 0,1) y constantes y coeficientes elevados (superiores a 10^4 o

10^4), en tanto que cuencas de morfología típicamente cóncava, suelen mostrar exponentes superiores a 1, coeficientes próximos al valor de la altura máxima y constantes próximas a la longitud total del cauce (Senciales, 2002). En este caso, al tratarse de una cuenca de reducido tamaño, el resultado final es una curva ajustada al perfil del río, pero con cifras negativas y valores muy bajos inicialmente, que dependerán de los coeficientes experimentales obtenidos (Fig. 3).

Finalmente, para invertir la curva y hacerla semejante al perfil longitudinal, cada resultado en cada tramo del río debe ser elevado a un logaritmo exponencial y así poder obtener el valor de x en el modelo teórico. La nueva curva permanecerá más próxima a la real y podrá ser representada de forma gráfica, con objeto de analizar las anomalías de origen geomorfológico. En el tabla 2, se aprecia el desarrollo de la formulación y en la figura 4 el resultado teórico esperado:

Tabla 2: Desarrollo del cálculo del ratio LE: $y = a+(-c*(\text{Log}x)^b)$. Fuente: Elaboración propia.

Table 2: Develop of the LE ratio calculation: $y = a+(-c*(\text{Log}x)^b)$. Source: Own elaboration.

$\text{Log}x^a * -c = y-a$
$\text{Log}x^a =$
$) = \text{Log} x$
$x = 10)$
$a-y = c*\text{log}x^b$
$= \text{log}x^b$
b
$((10^{y*a*b}) - 10)^2$
$** (((10^{(y/b)}) - 0,1) * (1,17)^{8,47})$

**Los valores de -0,1, 1,17 y 8,47 corresponden a coeficientes empíricos de ajuste para la calibración final del modelo.

2.3. Análisis de anomalías de una cuenca fluvial montuosa a partir la ratio LE

En primer lugar, se digitalizó el perímetro de la cuenca del río Almáchar y su curso principal. Partiendo del anterior desarrollo metodológico (2.2.), la ratio LE se aplicó para cada

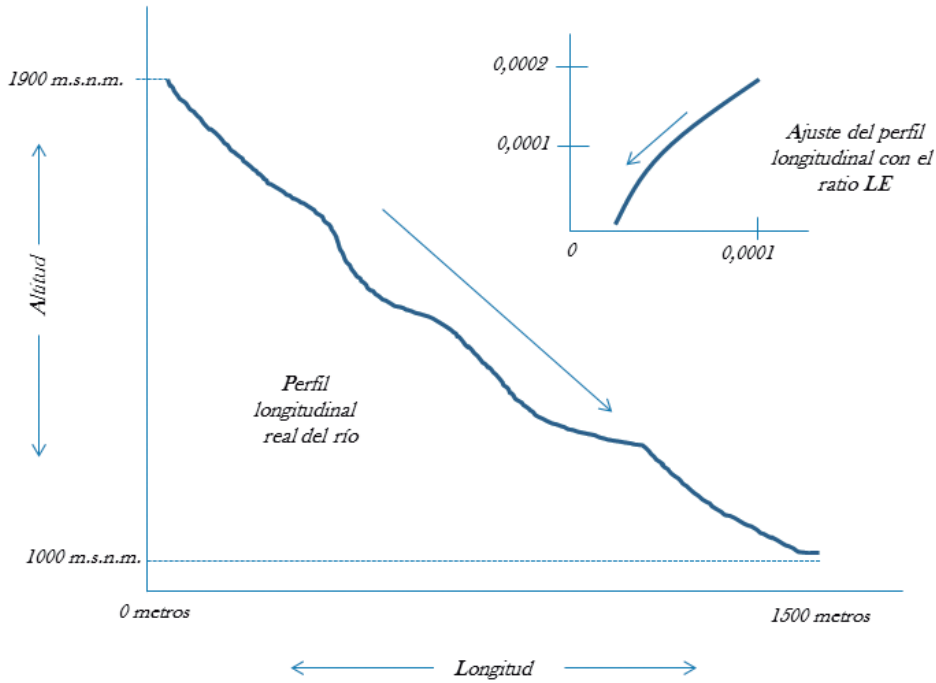


Figura 3: Esquema del cálculo del ajuste de la ecuación al perfil longitudinal de un río. Fuente: Elaboración propia.
 Figure 3: Scheme of the adjustment calculation equation for the longitudinal river profile. Own elaboration.

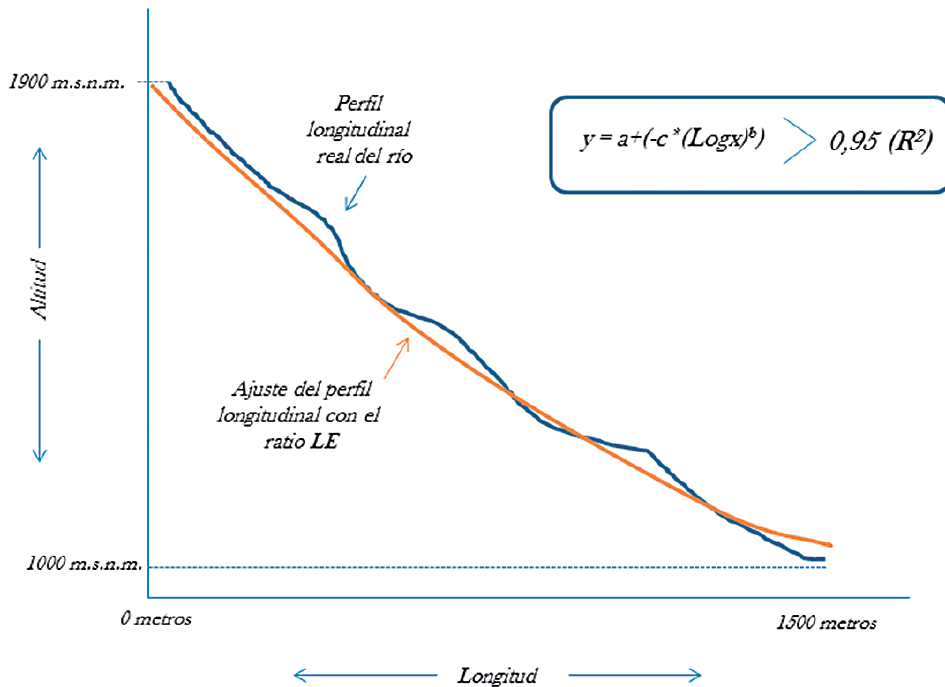


Figura 4: Esquema del ajuste final de la ecuación al perfil longitudinal de un río con el ratio LE. Fuente: Elaboración propia.
 Figure 4: Scheme of the final adjustment equation for the longitudinal river profile with the LE ratio. Source: Ownelaboration.

