



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Centro de Estudios de Postgrado*

**Trabajo Fin de Máster**

**EROSIÓN POR CÁRCAVAS EN  
OLIVAR: PROYECTO DE  
RESTAURACIÓN DE LA  
CUENCA DEL ARROYO IBROS  
(IBROS, JAÉN)**

**Alumna:** Saá Yánez, Lourdes Marola

**Tutor/a:** Prof. D. Julio Calero González  
Prof. D. Tomás Fernández del Castillo

**Dpto:** Geología

**Julio, 2019**

Los/as Tutores/as dan el Visto Bueno para entregar y defender su Trabajo Fin de Grado/Máster

Jaén, a 08 de Julio del 2019

---

Lourdes Saá  
**Autora**

---

Dr. Julio Calero  
**Tutor**

---

Dr. Tomás Fernández  
**Tutor**

## RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo sentar las bases teóricas de un proyecto de restauración agro-hidrológica del Arroyo Ibros (municipios de Ibros y Baeza). Se trata de una megacárcava de fondo de valle que ha evolucionado en los últimos años, generando importantes problemas erosivos en los olivares y afectando la red de infraestructuras viarias de la Diputación Provincial de Jaén (JV-3043). Para ello, se han analizado los efectos en los caudales de descarga por escorrentía de la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros, si se adoptara el sistema de olivar de conservación con cubierta vegetal, así como la estabilidad de taludes del cauce si se procediera a una revegetación con plantas autóctonas Mediterráneas y al establecimiento de diques de retención de sedimentos, para controlar la expansión de cárcavas. La metodología para caracterizar la cuenca hidrográfica se basa en el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) y el método del Número de Curva. Los factores de seguridad con y sin vegetación se obtuvieron por el método de dovelas de Fellenius. Ambos métodos permitieron simular las condiciones de restauración con vegetación, obteniendo una reducción de escorrentía de 22,10 *mm* a 13,43 *mm* y un caudal de descarga de 18,13 *m*<sup>3</sup>/*s* a 9,85 *m*<sup>3</sup>/*s*. En los taludes del Arroyo la inestabilidad disminuyó en un promedio de 30,2% (vertiente paralela a la carretera JV-3043) y 33,86% (vertiente paralela a los cultivos de olivar). Los cinco diques propuestos en los 0,60 *km* de estudio de cárcavas podrían retener sedimentos en un volumen aproximado de 15.441,06 *m*<sup>3</sup>.

**Palabras clave:** Escorrentía, erosión por cárcavas, restauración, factor de seguridad.

## ABSTRACT

The aim of this study is to lay theoretical foundations of the Project of Agro-ecological Restoration of the Ibros stream (Municipalities of Ibros and Baeza). It is concerned with the mega-gully that has formed on the bottom of the valley, and evolved considerably in the last few years, generating major erosion problems in the olive orchards and causing extensive damage to the road infrastructures of the Provincial Council of Jaén (JV-3043). Therefore, the paper provides the analysis of the effects in the runoff discharge of the Ibros Watershed, if it is established the system of cultivation of olive trees of plant cover for the conservation of the soil, and the stability of the slopes with Mediterranean native species. As well as, is proposed the construction of check dams to control the expansion of gullies. The methodology used was the physical characterisation of the watershed by applying the *Geographic Information System* - GIS, and the Runoff Curve Number (CN) method. The safety factors with and without vegetation were calculation by the slice method, also known as the Fellenius method. Both methods allowed to simulate the restoration conditions with vegetation, obtaining a runoff reduction of 22.10 *mm* to 13.43 *mm* and a peak discharge of 18.13  $m^3/s$  to 9.85  $m^3/s$ . On the slopes the instability decreased by an average of 30.2% (Road side JV-3043) and 33.86% (Side of the olive groves). The five check dams proposed in the 0.60 *km* gully study could retain sediments in an approximate volume of 15441.06  $m^3$

**Keywords:** Runoff, Gully erosion, Restoration and Safety Factor.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.	Erosión en cárcavas .....	1
1.2.	Descripción del problema .....	2
1.2.1.	Erosión en España.....	2
1.2.2.	Erosión en cultivos de olivar .....	3
1.2.3.	Erosión por infraestructuras viarias .....	4
1.2.4.	Restauración para detener la erosión en cárcavas.....	5
1.2.5.	Cálculo de caudales de diseño mediante la aplicación del modelo del NC.....	6
1.2.6.	Factor de Seguridad (FS) .....	7
1.3.	Justificación .....	7
1.3.1.	Erosión en cárcavas en la cuenca del arroyo Ibros .....	7
2.	OBJETIVOS .....	13
3.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
3.1.	Área de estudio .....	14
3.2.	Caracterización de la cuenca hidrográfica .....	16
3.2.1.	Delimitación de la cuenca hidrográfica .....	16
3.2.2.	Asignación del Número de Curva (NC) y grupos hidrológicos .....	18
3.2.3.	Periodo de retorno de precipitaciones con la Distribución de Gumbel .....	20
3.2.4.	Estimación del caudal de escorrentía con el modelo del NC.....	20
3.3.	Estabilidad de taludes .....	24
3.3.1.	Método de Fellenius para taludes sin vegetación .....	24
3.3.2.	Factor de seguridad con vegetación por el Método Fellenius .....	30
3.4.	Diseño de los diques de retención de sedimentos.....	32
3.4.1.	Determinación de volumen de sedimentos retenidos .....	33
4.	RESULTADOS .....	34
4.1.	Usos y características edafológicas de los suelos de la cuenca .....	34

4.2.	Número de curva (NC) y grupo hidrológico (GH) .....	35
4.3.	Período de retorno de las precipitaciones .....	37
4.4.	Estimación de la esorrentía y caudal de descarga con el NC.....	37
4.5.	Estabilidad de los taludes.....	39
4.6.	Diseño de los diques de retención de sedimentos.....	47
4.6.1.	Volumen de sedimentos retenidos .....	51
5.	Discusión de resultados .....	52
6.	CONCLUSIONES .....	58
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
8.	ANEXOS .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

1. Evolución de la cárcava en el Arroyo Ibros.....	9
2. Problemas de la erosión en cárcavas en el Arroyo Ibros. ....	10
3. Sistema de cárcavas en el Arroyo Ibros.....	11
4. Mapa de la cuenca hidrográfica “Ibros” .....	14
5. Precipitación acumulada (mm) en la Cuenca Ibros .....	15
6. Característica geológica de la Cuenca Ibros .....	15
7. Esquema del proceso de obtención de la red de drenaje y cuenca hidrográfica del arroyo Ibros .....	17
8. SHP de unidades edáfica con su código del suelo.....	18
9. Análisis de reclasificación y agrupación de uso del suelo.....	19
10. Asignación de los números de curva .....	19
11. Características geométricas de la cuenca hidrográfica y del arroyo Ibros.....	21
12. Método de dovelas por Fellenius .....	24
13. Esquema de procedimiento para el análisis de taludes .....	25
14. Interpolación del MDT1M con el tramo de estudio .....	26
15. Obtención del perfil geométrico de la cárcava .....	27
16. Ingreso de los valores del perfil geométrico a SLIDE.....	27
17. Definición de las propiedades geotécnicas de suelo.....	28
18. Definición de las propiedades geotécnicas de suelo.....	29
19. Método de Fellenius para el FS de los taludes en el software SLIDE v6.0.....	29
20. Factor de seguridad por Fellenius .....	30
21. Esquema de las variables de la ecuación del método simple con vegetación .....	31
22. Datos geométricos de las dovelas. ....	32
23. Mapa del Uso del suelo de la Cuenca Ibros.....	34
24. Mapa de textura y grupos hidrológicos de la Cuenca Ibros.....	35
25. Mapa de número de curva y potencial de escorrentía.....	36
26. Diseño del dique N° 1 .....	47
27. Diseño del dique N° 2 .....	48
28. Diseño del dique N° 3 .....	48
29. Diseño del dique N° 4 .....	49
30. Diseño del dique N° 5 .....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

1. Cálculo de las pendientes en zona laminar y concentrada.....	21
2. Parámetros de resistencia del suelo en condiciones secas (actualidad).....	28
3. Medidas de la cuenca hidrográfica y arroyo Ibros.....	34
4. Área del NC por textura y uso del suelo.....	36
5. Periodo de retorno en 10 años .....	37
6. Aplicación de la ecuación de escorrentía y pico de descarga.....	38
7. Análisis del efecto de la restauración vegetal en la cuenca “Ibros” .....	39
8. FS del perfil geométrico N° 1 de la zona con cárcava.....	40
9. FS del perfil geométrico N° 2 de la zona con cárcava.....	41
10. FS del perfil geométrico N° 3 de la zona con cárcava.....	42
11. FS del perfil geométrico N° 4 de la zona con cárcava.....	43
12. FS del perfil geométrico N° 5 de la zona con cárcava.....	44
13. Propiedades mecánicas de las plantas.....	46
14. Comparación de FS por el efecto de la vegetación en los taludes.....	46
15. Volumen de sedimentos que podrían retener los diques .....	51

## 1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente clave de los ecosistemas terrestres. Es un recurso natural que se considera en estado crítico, ya que la combinación de la calidad del suelo, de la vegetación y el agua determinan la calidad del ecosistema (Maya, 2011). Según Pham *et al.*, (2018), la pérdida de suelo por erosión es un problema global que afecta a los recursos naturales y a la producción agrícola. A nivel mundial, los valores promedios anuales de erosión del suelo alcanzan entre  $12$  a  $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ , lo que significa la reducción de la capa superficial del suelo de  $0,90 \text{ mm}$  a  $0,95 \text{ mm}$  cada año.

La erosión ocurre cuando el suelo es expuesto a la energía de la lluvia y del viento. Especialmente las gotas de lluvia provocan la disgregación de partículas del suelo, siendo el principal causante de la erosión (Pimentel, 2006). Por ejemplo, Lal (2001), refiere que existen 1.094 millones de hectáreas afectadas en el mundo por la erosión del suelo a causa del agua, en comparación con 548 millones de hectáreas por el viento. La erosión del suelo por escurrimiento hídrico, que se origina por la acción del agua sobre una superficie desprovista de cobertura vegetal, es posiblemente el tipo de erosión más importante de todas, dado que es irreversible y generalmente de magnitud significativa. Este fenómeno se ve agravado por factores socioeconómicos y tecnológicos (Honorato *et al.*, 2001).

### 1.1. Erosión en cárcavas

La erosión es un fenómeno de desprendimiento y transporte de partículas individuales o de pequeños agregados de la capa superficial del perfil del suelo, causado por la liberación de energía cinética de una masa en movimiento o agente erosivo de origen natural (agua y viento, principalmente) o antrópico, sobre una masa de suelo en estado de reposo (Lal, 2002). Existen dos procesos de erosión hídrica: la erosión laminar y en surcos, en la que el agua fluye sin excavar la ladera, o generando regueros de pequeñas dimensiones (los surcos,  $< 20 \text{ cm}$  de profundidad), y la erosión en cárcavas y barrancos (cuando los regueros superan los  $20 \text{ cm}$  de profundidad, hasta alcanzar tamaños considerables). La erosión laminar y en regueros se origina por las fuerzas de impacto de las gotas de lluvia y en las fuerzas de fricción del flujo de agua de escorrentía en las

delgadas láminas del suelo. Los surcos y cárcavas concentran aguas de escurrimiento superficial y acentúan los accidentes del terreno.

Según Castillo y Gómez (2016), las cárcavas son valles pequeños con paredes y cabeceras verticales y perfiles longitudinales de pendiente elevada, que transmiten flujos efímeros y están sujetos a una intensa erosión hídrica. Para Valentin *et al.*, (2005), constituyen una serie de profundas incisiones inscritas en la ladera y sujetas a avenidas bruscas e intermitentes, y que surgen cuando una corriente de agua natural rompe su estado de equilibrio metaestable. El desarrollo de zonas con marcados procesos de erosión en cárcavas, genera la denominadas “malas tierras” o *badlands*.

Aunque se trata de un proceso complejo, la erosión en cárcavas suele producirse cuando las concentraciones de escorrentía y los flujos de ladera toman una velocidad suficiente para romper y transportar las partículas del suelo. Las formas de salpicadura de agua contribuyen al incremento de la escorrentía encima de la cabecera y en la base de la cabecera de la cárcava, ocasionando erosión en los subsuelos y desgastando hacia arriba en la pendiente de la cárcava (erosión remontante). Por lo tanto, el desarrollo inicial y el aumento en longitud de las cárcavas se adscribe a lugares donde existe concentración de escorrentía, como pequeñas vaguadas o irregularidades del terreno (Carey, 2006). Posteriormente, conforme se produce un incremento en la profundidad de la cárcava, comienzan a actuar procesos de inestabilidad gravitacional de los taludes cuyo efecto final es el incremento en anchura por desprendimientos de los mismos (Poesen *et al.*, 2003). Este último proceso de crecimiento se reconoce, en general, como el más peligroso, ya que es especialmente difícil de controlar una vez iniciado (Castillo y Gómez, 2016).

## **1.2. Descripción del problema**

### **1.2.1. Erosión en España**

España es el país Europeo Mediterráneo donde la problemática de la erosión y sedimentación cobra una gran magnitud. La GLobal ASsessment of Human Induced SOil Degradation (GLASOD) realizó una encuesta durante la época de 1980 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Centro Internacional de

Referencia e Información en Suelos (ISRIC) y estableció que más del 40% del territorio Español se caracteriza por una degradación del suelo inducida por el ser humano como “Severa” a “Muy severa” (Mabit *et al.*, 2012). Es decir, el 70% de los paisajes presentan un riesgo de desertificación “Moderado”, mientras que el 30% restante está afectado “Severamente” por los procesos de degradación. Las cuencas hidrográficas del Sur, Segura, Júcar, Ebro y Guadalquivir son las más afectadas, mientras que por Comunidades Autónomas, las de Murcia, Andalucía, Valencia, Castilla-La Mancha, Aragón, Extremadura y Canarias son las más amenazadas (Martínez-Valderrama *et al.*, 2016). Así mismo, con una tasa media de erosión del suelo de  $32 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ , la Provincia de Jaén es una de las más afectadas de toda España por los procesos erosivos y por el alto riesgo de desertificación (INES, 2006).

### **1.2.2. Erosión en cultivos de olivar**

El olivar es uno de los principales cultivos en España, por extensión, impacto económico y arraigo cultural, especialmente en las grandes regiones productoras como Andalucía (Gómez, 2015). La Provincia de Jaén se ha consolidado durante las últimas décadas en el ejemplo más exagerado de especialización productiva regional de olivar en toda la Unión Europea, llegando a ocupar este cultivo casi la mitad de la superficie total de la Provincia. Según Mabit *et al.*, (2012), a través del estudio de modelos de análisis regionales se determinó que en Andalucía alrededor del 70% de las 1,5 Mha de suelo bajo cultivos de olivar es afectado por las tasas de erosión por encima de  $10 t \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$ , mucho más allá de la capacidad regenerativa del suelo. Por lo tanto, el actual modo de agricultura es la fuente económica principal de la región, pero con la desventaja que pierden suelos productivos cada año.

La elevada diversidad de sistemas de producción y condiciones agroecológicas en las que se cultiva el olivar ha generado cuatro grandes tipologías: tradicional de secano en fuertes pendientes (superiores al 15%), tradicional de secano, tradicional de riego, y finalmente moderno (más intensificado) también de riego. Estas cuatro categorías ocupan un 31%, 40%, 22% y 7% aproximadamente de la superficie de olivar en Andalucía. Además, un factor distintivo entre manejos es si dejan o no los restos vegetales sobre la superficie del suelo. Una alternativa tradicional ha sido eliminar la

cobertura vegetal mediante laboreo y el uso de herbicidas o diferentes combinaciones de ambos (Gómez, 2015). Datos recientes (MAGRAMA, 2015) indican que más del 80% del olivar de la Provincia de Jaén carece de cubierta vegetal, lo que ha demostrado repetidamente tener un efecto profundamente negativo en cuanto a la pérdida de suelo (Gómez *et al.*, 2003; Gómez *et al.*, 2009).

En este punto, hay que destacar que los datos citados anteriormente exponen resultados referidos a un tipo concreto de proceso, la erosión laminar o en surcos, calculada habitualmente mediante la ecuación universal de pérdida del suelo (USLE) o en pequeñas parcelas experimentales. Sin embargo, se ha estimado que los procesos erosivos en cárcavas pueden suponer, específicamente en el olivar, tasas erosivas del orden de 10 a 100 veces que la erosión laminar o en surcos (Hayas *et al.*, 2017), aunque al día de hoy el fenómeno no está correctamente dimensionado en su totalidad y existen escasas estimaciones regionales sobre el verdadero alcance del proceso.

### **1.2.3. Erosión por infraestructuras viarias**

Como se comentó arriba, la erosión por cárcavas es un proceso complejo que puede atender a múltiples condicionantes y causas, siendo uno de ellos la construcción de infraestructuras viarias (Croke y Mockler, 2001; Imwangana *et al.*, 2015; Jungerius *et al.*, 2002; Knapen *et al.*, 2008; Montgomery, 1994; Nyssen *et al.*, 2002). La construcción de carreteras favorece la formación de nuevas cárcavas (y el crecimiento de las ya formadas) a través de la masiva concentración de flujo debido a los drenes horizontales, que liberan de forma puntual toda la escorrentía concentrada a través de los sistemas de drenaje perimetral (zanjas, cunetas y colectores) (Katz *et al.*, 2014; Nyssen *et al.*, 2002). A su vez, el desarrollo acelerado de la cárcava puede llegar a generar serios problemas al propio tránsito viario que van desde el agrietamiento del pavimento, debido a grietas de retracción causadas por la desestabilización de las cunetas (Abdulfatai *et al.*, 2014), hasta la rotura completa de la carretera debido a la retracción de la cabecera de la cárcava en el punto de drenaje (Jungerius *et al.*, 2002).

Las estructuras viarias modifican las condiciones naturales del terreno y dejan superficies de suelo o roca desprotegidos de vegetación y con gran riesgo de erosión. Los impactos ambientales son: *a)* Aumento de la erosión generando dificultades en la restauración y mantenimiento del talud; *b)* La producción de sedimentos originados por los gases de combustión de los vehículos son arrastrados por el agua hasta el pie de los taludes provocando dispersión de contaminantes y contaminación de aguas superficiales (Junta de Andalucía *et al.*, 2014).; y, *c)* El ensanchamiento de los lados de la cárcava por deslizamiento y movimiento de masas, especialmente en la curva exterior de los meandros. El desgaste en la parte inferior de la inclinación puede provocar caída masiva del lado del talud por gravedad, este material es arrastrado por los flujos subsiguientes (Carey, 2006).

En el caso de la Provincia de Jaén, se ha podido caracterizar la potente interacción negativa existente entre los drenajes de las infraestructuras viarias mal diseñadas y la formación de cárcavas en olivar (Calero *et al.*, 2019). Se trata de un problema generalizado en la cuenca alta del Guadalquivir, dada la predominancia de materiales blandos y fácilmente erosionables como margas y arcillas, y cuyas consecuencias no se alcanzan a valorar en la actualidad.

#### **1.2.4. Restauración para detener la erosión en cárcavas**

Dada la importancia del problema, urge estudiar y aplicar técnicas de restauración del suelo y las laderas que permitan controlar la evolución de los sistemas de cárcavas activos. La restauración es el proceso de intervención para ayudar a la auto-regeneración de un ecosistema dañado, cuyo objetivo es emular la estructura, funcionamiento (recuperando los servicios ecosistémicos), diversidad y dinámica del ecosistema histórico y autóctono (Mongil *et al.*, 2015). En el caso de las cárcavas, la estrategia consiste en atacar dos principales procesos de crecimiento de las mismas, en longitud y en anchura. Las fallas de rotura de los taludes y las cabeceras de las cárcavas se producen principalmente en geologías de textura arcillosa, y su restablecimiento mediante técnicas convencionales, como muros de escolleras, gaviones o mampostería,

es difícil y costoso. Utilizar técnicas de bioingeniería<sup>1</sup>, basadas en el uso de la vegetación, reduce la necesidad de mantenimientos con presupuestos altos. El uso de la vegetación proporciona refuerzo del suelo a través del sistema radicular de las plantas, como también reduce el contenido de humedad y la presión en los poros (MacNeil *et al.*, 2001). Otra de las técnicas de intervención son los diques de retención de sedimentos (*check dams*); según Díaz *et al.*, (2012), constituye una medida de control por erosión en cárcavas para evitar que continúe avanzando en profundidad y/o ensanchamiento. Estas estructuras provocan un descenso de la energía cinética del flujo de agua y de su capacidad de transporte, que induce la deposición de los sedimentos, produciéndose un cambio local del perfil, con disminución de la pendiente, ensanchamiento de la sección y la elevación del lecho del cauce.

#### **1.2.5. Cálculo de caudales de diseño mediante la aplicación del modelo del Número de Curva**

El modelo del Número de Curva (NC) es un modelo que permite calcular el caudal máximo o de diseño en el punto de salida de la cuenca, siendo este fundamental a la hora de plantear cualquier obra de corrección hidrológica (por ejemplo, el dimensionamiento de un dique se hace en función del caudal máximo previsto). El método del NC permite caracterizar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica y se determina a partir de características físicas del territorio como el tipo, la densidad y el tratamiento de las coberturas vegetales (Díaz y Mercado, 2017). El modelo del NC ha sido aplicado en varias ocasiones en cultivos de olivar, demostrando ser una herramienta muy útil en la prevención y control de la erosión en este cultivo ya que permite simular los caudales de escorrentía en función del sistema de manejo y el empleo de cubiertas (Romero *et al.*, 2007).

---

<sup>1</sup> La Bioingeniería se define como el empleo de material biológico, principalmente vegetal, como material de construcción, sólo o en combinación con otros elementos inertes como piedra, cemento y hormigón (Coppin y Richards, 2007)

### **1.2.6. Factor de Seguridad (FS)**

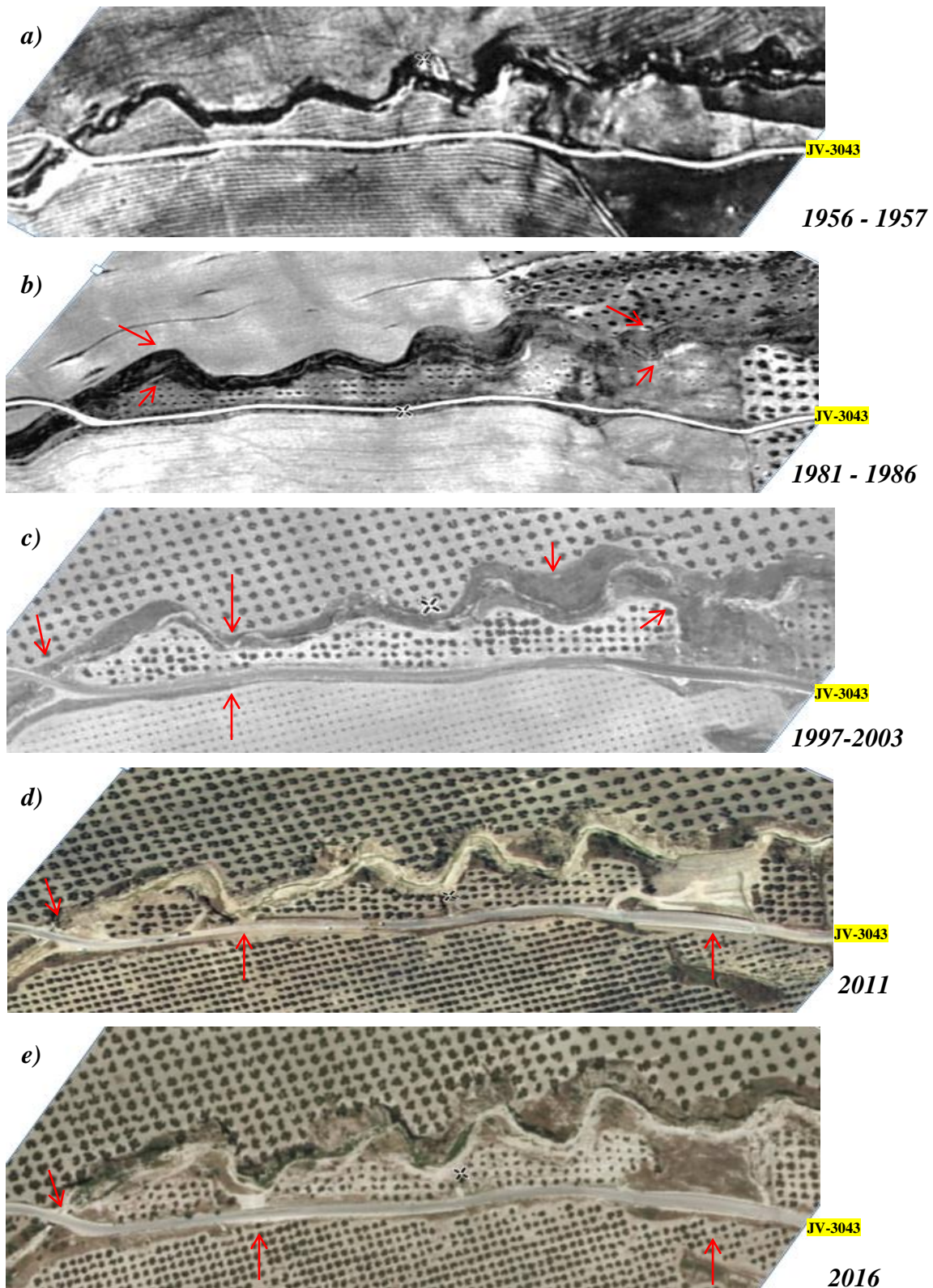
La estabilidad de los taludes de la cabecera o el cauce de una cárcava está determinada por factores geométricos, como sus alturas e inclinaciones, factores geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos. La combinación de los cuatro factores determina la clase de rotura que se va a producir: deslizamientos, flujos y desprendimientos. Los análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático, conocido como equilibrio límite, en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras, que actúan sobre el talud, aquí también se utiliza el criterio de rotura de Mohr-Coulomb. El objetivo será calcular el factor de seguridad (FS) del talud, cuyo valor determina la probabilidad de una rotura mecánica (si  $FS < 1$ ) (Plaza y Rodríguez, 2013). Aunque los métodos de análisis de taludes mediante equilibrio límite se desarrollan ya en la primera mitad del siglo XX, no es hasta las últimas décadas, a raíz de los trabajos de Coppin y Richards (2007), Norris *et al.*, (2008) o Morgan y Rickson (1995) cuando se modifican para incluir el efecto cuantitativo de la vegetación en el factor de seguridad (es decir, valorar de forma numérica la efectividad de la restauración bioingenieril). En el conocimiento del autor, esta metodología cuantitativa no es aplicado aún a la restauración de cárcavas en el ámbito del olivar.

## **1.3. Justificación**

### **1.3.1. Erosión en cárcavas en la cuenca del arroyo Ibros**

Según Ashiagbor, *et al.*, (2013), destaca de forma general que los propietarios de los terrenos y los responsables políticos están más interesados en la distribución espacial del riesgo de erosión que en las pérdidas económicas en términos absolutos debidas a la erosión del suelo, pérdidas que, por otra parte, son extremadamente difíciles de cuantificar (Pimentel, 2006). En este contexto, la Diputación de la Provincia de Jaén sólo en el año 2013 invirtió 73.840,19 euros para el refuerzo de deslizamientos en la carretera JV-3043 (Lupión – Estación Linares – Baeza) que transcurre en paralelo al arroyo de Ibros (Herrador y Martín, 2014), y una cuantía superior a los 250.000 euros desde 2005 (comunicación personal).

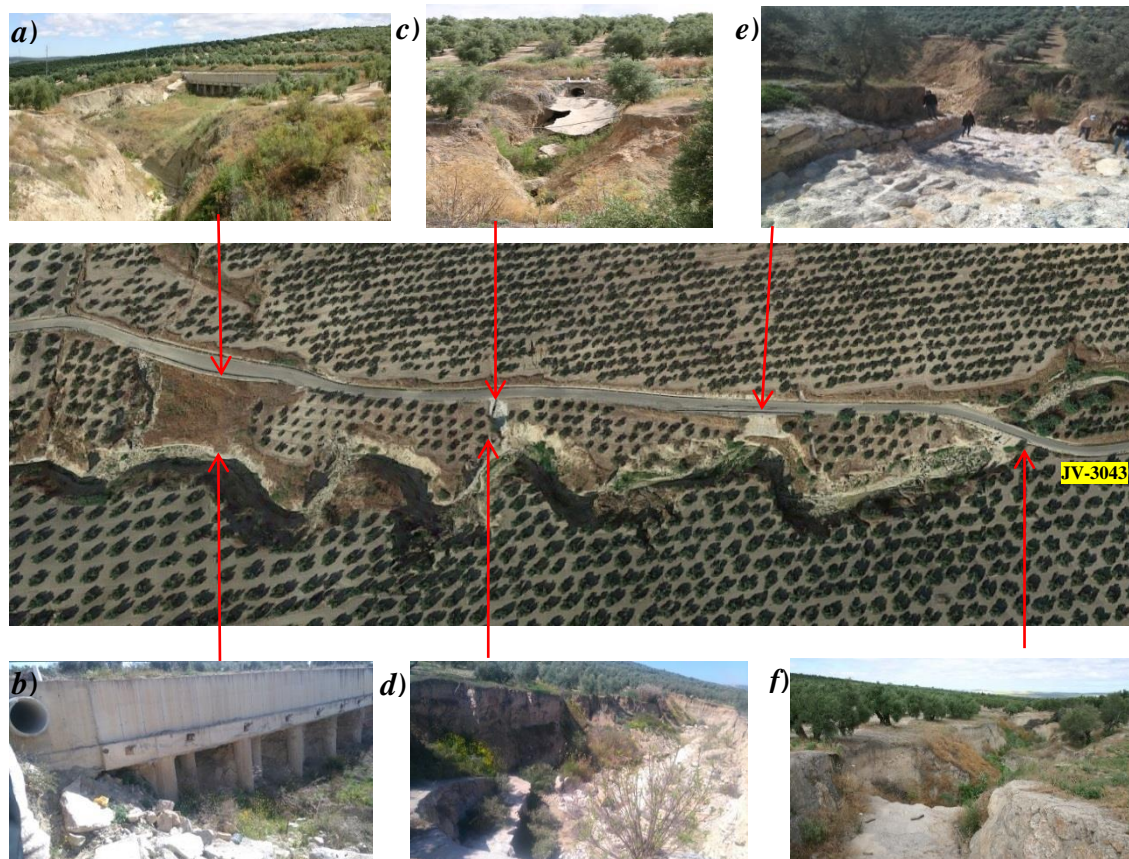
La cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros presenta un importante problema de erosión en cárcavas que se acrecienta cada día. De acuerdo a Poesen *et al.*, (2003), consideramos el mismo arroyo como una cárcava permanente de fondo de valle, de dimensiones considerables (megacárcava, en la terminología de Imwanga *et al.*, 2015), que ha desarrollado un importante sistema de cárcavas de talud (*bank gullies*) conectadas con el cauce principal. Por ejemplo, en la Fig. 1 se observa la evolución del sistema de cárcavas desde el año 1956 hasta el año 2016 de un tramo de la carretera JV-3043, ubicada al lado del arroyo “Ibros” de la Provincia de Jaén. Las ortofotografías describen el incremento de la erosión por el cambio de la cobertura vegetal a cultivo de olivar convencional entre los años 1956 a 1986. En la Fig. 1c, 1d y 1e, se muestra el establecimiento de los cultivos de olivar en ambos lados del arroyo “Ibros”, que conlleva a un aumento del ancho del sistema de cárcava debido a la inestabilidad de los taludes y deslizamientos. En consecuencia, se generan meandros erosivos más pronunciados que suponen un riesgo a la red viaria JV-3043. Otras de las causas de la pérdida de suelo es la cercanía de la carretera JV-3043 al arroyo y los trabajos de infraestructura vial en la zona.