sección del río. Por lo tanto, dichos cálculos se realizaron en tramos de 10 metros de equidistancia para obtener una mayor precisión en los resultados. Se utilizó como base cartográfica el modelo digital de elevación del "Plan Nacional Aéreo de Ortofotografía" con el software ArcMap 10.2 (ESRI software). Dicha información espacial estaba compuesta por una capa en formato raster con extensión ASCII, con una malla de puntos de 25x25 metros y una proyección geodésica ETRS89 (<http://centrodedescargas.cnig.es>). Con esta resolución, debe aclararse que el posible error en el detalle del perfil queda asumido.

A continuación, se aplicó la ratio *LE* y se presentaron los ajustes logarítmicos exponenciales utilizados en forma de gráficas. Además, se consideró oportuno incluir el coeficiente de relación lineal de la cuenca (entre las variables reales de altitud y longitud) con objeto de demostrar su linealidad, que podría equivaler a los profundos niveles de excavación del perfil de una cuenca típica de montaña mediterránea.

Para analizar las anomalías, se procedió en primer lugar al cálculo de las diferencias entre el perfil longitudinal real del río y el ajustado, tanto por intervalos agrupados de 100 metros, como en sus promedios totales. También se calcularon los valores máximos y mínimos de esas diferencias, y la pendiente real y teórica del curso según los perfiles. Por último todas las variables fueron relacionadas con el factor de correlación de Pearson, con objeto de valorar si algunas de ellas estaban o no interrelacionadas.

A partir de aquí, se plantea otro desarrollo metodológico ligado a una posible hipótesis según la cual un uso del suelo de menor o nula cubierta vegetal puede tener como consecuencia un mayor encajamiento de la red en el tramo de cauce afectado directamente por ese uso. Ha de tenerse en cuenta que ambos procesos parten de escalas temporales diferentes. Como se ha mencionado anteriormente, el sustrato geológico está constituido por una litología susceptible a la erosión

hídrica, compuesta por pizarras y esquistos fuertemente metamorfozados, que ante un evento extremo o frente al manejo intensivo del suelo durante siglos, pueden provocar variaciones de la morfología fluvial y sufrir encajamiento o desarrollar nuevos cauces en la red de drenaje.

Se debe precisar, que es difícil asignar esta causa como factor principal del desfase entre perfil observado y esperado a los usos del suelo «actuales» para una red que puede haber estado operando miles de años. Sin embargo, en una primera aproximación se va a tratar de experimentar con dicha hipótesis a partir de sencillos cálculos paramétricos.

Con este fin, se digitalizó el mapa de usos del suelo de la cuenca con el software libre QGIS 2.8 a través de ortofotointerpretación directa con la imagen de la hoja 1053 más reciente (2013) editada por el Instituto Geográfico Nacional (<http://centrodedescargas.cnig.es>). Se prefirió hacer dicha acción en lugar de utilizar otras fuentes actuales también útiles como el SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España), las capas de usos de REDIAM (Red de Información Ambiental de Andalucía) o el Corine Land Cover, porque generalizaban demasiado los usos ligados a la vida.

Finalmente, se creó también un mapa de pendientes medidas en porcentajes siguiendo los intervalos establecidos por el SinambA (Sistema de Información Ambiental de Andalucía) ajustados para los medios mediterráneos: 0-3, 3-8, 8-16, 16-21, 31-31, 31-46, 46-76 y >76% (Moreira Madueño, 1991)

Seguidamente, se calcularon con el módulo de análisis espacial de ArcMap 10.2 una serie de áreas colindantes y paralelas (*buffers*) al cauce principal del río Almáchar. De forma aleatoria se tomaron de 25, 50 y 100 metros. Dicho fin, fue identificar qué cantidad de superficie de tipo de uso del suelo y pendientes podrían estar o no relacionadas con los intervalos del perfil donde se han encontrado mayores anomalías o diferencias entre

la curva ajustada y la real. Para terminar, de nuevo se aplica el coeficiente de correlación de Pearson. El objetivo, fue observar si alguno de esos usos aumentaba o disminuía según lo hacían las pendientes y, las diferencias entre el perfil real y el calculado por la ratio *LE*.

3. Resultados

3.1. Aplicación de la ratio *LE*

En primer lugar, se presentan los valores de longitud y altitud de la cuenca del río Almá-

char (Tabla 3). Se puede observar cómo el perfil posee un recorrido total de 5540,3 metros, partiendo desde los 620 m.s.n.m. hasta desembocar en los 165 metros. Además, cabe destacar cómo los tramos de medición se hacen cada vez más largos (mayor horizontalidad) a medida que el río se acerca a su fin. Desde la cabecera, el curso muestra una mayor verticalidad al descender en altitud en menos de 200 metros de recorrido 50 m.s.n.m. Aproximadamente hasta los 370 m.s.n.m., el cauce no comienza a descender en intervalos de 10 m.s.n.m. con longitudes de tramos superiores a 200 metros.

Tabla 3: Caracterización del perfil longitudinal de cada tramo del río Almáchar.
Table 3: Longitudinal profile characteristics along each part of the Almáchar river.

Cota	Longitud*	Long. Tramo**	Cota	Longitud*	Long. Tramo**
620	0	0	390	831,1	83,2
610	23,5	23,5	380	925,9	94,8
600	43	19,5	370	1063	231,9
590	57,4	14,4	350	1297,3	234,3
580	75,5	18,1	340	1415,3	118
570	92	16,5	330	1586	170,7
560	107,2	15,2	320	1761,3	175,3
550	125,2	18	310	1832,9	71,6
540	144	18,8	300	1980,4	147,5
530	165,8	21,8	290	2209,8	229,4
520	186,2	20,4	280	2379,2	169,4
510	210,5	24,3	270	2634	254,8
500	243,7	33,2	260	2725	91
490	276,9	33,2	250	2895,6	170,6
480	311,7	34,8	240	3119,3	223,7
470	360,5	48,8	230	3343,8	224,5
460	400,7	40,2	220	3572,3	228,5
450	443	42,3	210	3890	317,7
440	477,8	34,8	200	4138	248
430	528,1	50,3	190	4444,4	306,4
420	595,9	67,8	180	4873,6	429,2
410	670,3	74,4	170	5204,8	331,2
400	747,9	77,6	165	5440,3	235,5
Promedio	123 ±108,7	Máximo	429,2	Mínimo	14,4

* = Longitud acumulada de cada tramo del cauce medida en metros.