**Fig. 1.** Evolución de la cárcava en el Arroyo Ibros: *a)* El arroyo “Ibros” sin cultivos de olivar; *b)* Avance de las plantaciones de olivar, se observa un incremento del ancho del arroyo; *c)* Cultivos de olivar en ambos lados del arroyo y su incremento en el ancho, como también el avance de la erosión por cárcavas; *d)* Aumento de meandros en el arroyo, acercamiento de la erosión a la vía y obras de infraestructura para deslizamiento; y, *e)* Deslizamiento en los bordes de la vía (margen derecho) y aumento significativo del ancho del arroyo por erosión en cárcava.

Fuente: Geoportal web del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea PNOA.  
Elaboración propia.-

En la Fig. 2a y 2b podemos observar los efectos de un potente deslizamiento que afectó a la carretera JV-3043 en el invierno del año 2005, requiriendo la construcción de un viaducto soportado por grandes pilotes de más de 200 m de longitud. El origen de este deslizamiento, como se puede intuir en la Fig. 2a, radica en la erosión de los materiales de base de la ladera por el propio arroyo. En la Fig. 2c y 2d podemos observar los efectos negativos del drenaje superficial de la carretera, que produce un incremento del caudal en el arroyo y, consecuentemente, refuerza el proceso erosivo aguas abajo. Situación similar se observa al inicio del tramo afectado, en un vado de la carretera que atraviesa el arroyo (Fig. 2f). Las correcciones y mantenimiento realizadas en este tramo por la administración pública son técnicas ingenieriles convencionales como el revestimiento con cemento, hormigón o concreto de las paredes (y lecho) de la cárcava, para evitar el colapso gravitacional e incisiones verticales (Fig. 2e). Sus efectos, sin embargo, han sido poco exitosos hasta el momento (e incluso contraproducentes), dada la aceleración de la erosión reciente.



**Fig. 2.** Problemas de la erosión en cárcavas en el Arroyo Ibros: *a)* Deslizamiento; *b)* Daño de la infraestructura por deslizamiento; *c)* Rehabilitación del dissipador de energía del canal de drenaje; *d)* Dissipador destruido por el movimiento de agua por debajo de la construcción; *e)* Reconstrucción de ladera con cemento y piedra; y, *f)* Canal de drenaje de agua de la cuenca hidrográfica Ibros. Elaboración propia.-

A través de la interpretación escénica en el tramo de la carretera JV-3043 de la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros, se evidencia problemas en lo social y económico. Tal como la pérdida de árboles de olivo debido a la inestabilidad de taludes que incrementa el ancho de la cárcava (Fig. 3a), y con ello la reducción de las ganancias de los agricultores. Otro de los impactos sociales derivado de la pérdida de suelo es el riesgo laboral, ya que los agricultores deben cruzar grandes cárcavas en sus fincas para cosechar el olivo (Fig. 3b). En el ámbito estatal, no se observa medidas correctoras enfocadas en la estabilidad de los taludes y el control de la erosión en cárcavas, siendo un problema ambiental latente sin ninguna intervención basada en técnicas de bioingeniería.



**Fig. 3.** Sistema de cárcavas en el Arroyo Ibros: *a)* Ampliación de los taludes por su inestabilidad y la pérdida de árboles de olivo; *b)* Alturas promedio de los taludes de la cárcava. Elaboración propia.-

El presente estudio se ha planteado en vista al impacto ambiental de gran magnitud que supone la actividad de los procesos erosivos en el arroyo Ibros. Desde un punto de vista general, los resultados de este estudio se orientan a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, especialmente el No. 15 de “**Vida de ecosistemas terrestre**”, que busca gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y la pérdida de biodiversidad. La investigación responde también a la **Estrategia Temática de Protección del Suelo de la Comisión Europea**, dentro del Sexto Programa de Acción Comunitaria en Materia de Medio Ambiente, en sus líneas de actuación para reducir el riesgo de amenaza de suelos europeos por erosión, contaminación, pérdida de materia orgánica, deslizamiento, salinización, compactación y sellado. Por tanto, se deben tomar las medidas adecuadas para eliminar o mitigar los referidos procesos degradativos del suelo. La evaluación de la erosión del suelo es indispensable con fines de conservación:

desde el punto de vista agrícola, para evitar la disminución en las tasas de producción; desde el punto de vista ecológico, para mantener la funcionalidad y calidad de los suelos (Maya, 2011). Por lo tanto, constituye un abanico de posibilidades académicas y profesionales para el estudio de técnicas de restauración hidrológica - forestal destinadas al control de la erosión. Las cárcavas generan pérdidas económicas, preocupación social y política al ser un fenómeno de gran magnitud, que no se detendrá con las actuales prácticas agrícolas del olivar en la cuenca hidrográfica Ibros.

Desde un punto de vista más particular, la erosión de taludes de infraestructuras viarias constituye un serio problema económico, técnico y ambiental. A pesar de la gravedad del problema, no existe una idea clara de cómo atacarlo, siendo sin duda un importante inconveniente la ausencia de información fiable que supere lo anecdótico (Jonte *et al.*, s.f.). En este contexto, podemos enmarcar este estudio en el ámbito del proyecto “*Diseño de una herramienta GIS de riesgos asociados a las infraestructuras viarias de la Provincia de Jaén*”, financiado en el marco del Programa/Plan Convenio Específico de Colaboración 2018 entre la Diputación Provincial de Jaén y la UJA, y a cuyo plantel de investigadores pertenecen los dos directores del presente trabajo. Los resultados y las medidas teóricas de restauración aquí planteadas deberían contribuir en la toma de decisiones acerca de qué metodología se debería adoptar para evaluar escenarios de restauración en cárcavas en el olivar, especialmente en casos de interacción con drenajes de carreteras. Los procedimientos se basan en la caracterización de la cuenca hidrográfica Ibros a través del Número de Curva (NC) propuesta por USDA-NRCS (1986) para la estimación de caudales de escorrentías generadas por las precipitaciones. Además, se analiza la estabilidad de los taludes de la cárcava por el método de dovelas con Fellenius (1927) para obtener el factor de seguridad. En consecuencia, se realizará una proyección numérica de la eficacia de la restauración si la cuenca hidrográfica tuviera cobertura vegetal y el poder de la misma para reducir el caudal de descarga por escorrentía y su efecto en la estabilidad de los taludes. En función de los resultados, proponer la corrección transversal del sistema de cárcava en el Arroyo Ibros con diques de retención de sedimentos para regular el comportamiento hidráulico del cauce.

## 2. OBJETIVOS

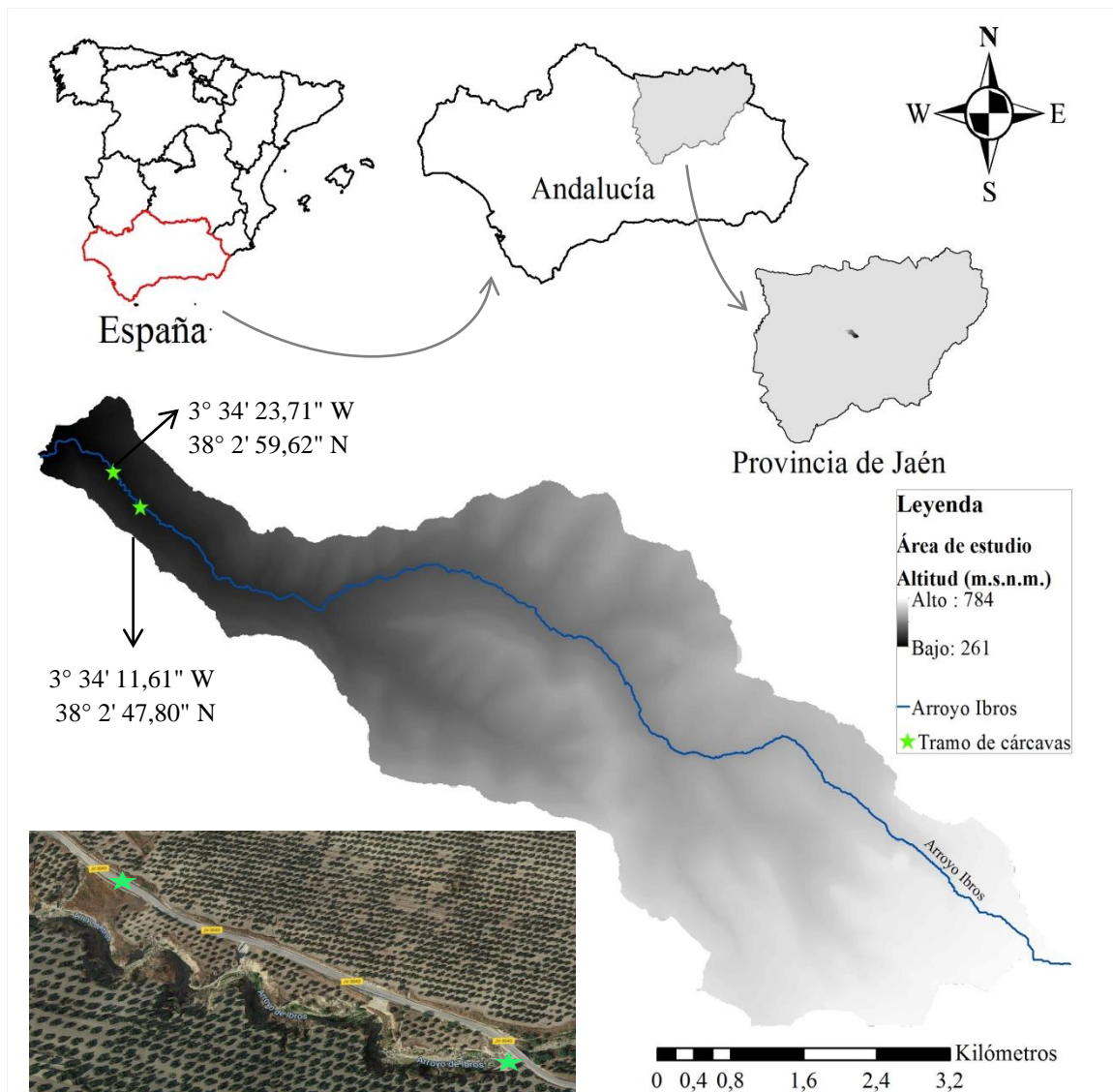
Este trabajo pretende avanzar en la resolución de la siguiente cuestión: **¿contribuye la actuación de restauración a reducir los factores causantes de la erosión en cárcavas y a promover la sostenibilidad del suelo?** En base a esto, se plantea el objetivo general, que consiste en el análisis teórico del efecto que las prácticas de restauración tendrían en el caudal de diseño y la estabilidad de los taludes de la cárcava del Arroyo Ibros. Los objetivos específicos son:

- Obtener el caudal de diseño actual con el Método del Número de Curva, mediante la caracterización de la cuenca hidrográfica Ibros a través del uso del Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Determinar la estabilidad de los taludes actuales de la cárcava, aplicando el Método de Fellenius en la obtención del factor de seguridad, para un tramo del Arroyo Ibros que ha provocado daños en la carretera JV-3043.
- Analizar los efectos en el caudal de diseño si se procediera a una restauración a nivel de cuenca hidrográfica mediante implantación de cubiertas vegetales en los olivares vertientes al Arroyo Ibros.
- Analizar los efectos respecto al factor de seguridad de los taludes de la cárcava que supondría la revegetación de los mismos y el empleo de las técnicas de bioingeniería.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

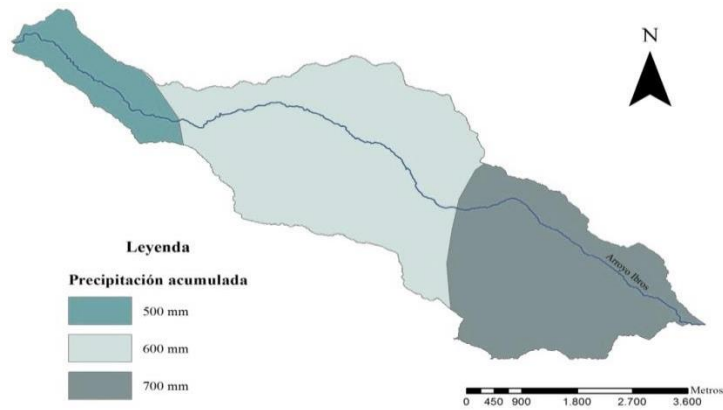
#### 3.1. Área de estudio

La cuenca hidrográfica del Arroyo Ibro se ubica en los municipios de Ibro y Baeza (Jaén, Andalucía, España) en las coordenadas geográficas W 3° 30' 4" y N 38° 1' 3". El estudio del sistema de cárcavas se concreta en un tramo del arroyo que inicia aguas arriba, desde el punto de desagüe de un vado que atraviesa la carretera JV-3043 en el punto km 7 (3° 34' 11,61" W y 38° 2' 47,80" N), hasta el deslizamiento cerca de la carretera (3° 34' 23,71" W y 38° 2' 59,62" N), en el punto km 9 (Fig. 4).



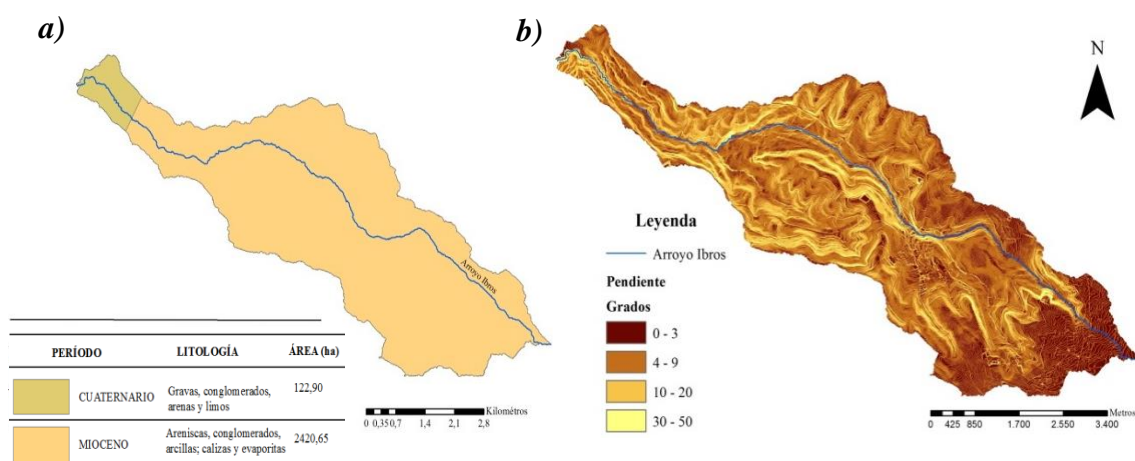
**Fig. 4.** Mapa de la cuenca hidrográfica "Ibro"  
Elaboración propia.-

El régimen climático es el Mediterráneo típico y la temperatura media del mes más cálido de 26,5°C (Julio) y la del mes más frío es 8,4°C (enero) (Taguas *et al.*, 2010). Las precipitaciones medias acumuladas en la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros son de 500 mm en la parte superior, 600 mm en la media y 700 mm en la parte inferior (Fig.5).