** = Longitud total de cada tramo medida en metros.

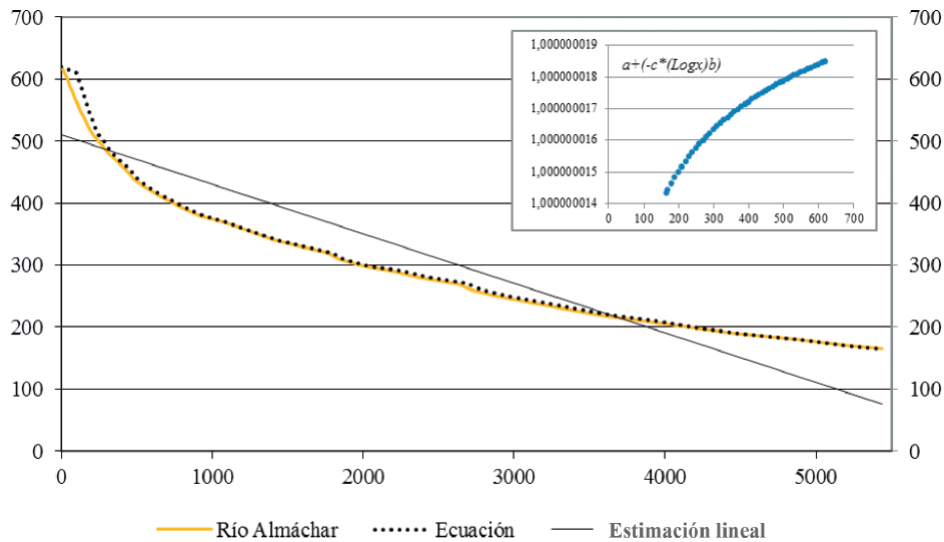


Figura 5: Perfil real, ajustado con el ratio LE y la estimación lineal.
 Figure 5: Adjusted real profile with the LE ratio and linear regression.

A continuación, se presenta el perfil comparado con la estimación lineal de los datos referidos a la longitud y las cotas, que proporcionará información sobre su linealidad (Fig. 5 y Tabla 4).

Como se extrae de los propios resultados, se puede apreciar que existe un ajuste final de 0,96 aplicando la fórmula de la ratio *LE* para el río Almáchar, frente al 0,86 que permite solo el R^2 de la estimación lineal. Se ha obtenido una recta ajustada que permite observar con exactitud qué puntos del curso real no corresponden a un comportamiento teórico geomorfológico acorde al que muestran los datos de altitud (utilizada como variable independiente).

3.2. Comparación entre los tramos del perfil real y el ajustado

Se han agrupado en tramos de 100 metros, excepto los superiores a 600 m.s.n.m. e inferiores a 200 m.s.n.m., que solo tienen 20 y 35 m respectivamente. Además se muestran las diferencias entre los promedios del perfil real y el ajustado, con los valores máximos y mínimos de cada intervalo, junto con el tramo total longitudinal sobre el que se han realizado las operaciones y su desnivel en grados (Tabla 5). Dicha información, es completada con un gráfico de cajas (Fig. 6) que permitirá observar también dónde se establecen las medianas, los valores extremos y la extensión de cada rango de datos de forma más visual.

Tabla 4: Valores de los ajustes obtenidos para el perfil longitudinal del río Almáchar.
 Table 4: Obtained adjustment values for the longitudinal profile of the Almáchar river.

Ajustes del perfil	Correlación múltiple	Punto de inicio	Coefficiente empírico	Ajuste final
$a+(-c*(\text{Log}x)b)$	-0,98	$1,29559 \times 10^{12}$	$1,8 \times 10^{-8}$	0,96
Estimación lineal ($y = -0,08x + 510,99$)	-0,93	5689,05	1	0,86

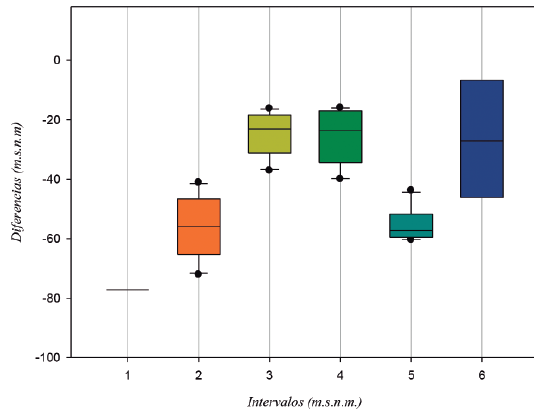


Figura 6: Diferencias en los intervalos del perfil real y el ajustado.

Figure 6: Differences between the intervals of the real and adjusted profile.

De los datos se extrae que el perfil actual del río está en todo momento por debajo del ajuste teórico, lo que viene a significar que la cuenca es de carácter erosivo o que tiende a excavar y no a sedimentar. El curso de agua posee sus mayores diferencias en los tramos cercanos a la cabecera (1 y 2, correspondientes a 620-500 m.s.n.m.) y en los intervalos comprendidos entre 300-200 m.s.n.m. (intervalo 5). Por otra parte, las secciones menos erosivas o que menos han excavado en el sustrato son las comprendidas entre 500-300 m.s.n.m. y la desembocadura (3, 4 y 6). Estos datos también coinciden con los mínimos y máximos valores absolutos de las diferencias. Las máximas divergencias giran en torno a 72,1 m y 60,4 m y

los valores mínimos entre 0,7 y 16 m. Respecto a la verticalidad de los tramos, al observar los resultados se aprecian los mayores desniveles en el inicio de la cuenca (muy cercanos a la vertical) hasta los 400 metros (intervalo 4), pasando desde un 136,7% del inicio en los primeros 23,5 m de longitud, hasta los 21,8%. Los menores descensos de la pendiente se dan a partir de los 300 metros de altitud, donde se llega a alcanzar casi un 5%.

Por último, se plantea buscar algún tipo de correlación existente entre cualquiera de las variables anteriormente estudiadas a través del coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 6).