**Fig. 5.** Precipitación acumulada (mm) en la Cuenca Ibros  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la Agencia Estatal de Meteorología de España, 2019

La cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Guadalquivir, desembocando en el Río Guadalimar. La mayor parte de la superficie de la cuenca 2420,65 ha, contiene materiales del Mioceno (areniscas, conglomerados, arcillas, calizas y evaporitas); mientras que 122,90 ha corresponden a sedimentos fluviales del Cuaternario con litología de gravas, conglomerados, arenas y limos (Fig. 6a). Las pendientes van de 0 a 50° (Fig. 6b).



**Fig. 6.** Característica geológica de la Cuenca Ibros: a) contexto geológico con 122,90 ha de materiales del cuaternario y 2420,65 ha del Mioceno; b) Pendientes del terreno  
Fuente: Elaboración propia a partir de datos suministrados por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME, 1994)

## 3.2. Caracterización de la cuenca hidrográfica

### 3.2.1. Delimitación de la cuenca hidrográfica

La delimitación de la cuenca hidrográfica se hizo con el software ArcMap de ArcGIS 10.1 utilizando el material cartográfico del Instituto Geográfico Nacional de España (IGN). La información geográfica se obtiene del Centro de Descargas del (CNIG)<sup>2</sup>, para ello se identifica las cartas que intersectan en el área de estudio y que serán descargadas, tales como la No. 905, 906, 926 y 927. Los archivos utilizados son:

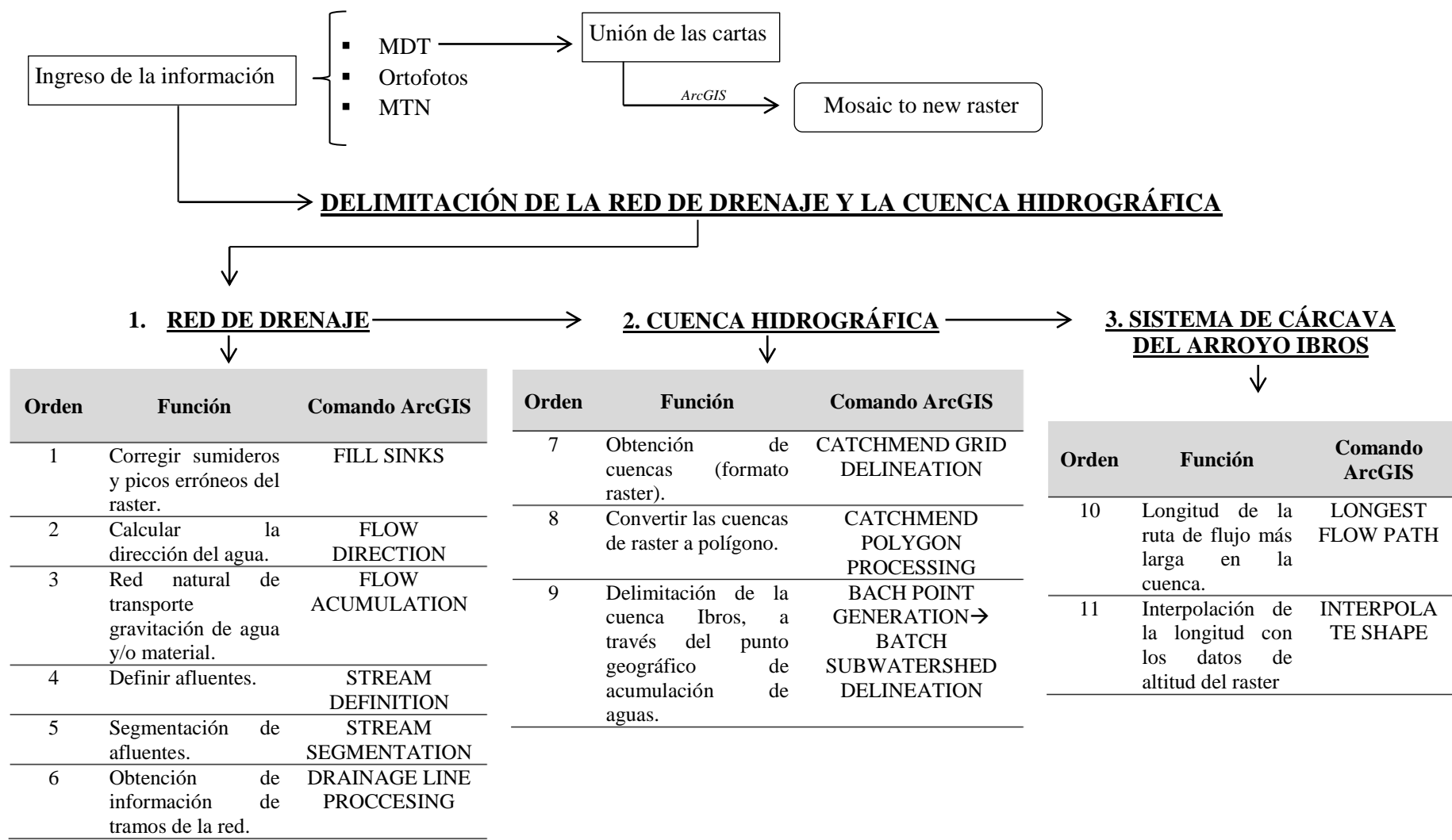
- Mapa Topográfico Nacional a escala 1:25.000 (MTN25) en formato ECW que brinda información del sitio (ríos, vías, ciudades, pueblos y otros). Este producto se descarga en subcartas No. 905-4, 906-3, 926-2 y 927-1.
- Ortofoto a escala 1:50.000 de la carta No. 905 en formato ECW.
- Modelo Digital de Elevación del Terreno 1:50.000 (MDT05) en formato: ASCII (.asc), las cartas descargadas: 905, 906, 926 y 927.

El procedimiento consiste en la aplicación de varios comandos en el software ArcMap y de forma adicional, se descargó la extensión ArcHidrology de propiedad de ESRI para la definición de la red de drenaje y la cuenca hidrográfica. Los pasos se describen en el esquema de la Fig. 7. Primeramente, se ingresa el MTN25 y la ortofoto para identificar el sitio. El MDT05 es el producto digital que permitirá delimitar la cuenca hidrográfica; para ello se procede a unificar las cartas descargadas en un solo raster (mosaico) que será la base para el tratamiento cartográfico con ArcHidrology. El proceso consiste en calcular la red de drenaje y su dirección, a partir de ello se obtiene varias cuencas de drenaje en formato raster. Se ejecutó el comando “Batch point generation” y “Batch subwatershed delineation” para delimitar la cuenca hidrográfica de interés (Arroyo de Ibros) en función del punto geográfico de acumulación de aguas (desembocadura en el Río Guadalimar). Posteriormente, se obtuvo la longitud hidrológica más larga<sup>3</sup> con “Longest Flow Path” y se interpoló con la capa raster unificada (mosaico) para que adquiriera los valores de altitud.

---

<sup>2</sup> <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>

<sup>3</sup> Longitud que tendría que recorrer una gota de agua que cae en el punto geométrico de la cuenca más alejado de su desembocadura o salida.

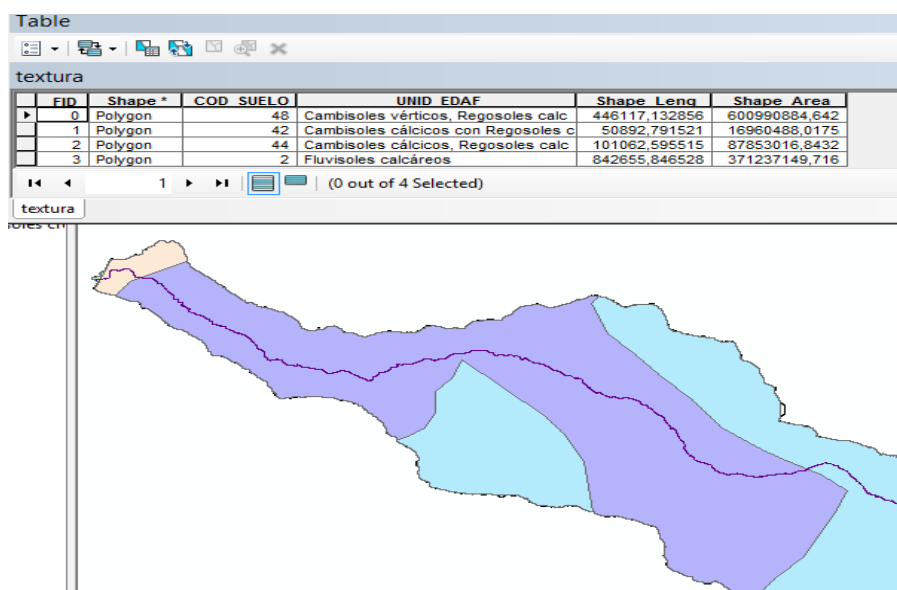


**Fig. 7.** Esquema del proceso de obtención de la red de drenaje y cuenca hidrográfica del arroyo Ibros  
Elaboración propia.-

### 3.2.2. Asignación de grupos hidrológicos y del Número de Curva (NC)

Los grupos hidrológicos del suelo se clasifican en cuatro tipos, de mayor a menor velocidad de infiltración (A, B, C y D). Cada grupo hidrológico, junto con las condiciones de cobertura del suelo, definen un número de curva (NC), que se obtiene a partir de las tablas contenidas en la “Guía para hidrología urbana de cuencas pequeñas” del USDA-NRCS (1986). Para obtener el NC de la cuenca, se hizo un análisis de datos en el software ArcMap con los archivos de shapefile (SHP) de unidades edáficas y la base de datos sobre uso del suelo de España<sup>4</sup>. De estos archivos se extrajo la información de textura y cobertura del suelo; de ello se obtuvieron dos shapefile (SHP) y se ejecutaron los siguientes pasos:

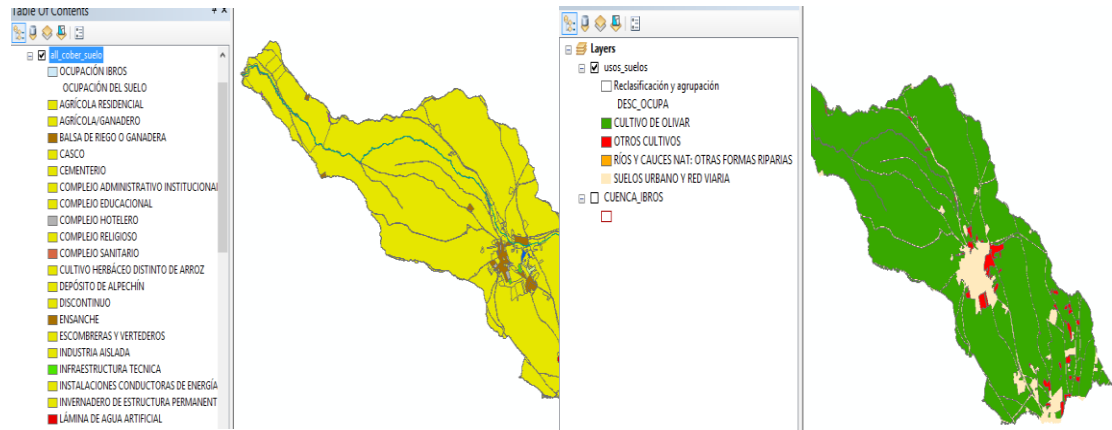
- Se generó un SHP de unidades edáficas con su código de identificación (cod\_suelo) (Fig. 8) a partir del recorte del SHP de unidades edáficas con el SHP de la cuenca Ibros, previamente delimitada. La velocidad de infiltración y, por tanto, el grupo hidrológico de cada unidad edáfica, se determinó a partir del perfil representativo de la misma empleando los datos de textura (%arcilla y %limo) expuestos en González *et al.*, (1989). Luego se definió la clase textural con el triángulo de texturas de la USDA-NRCS (1986) y, finalmente, el grupo hidrológico, que se ingresó de forma manual al SHP de unidades edáficas.



**Fig. 8.** SHP de unidades edáfica con su código del suelo

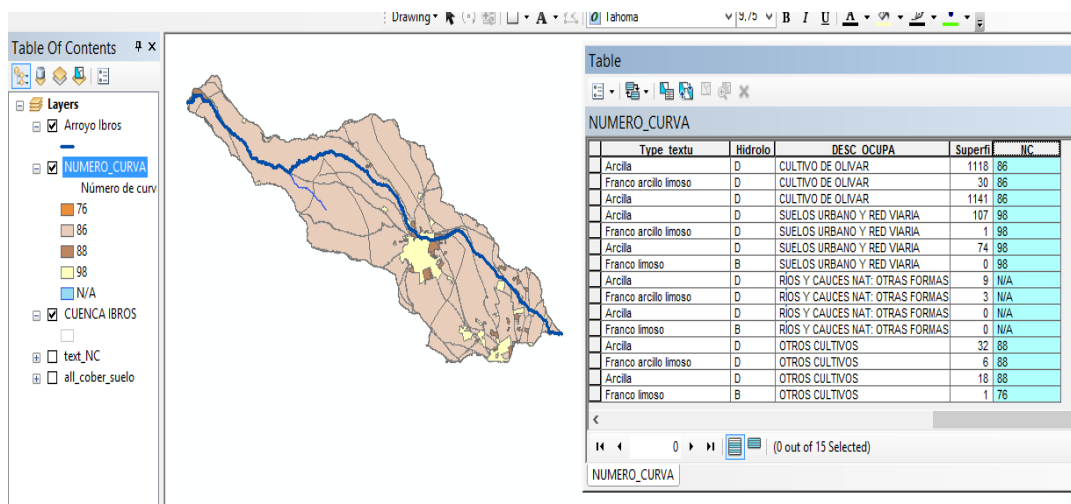
<sup>4</sup> <http://www.siose.es/>

- Por otra parte, se realiza un análisis de reclasificación y agrupación de los distintos usos del suelo de la cuenca Ibros (Fig. 9). El objetivo es tener la información concreta del tipo de cobertura del suelo en un solo SHP.



**Fig. 9.** Análisis de reclasificación y agrupación de uso del suelo: a) Todas los usos del suelo en Ibros y b) SHP de la agrupación de usos del suelo.

- Por último, se efectúa la intersección entre el SHP de unidades edáficas que contiene los datos de grupo hidrológico y el SHP de ocupación del suelo. Una vez unificado los archivos, se procedió asignar el NC que se obtiene de la Tabla 2-2a (Áreas urbanas) y Tabla 2-2c (Tierras agrícolas) de la Guía USDA-NRCS (1986) en función de la ocupación del suelo en la cuenca del Arroyo Ibros (Fig. 10). Así también, se obtiene un NC promedio para la cuenca hidrográfica considerando la superficie de cada grupo hidrológico.



**Fig. 10.** Asignación de los números de curva

### 3.2.3. Periodo de retorno de precipitaciones con la Distribución de Gumbel

El periodo de retorno o de recurrencia (T) es uno de los parámetros importantes al planificar o construir una obra hidráulica. Se define como el intervalo medio expresado en años en el que un valor extremo alcanza o supera al valor “x” al menos una sola vez (Martínez *et al.*, 2012). Por lo tanto, la obtención del valor extremo para un periodo de retorno de 10 años se realiza en función de la teoría de probabilidad y estadística de la distribución de Gumbel. Se trabajó con precipitaciones máximas diarias (mm) de 45 años (1971-2015) de 4 estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cerca de la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros. Este método utiliza la Ecuación 1:

$$x = -Ln\{-Ln[f(x)]\} \times \alpha + \mu \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

- $f(x) = 1 - \frac{1}{T}$  : Representa la probabilidad de un evento extremo relacionado con el periodo de retorno (T) en años (10, 20, 30, etc.).

$$f(x) = 1 - \frac{1}{10 \text{ años}}$$

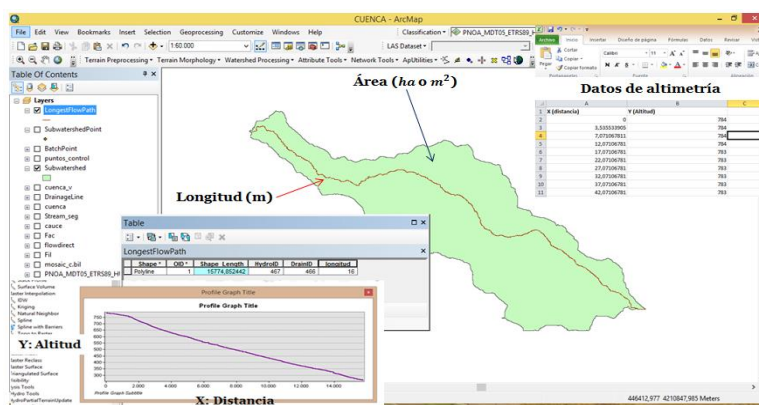
$$f(x) = 0,9$$

- $\alpha = \frac{\sigma_x}{Sn}$ : Corresponde al cociente entre la desviación estándar de los datos (precipitaciones máximas); y, Sn es un valor obtenido de las tablas de distribución de Gumbel en función del número de observaciones de trabajo. Para este caso 45 observaciones (Sn = 1,15184).
- $\mu = \bar{x} - (yn \times \alpha)$ : Es la resta entre el promedio de las precipitaciones y la multiplicación de yn (0,54630 obtenido de las tablas de Gumbel según el número de observaciones “45”) por  $\alpha$ .

### 3.2.4. Estimación del caudal de esorrentía con el modelo del NC

A partir de la caracterización del NC promedio de la cuenca y la precipitación máxima en 24 horas para T = 10 años, se estimó mediante el procedimiento explicitado en la Guía USDA-NRCS (1986) para el caudal de descarga por esorrentía, o caudal de diseño, del Arroyo Ibros en la condición actual (cultivo de olivar convencional).

Así mismo, se simuló el valor del caudal si se hubiese procedido a introducir un sistema de cultivo de conservación con cubierta vegetal en los olivares de la cuenca, seleccionando un NC del mismo grupo hidrológico (ya que, en principio, la textura y la velocidad de infiltración no cambian) pero con condiciones favorables de cobertura vegetal en el suelo descubierto del olivar. El caudal es calculado a partir del tratamiento cartográfico con el software ArcMap. Se obtiene la longitud hidrológica más larga ( $m$ ) del cauce, superficie ( $ha$  o  $km^2$ ) y los niveles de altimetría ( $m$ ). Estos valores se exportaron al programa de Excel para calcular la pendiente en la zona de flujo laminar y concentrada (Fig. 11).



**Fig. 11.** Características geométricas de la cuenca hidrográfica y del arroyo Ibros

Se emplean procedimientos de geometría básica para el cálculo de las pendientes. Se distinguen dos zonas: *a)* laminar considerada los primeros  $100\ m$ ; y, *b)* la zona concentrada (surcos y cárcavas) con profundidad mayor a los  $100\ m$  (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cálculo de las pendientes en zona laminar y concentrada

Pendientes	Esquema de identificación de erosión
<p><b>Zona laminar:</b>  <math>784\ m - 782\ m = 2\ m</math>  <math>S = 2\ m / 100\ m = 0,02</math>  <math>\%S = 0,02 \times 100</math>  <math>\%S = 2\%</math></p>	
<p><b>Zona concentrada:</b>  <math>15674,85\ m - 100\ m = 15574,85\ m</math>  Restar la altitud:  <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <math>(X_{100}; Y_{782})</math> y <math>(X_{15674,85}; Y_{261})</math></li> <li>▪ <math>782\ m - 261\ m = 521\ m</math></li> </ul> <math>S = 521\ m / 15574,85\ m = 0,033</math>  <math>\%S = 0,033 \times 100</math>  <math>\%S = 3,35\%</math></p>	

## A. Escorrentía

Se calcula la escorrentía con el valor de precipitación del período de retorno de 10 años y se utiliza el número de curva (NC) promedio de la cuenca hidrográfica, luego se aplica la Ecuación 2 propuesta en la Guía de la USDA-NRCS (1986).

$$Q = \frac{(P-1a)^2}{(P-1a)+S} \rightarrow Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

- $Q$ : Escorrentía en  $mm$  o en pulgadas ( $in$ )
- $P$ : Precipitación en el período de retorno de 10 años ( $mm$ )
- $1a = 0,2 \times S$ : Es la abstracción hidrológica inicial que representa los procesos físicos que actúan para reducir la precipitación total a precipitación efectiva (escurrimiento de superficie).
- $S = \frac{(25000)}{CN} - 254$  : Potencial máximo de retención después del inicio de las precipitaciones.

## B. Caudal del pico de descarga

En el cálculo de la escorrentía se debe obtener dos valores: *a*) El tiempo de viaje ( $T_t$ ) tanto en la zona laminar como en la concentrada, que corresponde al tiempo que toma una gota de agua en viajar de una localidad a otra en la cuenca hidrográfica; y, *b*) Al tiempo de concentración ( $T_c$ ) que es la suma de los tiempos de viaje de las dos zonas.

El tiempo de viaje en función de la velocidad  $T_t$ , es el movimiento del agua a través de una cuenca hidrográfica como flujo laminar, flujo concentrado poco profundo, flujo en canal abierto y/o la combinación de ellos. Se aplica la Ecuación 3:

$$T_t = \frac{L}{3600V} \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

- $T_t$ : Tiempo de viaje en horas  $hr$  y es el radio de la longitud del flujo para la velocidad del mismo.
- $L$ : Longitud del flujo ( $ft$ )

- $V$ : Velocidad promedio ( $ft/s$ ), para obtener este valor se utiliza la Figura 3-1 de la Guía USDA-NRCS (1986). Corresponde a una intersección de la pendiente “S” del flujo concentrado (3,35% o 0,033) con la línea del gráfico de suelos sin pavimento, por ser el área de estudio cultivos de olivar convencional. El resultado es  $2,9 ft/seg \rightarrow 0,884 m/s$ .
- 3600: Factor de conversión de segundos a horas

El tiempo de viaje en la zona laminar, corresponde al flujo superficial que se da por encima de la superficie (Ecuación 4). En el cálculo la ecuación utiliza un factor de  $n$  – valor que corresponde al coeficiente de rugosidad de Manning relacionado con los efectos del impacto de las gotas de lluvia sobre las diferentes condiciones del suelo. El  $n$  –valor se obtuvo de la Tabla 3-1 de la Guía USDA-NRCS (1986).

$$T_t = \frac{0,007 \times (n \times L)^{0,8}}{(P_2)^{0,5} \times S^{0,4}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

- $T_t$ : Tiempo de viaje en horas  $hr$
- $n$ : Coeficiente de rugosidad de Manning de la Tabla 3-1 de la Guía USDA-NRCS (1986). Se utilizara 0,06 ( $n \leq 20\%$ ) sin cobertura vegetal y 0,15 para restauración con vegetación.
- $L$ : Longitud del flujo ( $ft$ )
- $P_2$ : 2 años, 24 horas de lluvia ( $in$ )
- $s$ : Grado de pendiente hidráulica lineal (pendiente de la superficie,  $ft/ft$ )

El tiempo de concentración es la suma de los valores de los tiempos de viaje para varios segmentos de flujo consecutivo.

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + \dots T_{tm}$$

Dónde:

- $T_c$ : Tiempo de concentración en horas ( $hr$ )
- $m$ : Número de segmentos de flujo

Finalmente, el caudal de descarga de escorrentía ( $q_p$ ,  $m^3/s$ ) se calcula con la Ecuación 5 de la Guía USDA-NRCS (1986).

$$q_p = q_u \times A_m \times Q \quad \text{Ecuación 5}$$

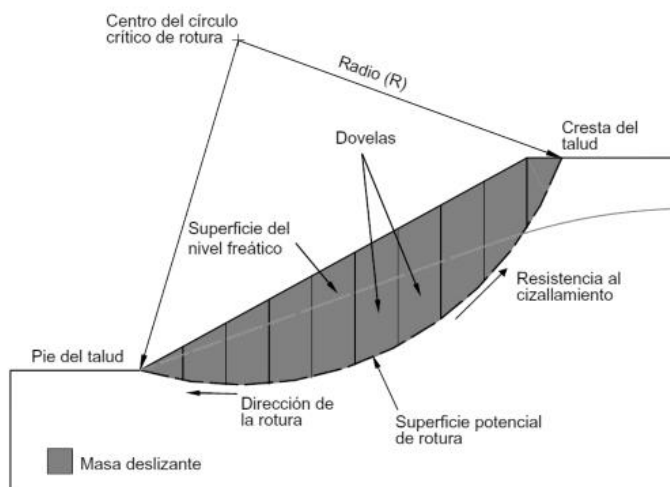
Dónde:

- $q_p$ : Pico de descarga, sus unidades de medida son  $cfs$  o  $m^3/s$
- $q_u$ : Unidad de pico de descarga ( $cfs$ ), este se resuelve con la fórmula de  $I_a = 0,2 \times S$  de abstracción hidrológica inicial. A partir de ello, se calcula el  $I_a/P$  que es la división entre la abstracción hidrológica inicial con la precipitación en el periodo de retorno de 10 años. Obtenido el  $I_a/P$  y el tiempo de concentración  $T_c$ , se procede localizar el punto de intersección (X, Y) entre ambos valores en Exhibit 4-I de la Guía USDA-NRCS (1986).
- $A_m$ : Área de la cuenca hidrográfica expresada en milla cuadrada  $mi^2$
- $Q$ : Escorrentía en  $in$

### 3.3. Estabilidad de taludes

#### 3.3.1. Método de Fellenius para taludes sin vegetación

El método de Fellenius (1927) permite calcular el factor de seguridad de un círculo de deslizamiento. La masa de suelo que se encuentra dentro de esta superficie de rotura es dividida en  $n$  porciones o dovelas (Fig. 12) (Plaza y Rodríguez, 2013).



**Fig. 12.** Método de dovelas por Fellenius

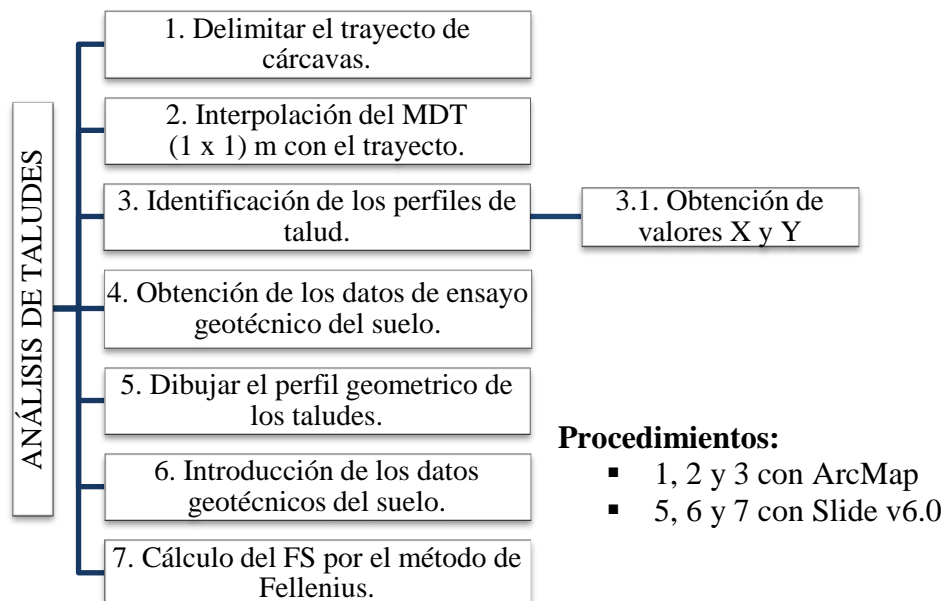
El factor de seguridad (FS) del talud se calcula como la sumatoria de las fuerzas estabilizadoras de cada dovela  $i$  (numerador), dividido entre la sumatoria de las fuerzas desestabilizadoras (denominador) de cada dovela  $i$ , según la Ecuación 6, descrita por Plaza y Rodríguez (2013):

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n [c'l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi']}{\sum_{i=1}^n W \sin \alpha} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

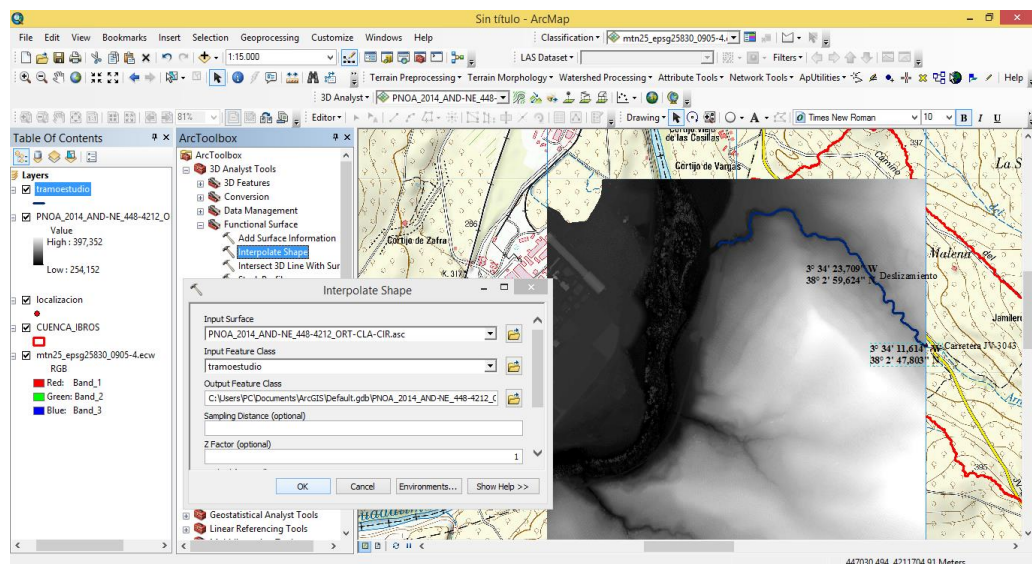
- $n$ : Número de dovelas
- $W$ : Peso de la dovela
- $c'$ : Cohesión aparente ( $kPa = kN/m^2$ )
- $\phi'$ : Ángulo de rozamiento interno ( $^\circ$ )
- $l$ : Ancho de la dovela
- $\tan \phi'$ : Coeficiente de fricción en la superficie de falla
- $W \sin \alpha$ : Fuerza actuante
- $u$ : Presión de poros sobre la superficie de falla

El software ArcMap y Slide v6.0 se utilizaron para la determinación de la estabilidad de los taludes en la condición actual (Cultivo de olivar convencional). Los procedimientos se describen en esquema de la Fig. 13.