Los mayores valores se encuentran en las correlaciones de las diferencias entre la curva real y ajustada, con los datos más alejados o mínimos (0,92) y próximos o máximos (0,91) a ella. Esta situación confirma que cuando el perfil real del río está más distante del modelo calculado con la ratio *LE*, también se observan tramos más irregulares con valores mínimos y máximos menos similares. Por otra parte, con unas correlaciones negativas (algo menores) aparecen el desnivel con la longitud (-0,81) y las diferencias del tramo analizado (-0,68). Por un lado, conforme el tramo tiene mayor longitud, la pendiente tiende a disminuir. Sin embargo, cuando las diferencias crecen entre el modelo teórico y el real, la pendiente también aumenta.

Tabla 5: Promedios de las diferencias entre el perfil longitudinal real y ajustado.

Table 5: Average of the differences between the real and adjusted longitudinal profile.

n	m.s.n.m.	Diferencias (m)	Mínimos (m)	Máximos (m)	Total longitud (m)	*D. Real (%)	**D.Teó. (%)
1	620-600	-77,3 ± -	-	-	23,5	136,7	20
2	600-500	-56,1 ± 10,4	-41,1	-72,1	1206,8	7,9	87,9
3	500-400	-24,7 ± 7,1	-16,3	-37,1	459,8	21,8	23,5
4	400-300	-25,6 ± 8,9	-16,0	-40,0	1257,4	7,7	7,9
5	300-200	-55,4 ± 5,4	-43,8	-60,4	2057,1	4,4	4,4
6	200-165	-26,6 ± 20,4	-0,7	-50,2	1550,3	2,1	2,1
\bar{x}	Total	-44,3±10,4	-23,6	-51,9	1092,5±738	30,1±52,7	21,8±32,3

* = D. Real: Desnivel de los tramos en el perfil real medida en porcentajes.

** = D. Teó: Desnivel de los tramos en el perfil teórico en porcentajes.

Tabla 6: Coeficiente de correlación de Pearson.

Table 6: Pearson product-moment correlation coefficient.

	Diferencias	σ	Mínimos	Máximos	Total long.	Desnivel (%)
Diferencias	-	0,36	0,92	0,91	0,27	-0,68
σ	0,36	-	0,68	-0,02	0,11	-0,48
Mínimos	0,92	0,68	-	0,72	-0,34	0,07
Máximos	0,91	-0,02	0,72	-	-0,51	0,50
Total long.	0,27	0,11	-0,34	-0,51	-	-0,81
Desnivel real (%)	-0,68	-0,48	0,07	0,50	-0,81	-

3.3. Anomalías sobre el perfil longitudinal según los tipos de usos del suelo y la topografía

En primer lugar, en las figuras 7 y 8 se presentan un bloque diagrama en tres dimensiones y un mapa que muestran las geometrías y los límites de las áreas seleccionadas. Posteriormente, se han calculado las superficies de cada tipo de uso del suelo y pendientes en

cada intervalo de altitud (Fig. 9), para poder observar el tipo de explotación que se lleva a cabo en cada sección del perfil longitudinal.

Al aumentar el tamaño de los distintos buffers, se aprecia lógicamente un aumento de la superficie ocupada de cada intervalo de pendientes y uso del suelo. En los tres gráficos y en cada intervalo se observa cómo el abandonado y/o semiextensivo de secano,

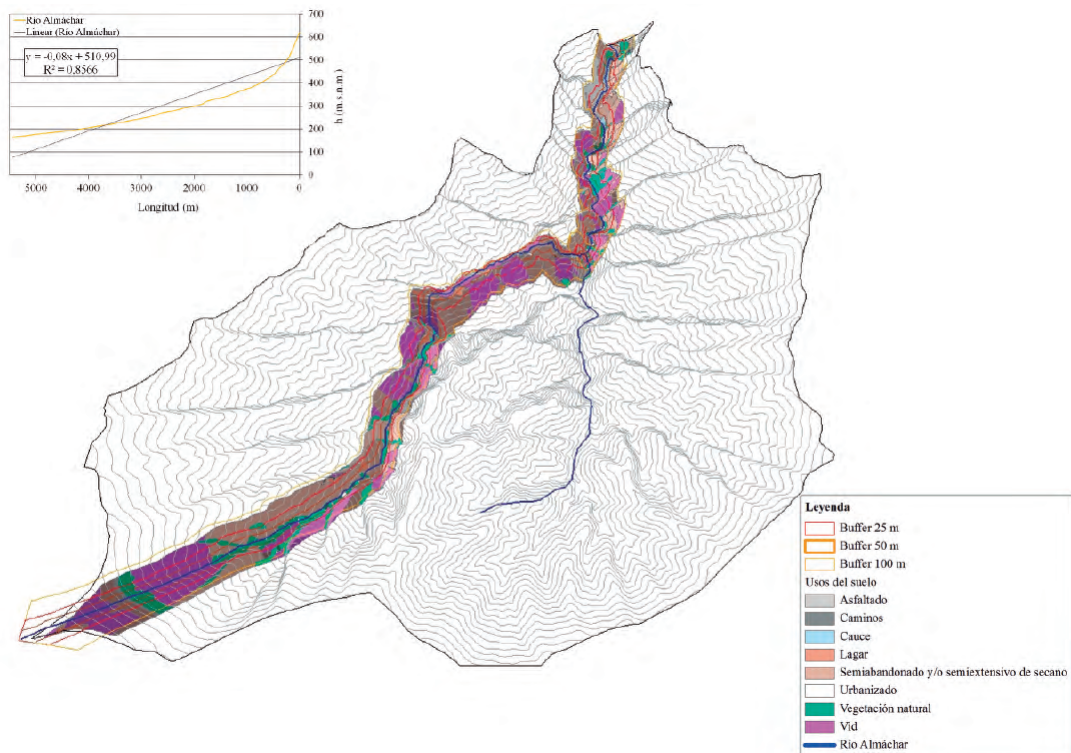


Figura 7: Representación esquemática de los buffers calculados y tipos de usos de suelo.

Figure 7: Schematic representation of the calculated buffers and types of land uses.

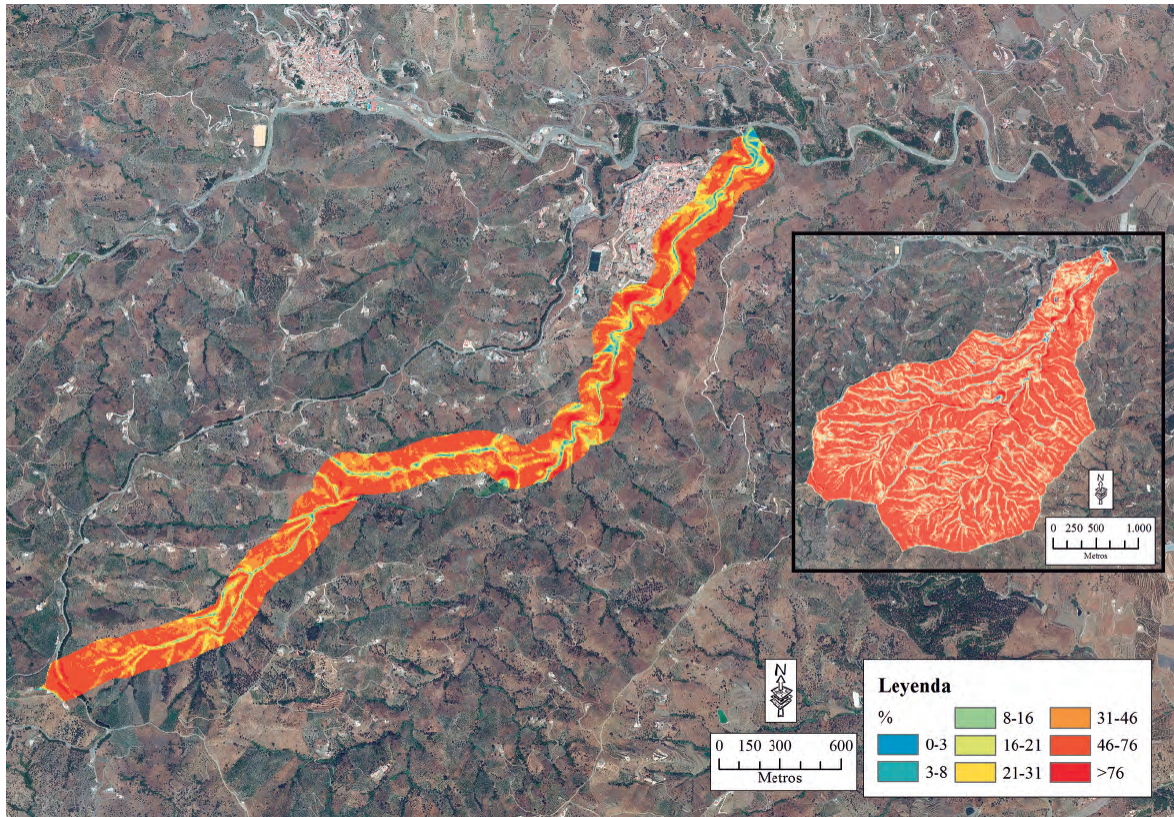


Figura 8: Mapa de pendientes de la cuenca del río Almáchar y sobre el buffer de 100 metros paralelo al cauce principal. Fuente: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Hoja 1053. Elaboración propia.

Figure 8: Slope map of the Almáchar river on the buffer 100 meters, parallel to the principal stream. Source: Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Data sheet 1053. Own elaboration.

junto con la vid siempre están presentes, al igual que los intervalos superiores a 31%. Las mayores variedades de usos se dan entre los intervalos 200 y 400, donde la vocación agrícola es la más abundante, principalmente, la vid con pendientes de entre 31-46% y 46-76%. Por su parte, la vegetación natural ocupa una posición algo más secundaria en extensión, pero también permanece presente en todas las gráficas, tanto en los datos por intervalos de altitud como en los distintos buffers. La presencia de los caminos y tramos asfaltados se hace más constantes en los intervalos entre 100 y 400 metros, conforme aparecen más extensiones de lagares y el núcleo poblacional principal de Almáchar debe quedar interconectado. Por último, cabe destacar que conforme se asciende en altitud (es decir hacia la cabecera entre los 500-700 m.s.n.m.),

la variedad de tipos de usos disminuye solo a vegetación natural, semiabandonado o semiextensivo y vid.

En el anterior apartado, se observó cómo los intervalos con mayores diferencias entre el perfil longitudinal calculado con el modelo *LE* y el real fueron entre el 200-300, 500-600 y a partir de 600 metros, denotando una mayor excavación del río y mayores pendientes. Según el anterior gráfico, en dichos tramos, existe una coincidencia entre estas irregularidades y el incremento de la superficie de la vid y, en menor medida, del abandono o explotación semiextensiva. Sin embargo, cabría preguntarse si estadísticamente la aparición o predominancia de otros tipos de usos del suelo tiene o no mayor peso en la generación de diferencias entre los perfiles que otros usos.



Figura 9: Área de cada tipo de uso del suelo en los buffers calculados.

Figure 9: Area of each type of land uses on the calculated buffers.

Así, se ha procedido a contrastar dicha hipótesis con el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para detectar si el incremento o descenso de algún tipo de uso del suelo o las pendientes coinciden estadísticamente con las mayores o menores diferencias entre la situación real y el modelo. En el tabla 7, se procede a mostrar los resultados de las correlaciones entre las superficies de los tipos de usos según el área de influencia del curso (25, 50 y 100 metros), los promedios de las diferencias entre el perfil real y ajustado, y los valores máximos y mínimos absolutos de esas diferencias. En dicho análisis se han eliminado las correlaciones para los usos e intervalos de pendientes que no llegaban a la hectárea de extensión, por considerarse insuficiente para un ajuste suficientemente válido.

Para un área de influencia de 100 metros paralela al curso principal, se observa cómo

las mayores diferencias entre el perfil, tanto en promedios como en valores absolutos (correlaciones a y c), están relacionadas con la aparición de tramos asfaltados (0,96 y 0,99). Así, cabe la posibilidad de que: i) el curso fluvial sea capaz de excavar con más potencia (ser más erosivo) en los tramos donde haya una mayor intervención del ser humano; ii) el modelo disminuya su precisión con la aparición de elementos de origen antrópico.

Por el contrario, si se reduce el área de influencia a 50 y 25 metros, con el incremento de los porcentajes de vegetación natural, se observa cómo se alcanzan los valores absolutos mínimos más importantes. El modelo muestra una bondad mayor cuando menor alteración antrópica existe en estos tramos y más elementos naturales pueden prosperar en el territorio ($R^2=0,86$).