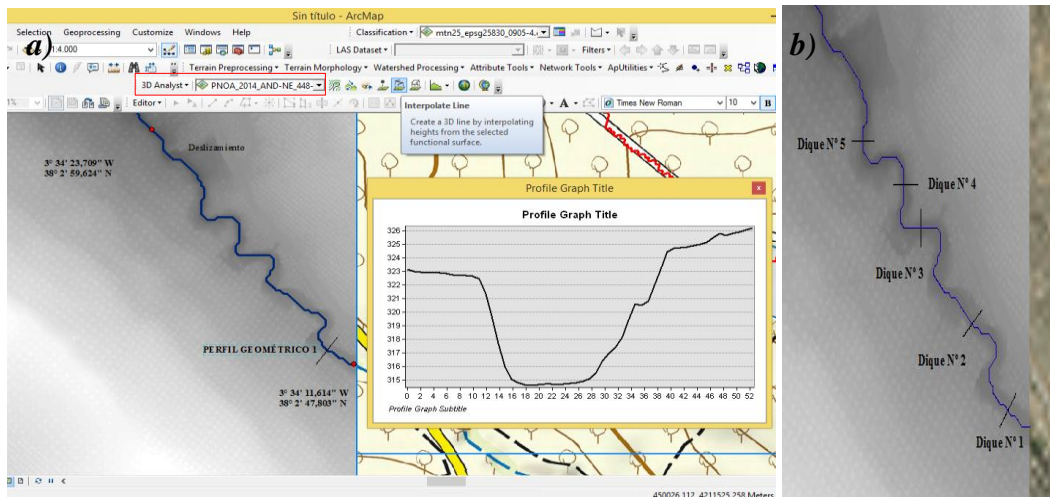
**Fig. 13.** Esquema de procedimiento para el análisis de taludes  
Elaboración propia.-

1. Se utiliza el MTN25 (Subcarta N° 0905-4) y la ortofoto para la identificación del tramo de cárcavas. Luego se realiza el recorte de la longitud del Arroyo Ibros (trayecto de la cárcava) entre el punto de desagüe de carretera JV-3043 y la zona de deslizamiento.
2. Se descarga el MDT1M (tamaño de celda 1m x 1m) de alta resolución de la CNIG. El MDT1M se ingresa a ArcMap. Luego con las capas de trabajo activa (MDT y el tramo) en el software, se utiliza la herramienta “Interpolate shape” ubicada en ArcToolbox → 3D Analyst Tools → Functional Surface. El objetivo es conseguir un shapefile del trayecto con los valores de altitud del MDT1M (Fig. 14).



**Fig. 14.** Interpolación del MDT1M con el tramo de estudio

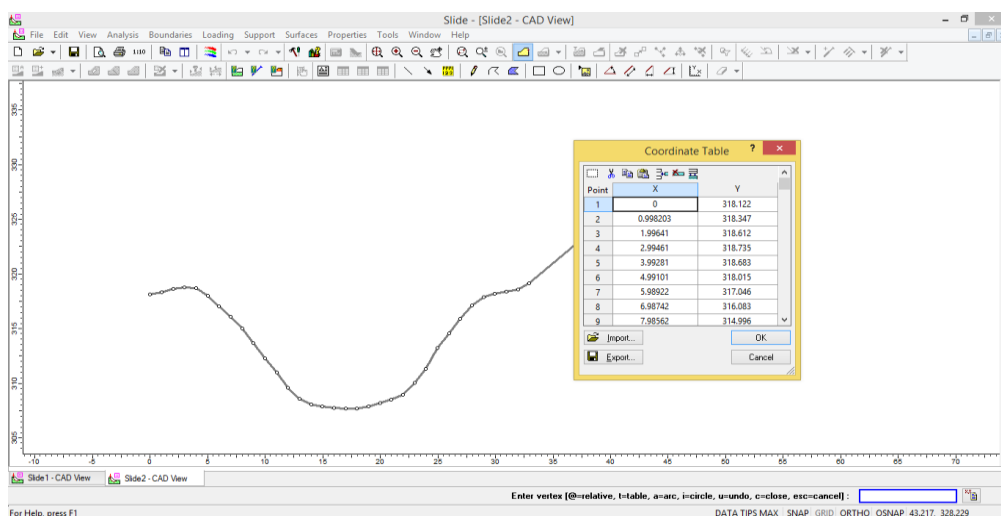
3. Los perfiles geométricos de los taludes se identificaron con la ortofoto, MDT1M y el conocimiento en campo de las cárcavas. Los perfiles se obtienen con la herramienta “3D Analyst” en el que se selecciona el MDT1M y con opción “Interpolate line” se procede a dibujar una línea transversal en las zonas más rectas del trayecto (perfil geométrico) (Fig. 15a). Luego con la opción “Profile graph” se obtienen los datos de X (Distancia) y Y (elevación) de la cárcava. Se establecieron cinco perfiles entre el canal de desagüe de la carretera JV-3043 hasta el deslizamiento (Fig. 15b).



**Fig. 15.** Obtención del perfil geométrico de la cárcava: a) Perfil geométrico y b) La ubicación de los cinco perfiles geométricos de la cárcava

3.1. Los valores del perfil geométrico X y Y se extraen con clic derecho sobre el gráfico → Advanced properties → Data → Seleccionar los datos y copiar a un archivo de Excel para luego ser usados con Slide v6.0. Dicho software trabaja con el punto como separador de decimales.

4. Se ingresan los valores de forma individual para cada perfil geométrico. Entonces se copian las coordenadas y se pegan a Slide v6.0, a través de la opción “Boundaries” → “Add external boundaries” → Clic derecho sobre la pantalla y coordinate table y “ok”. El procedimiento culmina cuando se dibuja el polígono de la cárcava en función del perfil geométrico. Con doble clic se cierra el polígono (Fig. 16).



**Fig. 16.** Ingreso de los valores del perfil geométrico a SLIDE

5. Junto con la morfología del talud, el software Slide v6.0 requiere los datos geomecánicos del suelo: densidad aparente o peso específico del suelo ( $\gamma$ , en  $\text{kN/m}^3$ ), cohesión efectiva ( $c'$ , en  $\text{kN/m}^2$ ) y ángulo de rozamiento interno efectivo del suelo ( $\varphi'$ , en  $^\circ$ ). Los análisis se llevaron a cabo, a partir de una muestra inalterada tomada en los taludes de la cárcava, en el laboratorio de Geología Aplicada de la EPS de Linares. Se determinó mediante el ensayo de Densidad del suelo (Norma UNE 103-301); y,  $c'$  y  $\varphi'$  mediante el ensayo “Determinación de los parámetros resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo en la caja de corte directo” bajo los estándares de la Norma UNE-103-401-98 (Tabla 2).

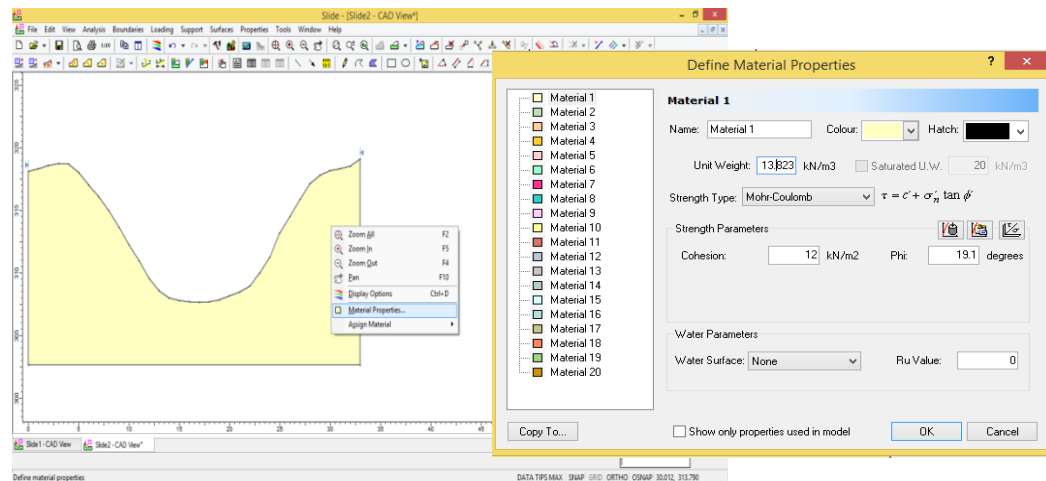
**Tabla 2.** Parámetros de resistencia del suelo en condiciones secas

Parámetros de la muestra	Valores
Ángulo de rozamiento interno ( $\varphi'$ )	19,10°
Cohesión ( $c'$ )	12,00
Densidad seca ( $\gamma$ ): 1,411 $\text{gr/cm}^3$ – 13,823 $\text{kN/m}^3$	

\*1  $\text{gr/cm}^3 = 9,8 \text{ kN/m}^3$

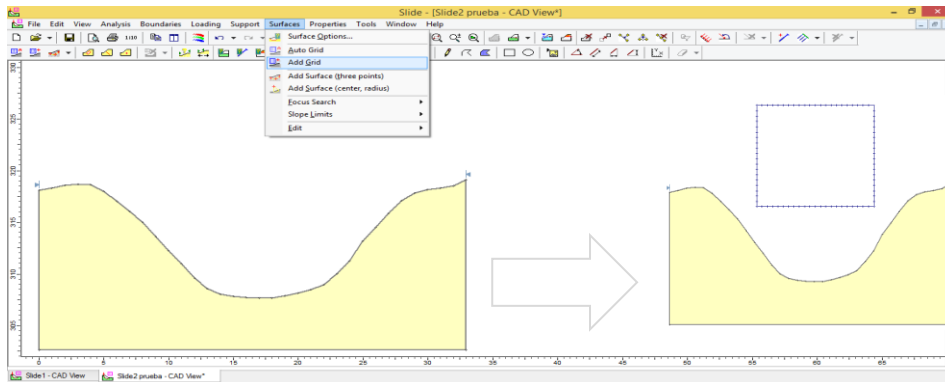
\*Fecha de muestreo: Abril del 2019 en Lupión -Estación Linares-Baeza

6. La asignación de propiedades geotécnicas del suelo se realiza con clic derecho sobre el polígono  $\rightarrow$  “Material properties” e ingresar las características del suelo en “Unit Weight” (Densidad aparente), cohesión ( $c'$ ) y Phi ( $\varphi'$ ) (Fig. 17).



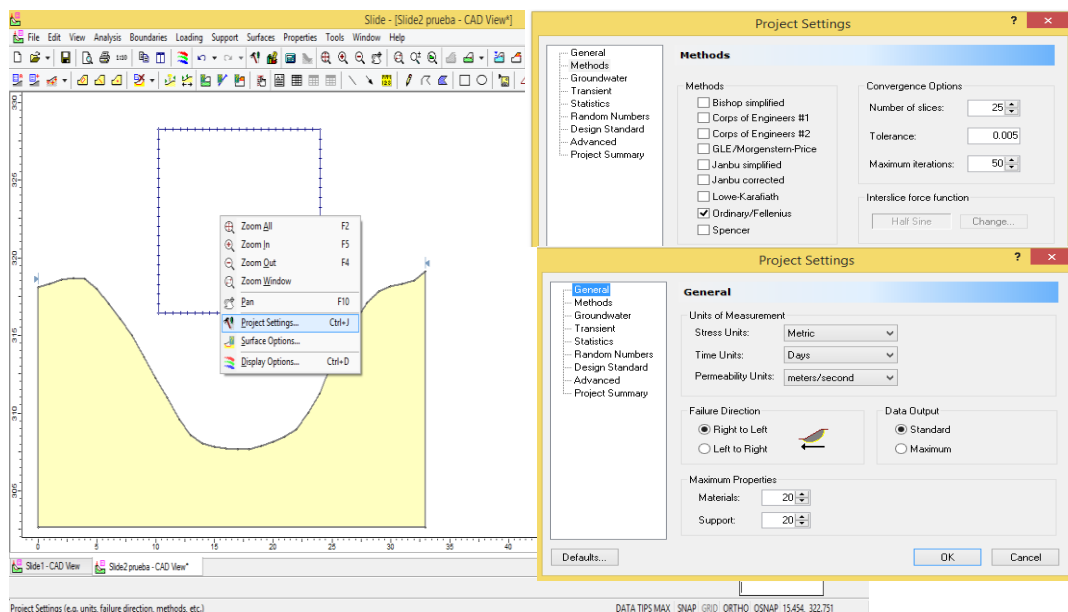
**Fig. 17.** Definición de las propiedades geotécnicas de suelo

7. Se crea una malla o Grid (Surfaces → Add Grid) para obtener el factor de seguridad por el Método de Fellenius. Con esta opción se procede a dibujar la malla encima del polígono (Fig. 18).



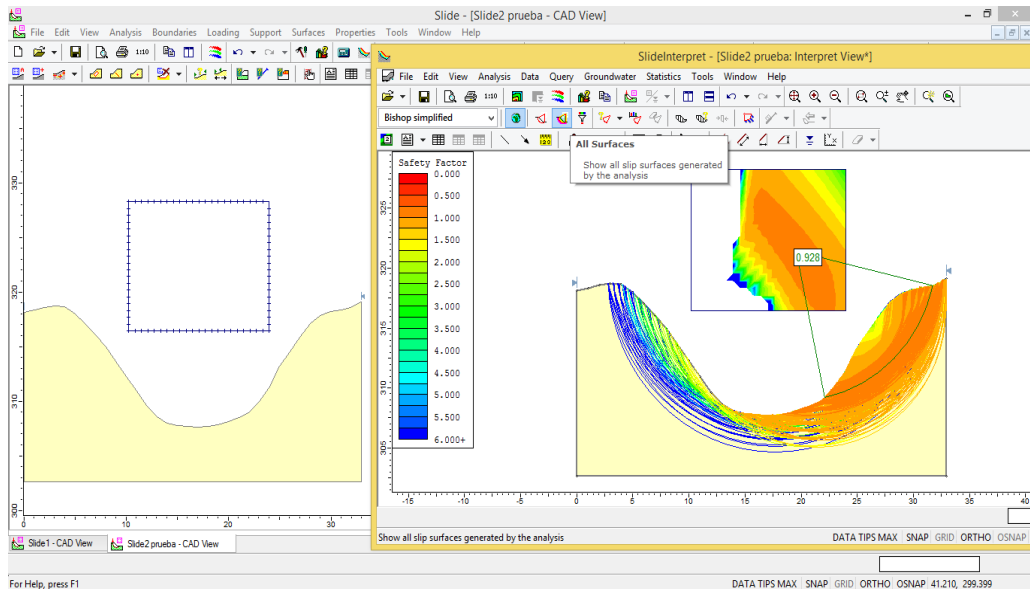
**Fig. 18.** Definición de las propiedades geotécnicas de suelo

- 7.1. La selección del método de Fellenius es con clic derecho sobre la malla → Project Settings → Methods (Ordinary /Fellenius). En esta ventana se selecciona el lado del talud a analizar (derecho o izquierdo) y se finaliza con “Ok”. (Fig. 19).



**Fig. 19.** Método de Fellenius para el FS de los taludes en el software SLIDE v6.0.

- 7.2. El factor de seguridad se obtiene con la opción “Compute” y con “Interpretet” para la presentación de los resultados. En la ventana de Slide Interpret se escoge la opción “All Surfaces” para que el modelado abarque la mayor superficie de analisis del talud (Fig. 20).