Tabla 7: Correlaciones entre tipos de usos y diferencias entre el perfil longitudinal real y ajustado del río Almáchar.

Table 7: Correlations between the land uses and the differences between the real and adjusted longitudinal profile of the Almáchar river.

Buffer (m)	100			50			25		
Correlaciones	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Asfaltado	0,96	0,54	0,99	-	-	-	-	-	-
Caminos	0,03	0,16	-0,15	-	-	-	-	-	-
Cauce	0,10	-0,39	0,46	0,19	-0,30	0,54	0,19	-0,30	0,55
Lagar	0,40	0,44	-0,04	0,48	0,36	0,03	-	-	-
Semiabandonado o semiextensivo	0,26	0,15	-0,30	0,44	0,32	0,03	0,51	0,40	0,24
Vegetación natural	0,52	0,39	0,03	0,68	0,61	0,26	0,82	0,86	0,46
Vid	0,29	0,29	-0,18	0,30	0,30	-0,13	0,28	0,28	-0,14
<3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8-16	0,51	0,30	0,36	0,55	0,32	0,50	0,55	0,34	0,43
16-21	0,44	0,24	0,12	0,52	0,26	0,37	0,56	0,31	0,45
21-31	0,52	0,33	0,18	0,60	0,38	0,39	0,62	0,38	0,46
31-46	0,45	0,43	-0,05	0,55	0,53	0,17	0,59	0,55	0,28
46-76	0,33	0,25	-0,22	0,41	0,30	-0,06	0,57	0,48	0,24
>76	-	-	-	-0,21	-0,31	-0,55	-0,26	-0,38	-0,54

a = Correlación entre tipos de usos y promedio de diferencias entre del perfil longitudinal del río real y ajustado;

b = Correlación entre tipos de usos y las máximas diferencias absolutas entre el perfil longitudinal del río real y ajustado;

c = Correlación entre tipos de usos y las menores diferencias absolutas entre el perfil longitudinal del río real y ajustado.

Tabla 8: Correlaciones entre tipos de usos y pendientes del río Almáchar.
 Table 8: Correlations between types of land uses and slopes of the Almáchar river.

Buffer 25	Asfaltado	Caminos	Cauce	Lagar	Semiabandonado o semiextensivo	Vegetación natural	Vid
<3	-	-	-	-	-	-	-
3-8	-	-	-	-	-	-	-
8-16	-	-	-0,13	-	0,94	0,70	0,56
16-21	-	-	0,82	-	0,87	0,71	0,41
21-31	-	-	0,98	-	0,79	0,78	0,30
31-46	-	-	-0,84	-	0,97	0,81	0,88
46-76	-	-	-0,80	-	0,94	0,73	0,92
>76	-	-	-	-	-	-	-
Buffer 50	Asfaltado	Caminos	Cauce	Lagar	Semiabandonado o semiextensivo	Vegetación natural	Vid
<3	-	-	-	-	-	-	-
3-8	-	-	-	-	-	-	-
8-16	-	-	0,34	0,59	0,82	0,73	0,49
16-21	-	-	0,99	0,49	0,87	0,82	0,46
21-31	-	-	0,77	0,35	0,83	0,92	0,36
31-46	-	-	-0,96	0,91	0,96	0,83	0,89
46-76	-	-	-1,00	0,87	0,97	0,77	0,92
>76	-	-	-0,19	-0,04	0,61	0,54	0,26
Buffer 100	Asfaltado	Caminos	Cauce	Lagar	Semiabandonado o semiextensivo	Vegetación natural	Vid
<3	-	-	-	-	-	-	-
3-8	-	-	-	-	-	-	-
8-16	0,91	0,61	-0,38	0,72	0,72	0,74	0,61
16-21	0,69	0,46	-0,36	0,76	0,89	0,92	0,63
21-31	0,71	0,27	-0,02	0,71	0,86	0,96	0,56
31-46	0,40	0,91	-0,99	0,99	0,92	0,80	0,95
46-76	0,32	0,85	-0,96	0,98	0,95	0,77	0,96
>76	-0,04	0,05	-0,14	0,46	0,81	0,71	0,40

Finalmente, se puede observar cómo las correlaciones entre las pendientes y las variables calculadas sobre el perfil no superan el 0,62. Sin embargo, las cifras cambian radicalmente cuando estas son correlacionadas estadísticamente con los usos del suelo (Tabla 8).

De nuevo se ha prescindido de los tipos de usos e intervalos de pendiente que no supe-

ran en su conjunto la hectárea de superficie. Así, en primer lugar, se aprecia cómo existe una correlación elevada entre el cauce y la vegetación natural, y las áreas con pendientes entre 16-21 y 21-31%. En un segundo análisis, se podría destacar cómo los usos semiabandonado y semiextensivo, y la vid ocupan las áreas con mayores inclinaciones (46-76 y >76%)

4. Discusión

Ante los anteriores resultados cabe preguntarse varias cuestiones. En primer lugar, si realizando diversas mejoras en la ratio podrían analizarse cuencas de mayor tamaño y en las que otros tipos de usos del suelo sean los actores principales de los actuales procesos. Además, también sería interesante realizar otras correlaciones con cartografía más precisa referente a tipos de suelos (espesor, contenido en materia orgánica, textura...), grado de cobertura vegetal, litología o gradientes climáticos. Las publicaciones que han sido tomadas como referentes para este trabajo (Hack, 1957, 1973; Chen *et al.*, 2006; Troiani y Della Seta, 2008, 2011; Vágó, 2010; Castillo y Lugo-Hubp, 2011; Capó y García, 2014) buscan relacionar las anomalías del perfil del río con procesos de carácter geomorfológico a gran escala (fallas, discontinuidades litológicas, ascensos o descensos del nivel del mar...). No obstante, en cuencas de montaña pequeñas que manifiestan tasas de erosión elevadas... ¿por qué no profundizar también en otras causas secundarias relacionadas con el cuaternario más reciente como son la erosión y el ser humano?

Por otra parte, al analizar el impacto de los tipos de usos y la respuesta del río representada por el perfil longitudinal y las pendientes, se observa cómo: i) existe una correlación de entre 0,96 y 0,99 cuando las diferencias entre el perfil real y el ajustado son más elevadas en un área de influencia de 100 metros del río con más tramos de caminos asfaltados; ii) entre un espacio contenido entre 25 a 50 metros, las diferencias entre el perfil ajustado y el real se ven disminuidas con una correlación que va desde 0,61 a 0,86, coincidiendo con la aparición de vegetación natural a lo largo del cauce principal; iii) los procesos erosivos son la variable independiente a la hora de ubicar cultivos y caminos, siendo los escarpes (de ladera) una grave limitación para ellos; iv) los caminos se han trazado de forma que no entorpezcan la expansión de los cultivos más productivos (situados en las zonas con más pendientes) o, por el contrario que sean más

fáciles de trazar (divisorias de aguas o fondos de valle).

Por otra parte, a la vista de los resultados de las correlaciones tampoco puede desdeñarse la siguiente pregunta: ¿los usos del suelo han condicionado, aunque en menor medida que los aspectos geomorfológicos, algunos tramos del perfil longitudinal del río, o es la propia disposición geológica del cauce la que ha favorecido o impedido el desarrollo de ellos? Durante siglos la vid, el olivar o el almendro han sido cultivados, con mayor o menor éxito y de forma más o menos respetuosa con el medio; en estas laderas. Sus producciones, lejos de las explotaciones agrícolas más fructíferas de la vega del río Vélez a pocos kilómetros, también destacan por la calidad de sus vinos y pasas. Sin embargo, no queda claro quién evidencia más problemas, o en el caso del vino y la pasa, más ventajas por la variabilidad de los procesos que suceden en la cuenca, ¿el río o el propio uso del suelo?

Por último, otra cuestión clave sería la de poder determinar con exactitud, o al menos realizar una aproximación lo más certera posible estableciendo rangos o intervalos, en qué punto de la diferencia (positiva o negativa) del perfil real con el ajustado se deberían establecer medidas para solventar futuros problemas de erosión, acumulación de sedimentos o aceleraciones del caudal. Si los usos del suelo generan anomalías en los cauces de una cuenca (o viceversa), dicho punto no debería ser olvidado tampoco por los gestores del territorio que tienen que decidir dónde y cómo distribuyen a la población o sus infraestructuras.

5. Conclusiones

Se ha realizado un ajuste de un perfil longitudinal del cauce principal de una cuenca fluvial de pequeñas dimensiones (6,64 km²). Para la obtención de un $R^2 = 0,96$, se ha aplicado la ratio LE que consta de una base logarítmica exponencial y toma como variable independiente la altitud. Como conclusiones más re-

levantadas relacionadas con la metodología se obtienen que: i) la ratio *LE* es una herramienta eficaz y fácil de aplicar tras calcularse, para observar anomalías en un perfil longitudinal de una cuenca fluvial de montaña de pequeñas dimensiones; ii) existe una correlación elevada entre las diferencias del perfil y los usos del suelo actuales, y su distribución con las pendientes.

Respecto a las conclusiones relacionadas con el valle del río Almáchar en la Axarquía (Málaga, España) en su ajuste se ha manifestado que es una cuenca donde prevalece la excavación frente a la sedimentación, y la erosión frente a la estabilidad de los procesos geomorfológicos. Dichas irregularidades se han observado con mayor grado a lo largo de los intervalos 200-300 y a partir de 500 metros de altitud, coincidiendo con el incremento de la extensión del cultivo de la vid y, secundariamente, de las áreas semiabandonadas o de explotación de carácter semiextensivo.

En definitiva, dos aspectos geomorfológicos y geológicos cruciales han sido observados gracias a esta metodología: i) el desnivel entre la cabecera y la desembocadura (la pendiente regional) que se debe a factores geológicos, condiciona el nivel de base y la energía potencial de la altura; ii) dentro de un marco litológico de rocas altamente metamorfizadas y una cobertura cuaternaria muy erosionada (con alteración del suelo subyacente), la geomorfología que adopta el río por naturaleza constituye inevitablemente la característica principal de su evolución, y en menor medida, la actividad antrópica.

Bibliografía

Allen, P.A. (2008). From landscapes into geological history. *Nature*, 451, 274-276. <http://dx.doi.org/10.1038/nature06586>

Alonso, F.; Gomariz, F.; Cánovas, F. (2010). Análisis temporal de los cambios de usos del suelo en la cuenca del Segura mediante teledetección. Implicaciones sobre la degradación. *Cuaternario & Geomorfología*, 24 (3-4), 73-88.

Antón, L.; De Vicente, G.; Muñoz-Martín, A.; Stokes, M. (2014). Using river long profiles and geomorphic indices to evaluate the geomorphological signature of continental scale drainage capture, Duero basin (NW Iberia). *Geomorphology*, 206, 250-261. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.028>

Bates, R. L.; Jackson, J. (2003). *Glossary of geology*. Springer-Verlag, Berlin, 769 pp.

Capó A.; García, C. (2014). Análisis e interpretación de los perfiles longitudinales en la red fluvial del sur y sureste de Mallorca. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 40 (1), 147-167. <http://dx.doi.org/10.18172/cig.2528>

Castillo, M.; Lugo Hubp, J. (2011). Estado actual del conocimiento, clasificación y propuesta de inclusión del término knickpoint en el léxico geológico-geomorfológico del español. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, 63 (2), 353-364.

Chen, Y.C.; Sung, Q.; Chen, C.N.; Jean, J.S. (2006). Variations in Tectonic Activities of the Central and Southwestern Foothills, Taiwan, Inferred from River Hack Profiles. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 17 (3), 563-578.

Davis, W. M. (1932). Piedmont benchlands and Primärrümpfe. *Geological Society of America Bulletin*, 43, 399-440. <http://dx.doi.org/10.1130/GSAB-43-399>

Davis, W. M. (1909). The geographical cycle. *Geographical Essays*. Ginn and Co., 249-278.

Demoulin, A. (2011). Basin and river profile morphometry: A new index with a high potential for relative dating of tectonic uplift. *Geomorphology*, 126 (1), 97-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.033>

Dingman, S. L. (2008). *Fluvial Hydraulics*. Oxford Press University, New York, 559 pp.

Galacho, F.B.; Arrebola, J. A. (2008). El modelo de evaluación de la capacidad de acogida del territorio. Aspectos conceptuales y técnicas relacionadas. *Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 30, 21-40.