**Fig. 20.** Factor de seguridad por Fellenius

### 3.3.2. Factor de seguridad con vegetación por el Método Fellenius

Se utilizaron las ecuaciones de Norris *et al.*, (2008) para calcular el factor de seguridad con vegetación (Ecuación 7), a través de la modificación de las ecuaciones originales de Fellenius (Ecuación 6). Dado que el software Slide v6.0 no permite la introducción de los parámetros geomecánicos relacionados con la vegetación, se diseñó un programa en Excel para poder realizar los cálculos, empleando la misma división del talud en dovelas calculadas por Slide v6.0. En el cálculo del FS con vegetación es necesario los datos geométricos de las dovelas (ancho, altura y ángulo), los datos geotécnicos del suelo (densidad, cohesión y ángulo de rozamiento), así como las propiedades mecánicas de la raíz y de la planta (ángulo de inserción de la raíz en el suelo, peso específico de la vegetación, resistencia al arranque o fuerza tensil de la vegetación, cohesión del suelo enraizado y resistencia al viento opuesta por la vegetación) (Fig. 21).

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c' + c'_R) + \{[(\gamma_z - \gamma_w h_v) + W] \cos^2 \beta + T \sin \theta\} \tan \varphi' + T \cos \theta}{\sum_{i=1}^n \{(\gamma_z + W) \sin \beta + D\} \cos \beta} \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

- $\beta$ : Ángulo de la superficie del talud (área de superficie de rotura)
- $\theta$ : Ángulo de las raíces con respecto a la superficie de rotura
- $W$ : Peso de la vegetación

- $z$ : Altura del talud
- $h_w(z)$ : Altura del nivel freático ( $m$ )

*Parámetros mecánicos del suelo (sin vegetación)*

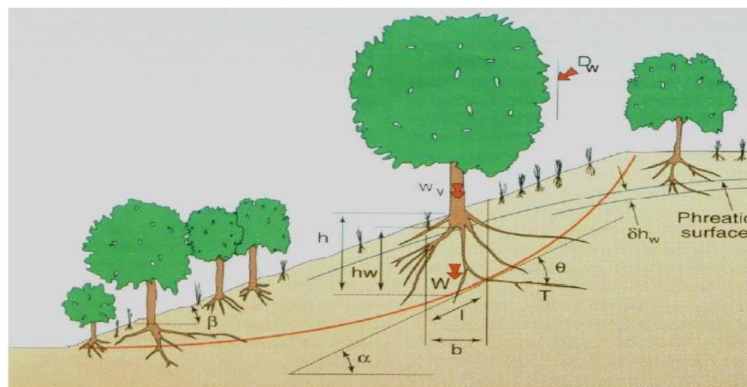
- $\gamma$  = Peso específico del suelo o densidad ( $kN/m^3$ )
- $c'$ : Cohesión aparente ( $kPa = kN/m^2$ )
- $\phi'$ : Ángulo de rozamiento interno ( $^\circ$ )

*Fuerzas estabilizadoras por la vegetación*

- $c'_R$ : Resistencia al esfuerzo cortante debida a la cohesión de las raíces finas  $<20mm$  ( $kPa = kN/m^2$ ).
- $c'_s$ : Cohesión aparente. La evapotranspiración genera un efecto de succión sobre el material del suelo que se traduce en una presión que junta a las partículas. ( $kPa = kN/m^2$ ).
- $W, \cos^2\beta, \tan\phi'$  = Sobrecarga debida al peso de la vegetación en superficie rotura (resultante normal) ( $kPa = kN/m^2$ ).
- $T \cos\theta$ : Efecto tensil, la vegetación contiene lateralmente el material de la ladera (resistencia a esfuerzos de cizalla). ( $kPa = kN/m^2$ ).
- $T \sin\theta$ : Efecto tensil, la vegetación ancla el talud a la superficie de rotura como un micropilote (resistencia a esfuerzo de tracción). ( $kPa = kN/m^2$ ).
- $h_v$  : disminución del nivel freático por efecto de la vegetación ( $m$ )

*Fuerza desestabilizadora*

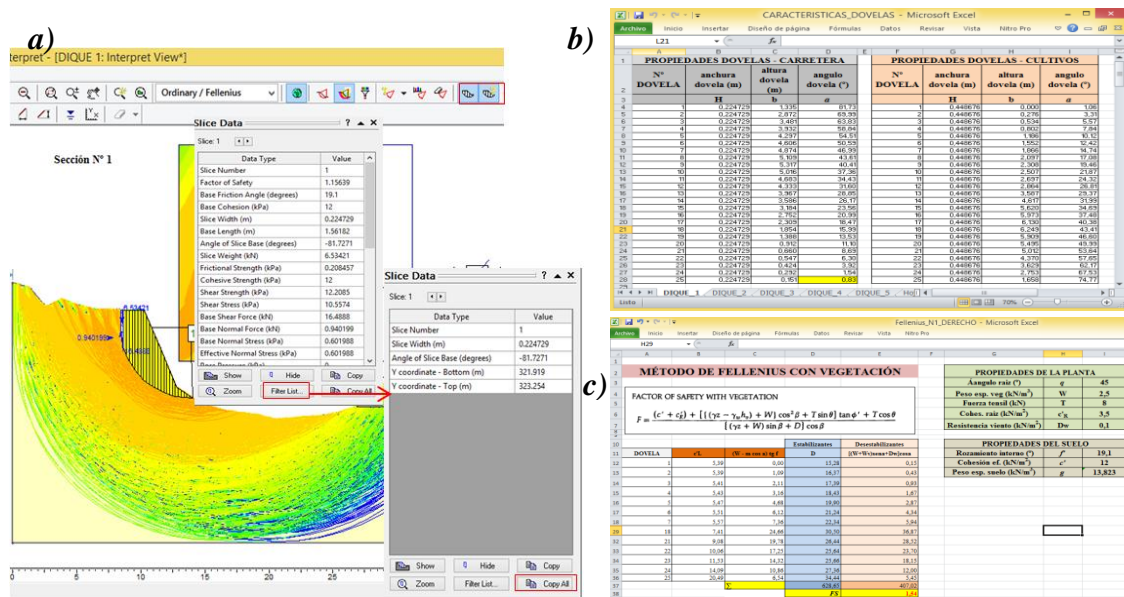
- $D$ : Fuerza del viento al efecto de arranque ejercida sobre la vegetación.



**Fig. 21.** Esquema de las variables de la ecuación del método simple con vegetación (Fuente: Norris *et al.*, 2008)

Para seleccionar las especies y/o comunidades a emplear en la revegetación de los taludes y el cálculo del FS con vegetación, se tuvieron en cuenta las propiedades mecánicas de numerosas especies expuestas por Norris *et al.*, (2008) y Coppin y Richards (2007) en sus respectivos trabajos, aunque siempre se buscó el empleo de flora autóctona mediterránea para evitar cualquier peligro de invasión biológica del medio.

El software Slide v6.0 calculó 25 dovelas por el Método de Fellenius. Los datos geométricos de las dovelas fueron exportadas a la hoja de cálculo de Excel programada para hallar el FS con vegetación. Los información de las dovelas se consiguió con Slide v6.0 Interpretet → “Show slices” → “Query Slice Data” → “Filter List” y se marca la casilla “Slice Number”, “Slice Width”, “Angle of slice base”, “Y coordinate - Bottom” y “Y coordinate – Top. Los valores de Y (bottom y top) se restaron para obtener la altura de la dovela.



**Fig. 22.** Datos geométricos de las dovelas: a) Características geométricas de las dovelas calculas con Fellenius en Slide v6.0; b) Datos geométricos copiados a Excel; y, c) Hoja de cálculo programada para obtener el FS con el efecto de la vegetación por el método de Fellenius.

### 3.4. Diseño de los diques de retención de sedimentos

El diseño de los diques de retención de sedimentos se realizó también con el software Slide v6.0, siguiendo los principios generales de Heede (1976), Desta y Adugna (2012) y Gómez *et al.*, (2011). El caudal de descarga de la cuenca hidrográfica y las características geométricas de la cárcava son datos necesarios para la construcción del dique. La altura del dique se hizo con las 2/5 parte de la altura del talud y para el ancho

del aliviadero se calculó despejando la Ecuación 8 propuesta por (Heede, 1976), obteniendo la Ecuación 9. Los diques deben tener un cuenco de disipación para amortiguar y disipar la energía cinética del agua en la base del dique. Su longitud se determinó multiplicando la altura del dique por el valor de dos, tal como especifica Gómez *et al.*, (2011).

$$Q = C \times L \times D^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$L = \frac{Q}{C \times \left(D^{\frac{3}{2}}\right)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

- *L*: Ancho del aliviadero
- *Q*: 9,675 m<sup>3</sup>/s
- *C*: Coeficiente de la roca, su valor 3,0
- *D*: Altura del aliviadero en función de ¼ de la altura del talud.

#### 3.4.1. Determinación de volumen de sedimentos retenidos

La determinación del volumen de sedimento permite tener una aproximación de suelo erosionado, predecir la vida media del dique hasta su colmatación, siendo, por tanto, un dato útil para estimar la funcionalidad de la restauración. Para este procedimiento se utiliza la fórmula del volumen de la pirámide de base trapezoidal, delimitada por la superficie de los sedimentos sobre el dique. La ecuación 10 es una metodología que utiliza (Romero Díaz, 2015).

$$V = 1/3 \times B \times H \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

- *V*: Volumen de sedimentos
- *B*: Área de la base coincidente con el dique
- *H*: longitud de la cuña de sedimentos

## 4. RESULTADOS

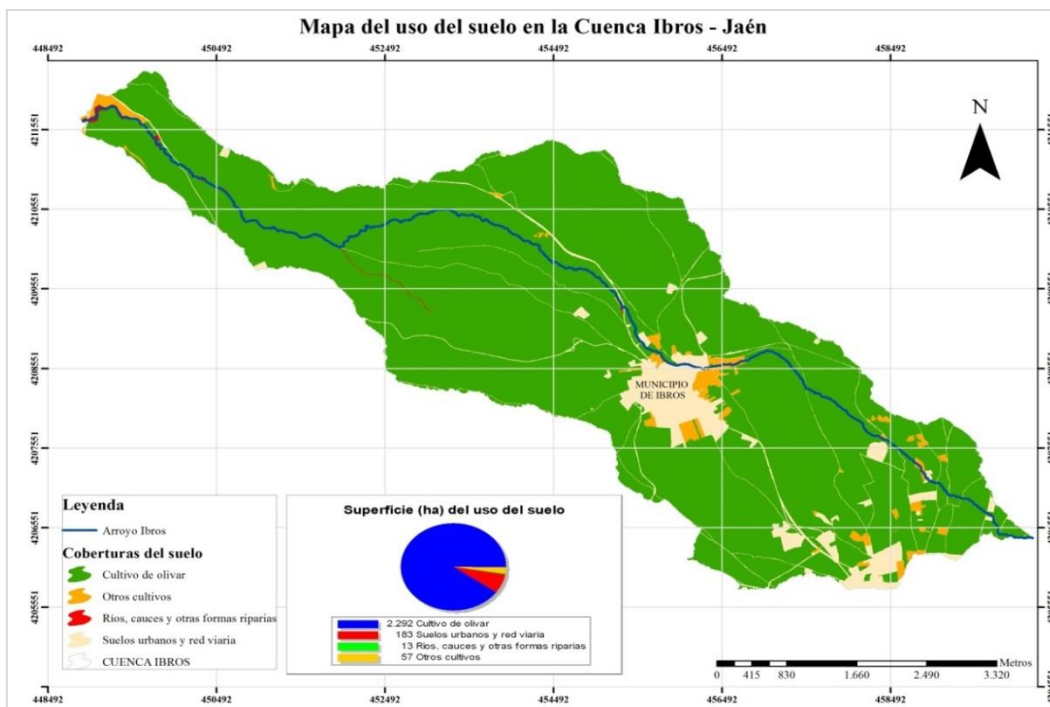
La cuenca hidrográfica tiene una área de  $25,44 \text{ km}^2$  y la longitud hidrológica más larga (Arroyo Ibros) mide  $15,68 \text{ km}$ , que atraviesa toda la cuenca. La longitud del trayecto de cárcavas de estudio es de  $0,60 \text{ km}$  lineales entre el canal de desagüe de la carretera JV-3043 y la zona del deslizamiento (Tabla 3).

**Tabla 3.** Medidas de la cuenca hidrográfica y arroyo Ibros

Área de la cuenca hidrográfica	2.543,32 ha / 25,44 km <sup>2</sup>
Longitud de la ruta de flujo más larga	15.677,02 m / 15,68 km
Longitud del tramo de análisis de la cárcava	599,79 m / 0,60 km

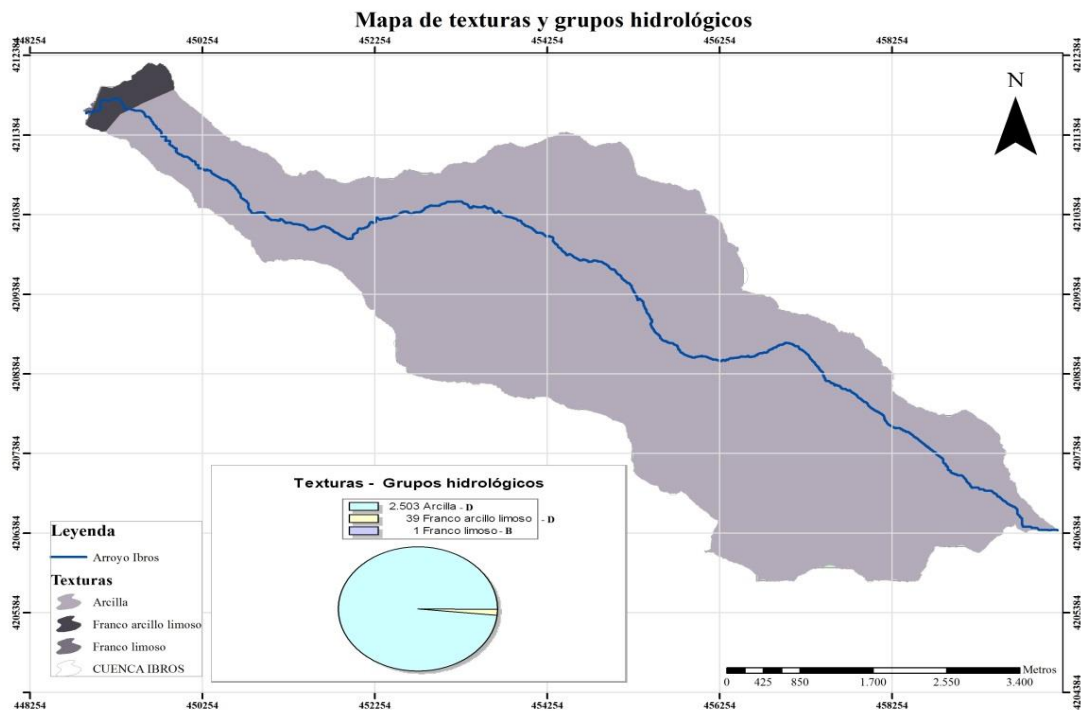
### 4.1. Usos y características edafológicas de los suelos de la cuenca

Los cultivos de olivar cubren la mayor superficie de la cuenca hidrográfica Ibros con  $2.292 \text{ ha}$ . Los otros usos del suelo tienen menor superficie, como suelos urbanos y de la red viaria, con  $183 \text{ ha}$ ; otros cultivos distintos al olivar con  $57 \text{ ha}$ ; y ríos, cauces y otras formas riparias con  $13 \text{ ha}$  (Fig. 23).