Gardner, T. W. (1983). Experimental study of knickpoint and longitudinal evolution in cohesive, homogeneous material. *Geological Society of America Bulletin*, 94, 664-672. [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94%3C664:ESOKAL%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94%3C664:ESOKAL%3E2.0.CO;2)

Gosálvez, R.U.; González Cárdenas, E.; Escobar, E.; Becerra, R. (2009). Análisis hidrogeográfico de las lagunas volcánicas de la Península Ibérica. In: *Geografía, Territorio y Paisaje. Actas del XXI Congreso de Geógrafos Españoles*. UCLM, Ciudad Real, p. 1479-1497.

- Green, J.F.N. (1934). The river Mole: its physiography and superficial deposits. *Proc. Geological Assoc.*, 45, 35-59. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7878\(34\)80032-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7878(34)80032-6)
- Hack, J.T. (1957). *Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland: Boulder, Colorado. United States Geological Survey Profession Paper*, 249. 97 p.
- Hack, J.T. (1973). Stream-profile analysis and stream gradient index. *United States Geological Survey Journal of Research*, 1, 421-429.
- Hack, J.T. (1975). Dynamic equilibrium and landscape evolution. In: Melhorn W.L, Flemal, R.C (eds). *Theories of Landform Development*. Boston, George Allen & Unwin, 87-102.
- Monteiro, K. de A.; Missura, R.; Correa, A. C. de B. (2010). Application of the Hack Index –or stream length-gradient index (SL index)- to the Tracunhaém river Watershed, Pernambuco, Brazil. *Geociências*, 29 (4), 533-539.
- Moreira Madueño, J.M. (1991). Capacidad de usos y erosión de suelos. Edit. Junta de Andalucía, Sevilla.
- Morisawa, M. (1985). *Rivers. Forms and Processes*. Longman, Londres, 222 pp.
- Navarro Rodríguez, S.; Larrubia Vargas, R. (2008). La organización del espacio agrario en la comarca malagueña de la Axarquía. *Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 30, 91-113.
- Paegelow, M.; Villa, N., Cornez, L., Ferraty, F.; FERRE, L.; Sarda, P. (2004). Modelisations prospectives de l'occupation du sol. Le cas d'une montagne méditerranéenne. *Cybergeo (Revue européen de géographie)*, 295, 1-19.
- Pedraza Gilsanz, J. (1996). *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Madrid: Editorial Rueda, S.L., 1996, 414 pp.
- Penck, W. (1924). *Die Morphologische Analyse*. Engelhorn, Stuttgart, 283 pp.
- Perles Roselló, M.J.; Senciales González, J.M. (1994). Cartografía de la erosividad de las precipitaciones a partir del análisis de sus efectos sobre el balance hídrico. In: *Perfiles actuales de Geografía Cuantitativa en España*. Málaga: AGE, 153-164.
- Radoane, M.; Radoane, N.; Dumitriu, D. (2003). Geomorphological evolution of longitudinal river profiles in the Carpathians. *Geomorphology*, 50, 293–306. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00194-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00194-0)
- Rodrigo Comino, J.; Senciales González, J. M.; Ferrer Bueno, E. (2014). Análisis de los cambios de usos del suelo en el área de Casapalma (Valle del Guadalhorce, Málaga) entre 1991 y 2007. *Papeles de Geografía de la Universidad de Murcia*, 59-60, 157-171. <http://dx.doi.org/10.6018/geografia/2014/218221>
- Scotti, V.N.; MOLIN, P.; Faccenna, C.; Soligo, M.; Casas-Sainz, A. M. (2014). The influence of surface and tectonic processes on landscape evolution of the Iberian Chain (Spain): Quantitative geomorphological analysis and geochronology. *Geomorphology*, 206, 37–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.09.017>
- Senciales González, J.M.; Perles Roselló, M.J. (1994). Análisis del riesgo de precipitaciones intensas en la cuenca del río Vélez (prov. de Málaga). In: *Perfiles actuales de Geografía Cuantitativa en España*. AGE, Málaga, 215-226.
- Senciales González, J.M. (1995). *La Cuenca del Río Vélez. Estudio Hidrográfico*. Univ. de Málaga, Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga. Ed. Microfichas.
- Senciales González, J.M. (1996). El Modelado de la Cuenca del río Vélez. *Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia*, 269-286.
- Senciales, J.M. (2002). Análisis morfométrico fluvial de la Sierra de Almirajara). En: Pérez González, A. et al. *Aportaciones de la Geomorfología de España en el Tercer Milenio*, 127-133.
- Senciales González, J.M., Malvárez, G. (2003). La desembocadura del río Vélez (provincia de Málaga, España). Evolución reciente de un delta de comportamiento mediterráneo. *Cuaternario y Geomorfología*, 17 (1-2), 47-61.
- Senciales González, J.M. *Formas y procesos de la erosión en la cuenca del río Almachar. Aproximación a los modelos de cuantificación*. (1991). Memoria Final de Licenciatura (Tesina, inédita), Universidad de Málaga, Málaga.
- Shulits, S. (1941). Rational equation of riverbed profile. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 22, 3, 622-631. <http://dx.doi.org/10.1029/TR022i003p00622>
- Strak, V.; Dominguez, S.; Petit, C.; Meyer, B.; Loget, N. (2011). Interaction between normal fault slip and erosion on relief evolution: insights from experimental modelling. *Tectonophysics*, 513, 1–19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.005>
- Troiani, F.; Della Seta, M. (2008). The use of the Stream Length-Gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: A case study from Central Italy. *Geomorphology*, 102, 159-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.020>
- Troiani, F.; Della Seta, M. (2011). Geomorphological response of fluvial and coastal terraces to

- Quaternary tectonics and climate as revealed by geostatistical topographic analysis. *Earth Surf. Process. Landforms*, 36, 1193–1208. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.2145>
- Vágó, J. (2010). Stream gradient investigation in the Bükkalja using interpolated surfaces. *AGD Landscape & environment*, 4 (1), 23-36.
- Whipple, K.X., Di Biase, R., Crosby, B. (2011). Bedrock rivers. In Shroder, J., (ed.). *Treatise on Geomorphology*, Academic Press San Diego CA, 550-573.
- Whipple, K.X. (2001). Fluvial landscape response time: how plausible is steady-state denudation? *American Journal of Science*, 301, 13-325. <http://dx.doi.org/10.2475/ajs.301.4-5.313>
- Whipple, K.X. (2004). Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 32, 151–185. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120356>
- Willet, S.D.; Slingerland, R., Hovius, N. (2001). Uplift, shortening and steady state topography in active mountain belts. *American. J. Science*, 301, p. 455–485. <http://centrodedescargas.cnig.es> [30 de abril de 2015]