**Fig. 23.** Mapa del Uso del suelo de la Cuenca Ibros

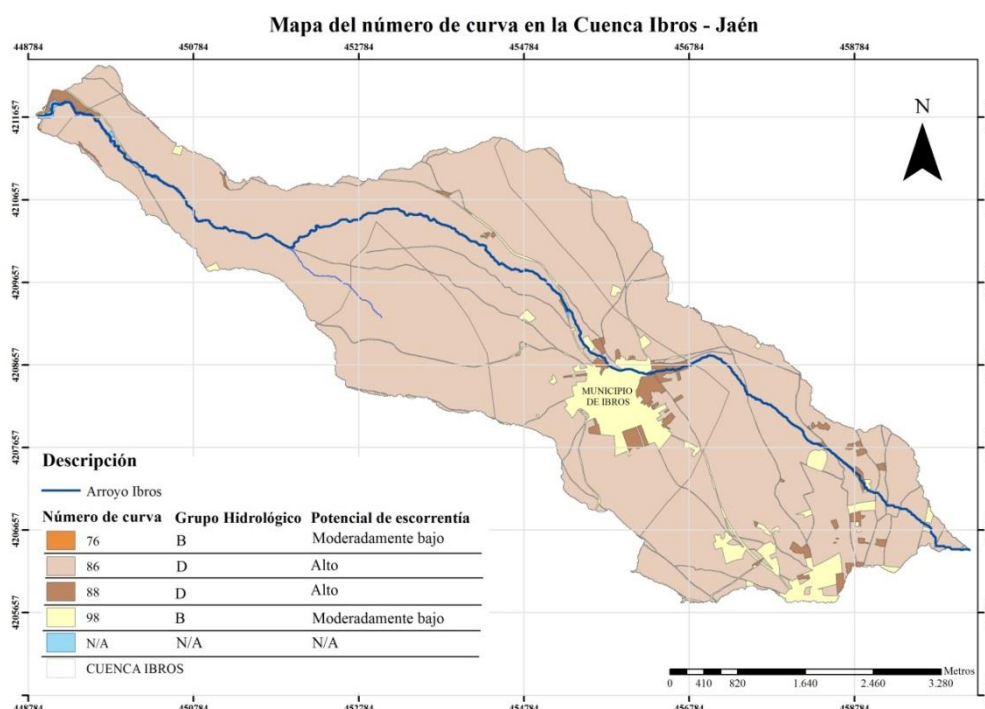
El mapa de texturas y grupos hidrológicos (Fig. 24) muestra que la mayor parte de la superficie con 2.503 ha de la cuenca hidrográfica Ibros es de textura “Arcillosa” con grupo hidrológico “D” por tener un elevado potencial de escorrentía (baja velocidad de infiltración) cuando están completamente saturados. La zona final de descarga de la cuenca hacia el Río Guadalimar tiene dos texturas: a) “Franco Arcillo Limoso” con 39 ha del grupo hidrológico “D”; y, b) “Franco limoso” con grupo hidrológico “B” de 1 ha de superficie. Esta última se caracteriza con moderada capacidad de infiltración cuando los suelos están saturados, por lo tanto, es una condición “Buena”.



**Fig. 24.** Mapa de textura y grupos hidrológicos de la Cuenca Ibros

#### 4.2. Número de curva (NC) y grupo hidrológico (GH)

El NC se calcula en función del tipo de cobertura vegetal y condición hidrológica. En la cuenca Ibros la mayor superficie es de cultivos de olivar convencional (sin cobertura vegetal que proteja al suelo de las precipitaciones). Por lo tanto, tiene una condición “Pobre” de cobertura. A esta circunstancia se le suma que, además, presenta un grupo hidrológico de elevado potencial de escorrentía, “D”. Al consultarlo en las tablas nos arroja un NC de 86 (Fig. 25).



**Fig. 25.** Mapa de número de curva y potencial de escorrentía

El tipo de unidad edáfica, número de curva y grupos hidrológicos se detalla en la Tabla 4. Prácticamente la totalidad de la cuenca, con texturas de “Franco Arcillo Limoso” y “Arcilla” para cultivos de olivar, otros cultivos, suelos urbanos y red viaria, pertenece al grupo hidrológico “D”, con NC (86, 88 y 98). El grupo hidrológico “B” con textura “Franco limoso” con NC (98 y 76) lo ocupan suelos urbanos y red viaria, ríos, cauces, formas riparias y otros cultivos. El NC promedio es 86 para el total de la superficie (2539,45 ha).

**Tabla 4.** Área del NC por textura y uso del suelo

*Cód.	Clase textural	Unidad edáfica	GH	NC	Área (ha)	Uso de suelo
2	Franco limoso	Fluvisoles calcáreos	B	98	0,27	Suelos urbanos y red viaria
2				-	0,23	Ríos, cauces y otras formas riparias
2				76	0,59	Otros cultivos
42	Franco arcillo limoso	Cambisoles cálcicos con regosoles calcáreos, fluvisoles calcáreos y Luvisoles cálcicos	D	86	29,55	Cultivo de olivar
42				98	1,08	Suelos urbanos y red viaria
42				-	3,02	Ríos, cauces y otras formas riparias
42				88	5,54	Otros cultivos

44	Arcilla	Cambisoles cálcicos, regosoles calcáreos y litosoles con rendsinas	D	86	1140,54	Cultivo de olivar
44				98	74,29	Suelos urbanos y red viaria
44				-	0,35	Ríos, cauces y otras formas riparias
44				88	17,86	Otros cultivos
48	Arcilla	Cambisoles vérticos, regosoles calcáreos y vertisoles crómicos con cambisoles cálcicos	D	86	1118,03	Cultivo de olivar
48				98	106,62	Suelos urbanos y red viaria
48				-	9,06	Ríos, cauces y otras formas riparias
48				88	32,43	Otros cultivos

\*Cód.: Unidad cartográfica de la memoria de mapa de suelos de Andalucía

\* GH: Grupo Hidrológico; NC: Número de curva

\*Total de superficie: 2539,45 ha y el promedio del número de curva: 86

### 4.3. Período de retorno de las precipitaciones

Con el método de la distribución de Gumbel se obtuvo un promedio máximo de lluvia en un periodo de retorno de 10 años de 48,94 *mm/día* para el área de cárcavas de la cuenca hidrográfica Ibros (Tabla 5).

**Tabla 5.** Periodo de retorno en 10 años

Variables de Gumbel	Número de la estación meteorológica			
	16	36	110	15
$\sigma$	11,91	12,02	11,90	12,62
$sn$	1,15	1,15	1,15	1,15
$\alpha$	10,34	10,43	10,33	10,96
$\bar{x}$	30,69	30,58	30,69	32,13
$yn$	0,55	0,55	0,55	0,55
$\mu$	25,05	24,88	25,04	26,14
<b>Precipitación <i>mm/día</i> (24hr)</b>	48,31	48,36	48,30	50,80
<b>Promedio <i>mm/día</i> (24hr)</b>	48,94			

### 4.4. Estimación de la escorrentía y caudal de descarga con el NC

La Tabla 6 muestra de forma detallada los procedimientos matemáticos para la obtención de la escorrentía y caudal de descarga por el método del Número de Curva propuesta por la Guía USDA-NRCS (1986), para los suelos en las condiciones de

cultivo convencional (actual) y en el caso de que se implementará la cubierta vegetal. Se puede observar como los valores cambian significativamente al simular las condiciones de vegetación en la cuenca hidrográfica Ibros.

**Tabla 6.** Aplicación de la ecuación de escorrentía y pico de descarga

Factor	Condición actual	Con vegetación
$S$	$S = \frac{(25000)}{86} - 254$ $S = 36,70mm$	$S = \frac{(25000)}{79} - 254$ $S = 62,41mm$
$Q$	$Q = \frac{[48,94 mm - (0,2 \times 36,70)]^2}{48,94 mm + (0,8 \times 36,70)}$ $Q = \mathbf{0,87 in}$	$Q = \frac{[48,94 mm - (0,2 \times 62,41)]^2}{48,94 mm + (0,8 \times 62,41)}$ $Q = \mathbf{0,53 in}$
$T_t$	Tiempo con la velocidad: $T_t = \frac{0,007 \times (0,06 \times 100)^{0,8}}{(24,47)^{0,5} \times (0,02)^{0,4}}$ $T_t = 0,028 hr$	Tiempo con la velocidad: $T_t = \frac{0,007 \times (0,15 \times 100)^{0,8}}{(24,47)^{0,5} \times (0,02)^{0,4}}$ $T_t = 0,0590 hr$
	Tiempo en la zona laminar: $T_t = \frac{15574,85 m}{3600 \times (0,884 m/s)}$ $T_t = 4,894 hr$	Tiempo en la zona laminar: $T_t = \frac{15574,85 m}{3600 \times (0,884 m/s)}$ $T_t = 4,894 hr$
$T_c$	$T_c = \sum T_t = 4,894 hr + 0,028 hr$ $T_c = 4,922 hr$	$T_c = \sum T_t = 4,894 hr + 0,0590 hr$ $T_c = 4,953 hr$
$I_a/P$	$I_a = 0,2 \times 36,70$ $I_a = 7,34 m$ $I_a/P = 7,34 mm/48,94 mm$ $I_a/P = 0,15$ Entonces: $q_u = 75 \frac{cms}{in}$	$I_a = 0,2 \times 62,41$ $I_a = 12,49 m$ $I_a/P = 12,49 mm/48,94 mm$ $I_a/P = 0,26$ Entonces: $q_u = 67 \frac{cms}{in}$
$q_p$	$q_p = 75 \times 9,8198 \times 0,87$ $q_p = \mathbf{640,74 cfs}$	$q_p = 67 \times 9,8198 \times 0,5288$ $q_p = \mathbf{347,912 cfs}$

La cuenca hidrográfica Ibros es de textura “Arcillosa” con grupo hidrológico “D” y predominio de cultivos de olivar convencional, lo que arroja un valor medio de NC de 86. Con este valor, se obtiene 36,70 mm de potencial máximo de retención en el suelo después de un periodo de lluvias que genera 22,10 mm de escorrentía con un caudal de descarga de 18,13 m<sup>3</sup>/s. Los valores que se obtienen simulando condiciones de restauración (NC 79) en la cuenca hidrográfica sobre el cultivo de olivar, proyectan valores favorables para el control de la erosión en cárcavas. El potencial máximo de

retención de lluvia en el suelo aumenta a 62,47 mm, con ello se reduce la escorrentía a 13,43 mm y el caudal de descarga 9,85m<sup>3</sup>/s. En consecuencia, la vegetación influye en un 46% de disminución del caudal de descarga por escorrentía en el Arroyo Ibros, que en la actualidad está deteriorado por la erosión en cárcavas (Tabla 7).

**Tabla 7.** Análisis del efecto de la restauración vegetal en la cuenca hidrográfica “Ibros”

PARÁMETROS	RESULTADOS	
	Condición actual (SV)	Restauración vegetal (CV)
Número de Curva del U.S.D.A.	86	79
Grupo Hidrológico	D	D
Clase textural promedio	Arcilla	Arcilla
Potencial máx. de retención después de las precipitaciones	36,70 mm	62,47 mm
Escorrentía	22,10 mm	13,43 mm
<b>CAUDAL DE DESCARGA</b>	18,13m <sup>3</sup> /s	9,85m <sup>3</sup> /s
<b>% de disminución</b>	<b>46%</b>	

\*SV: sin vegetación / CV: Con vegetación

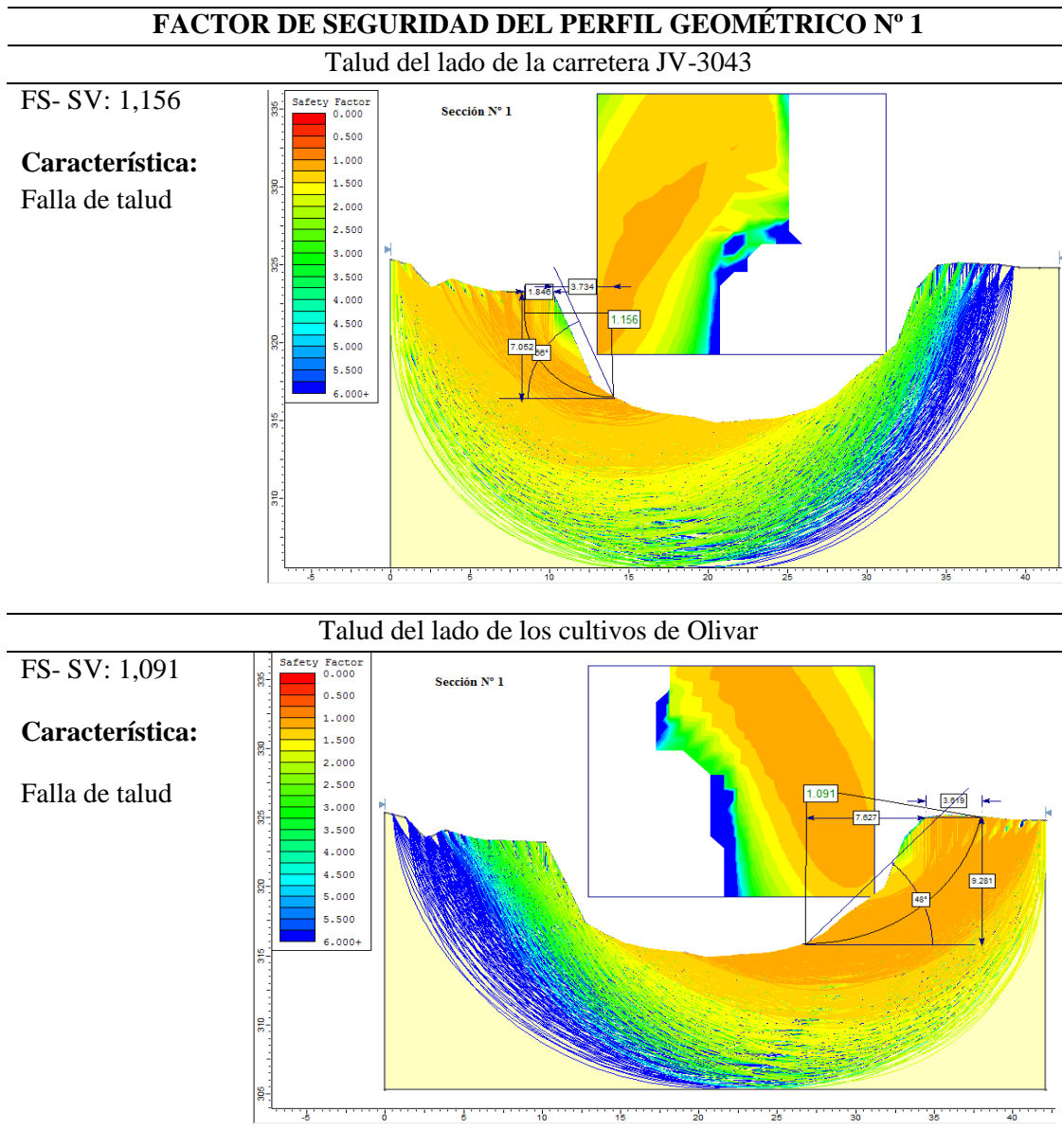
#### 4.5. Estabilidad de los taludes

Para estudiar la estabilidad de los taludes en el tramo de carretera de interés (ver Figuras 1 y 2 en el apartado 1.3) se establecieron cinco perfiles geométricos sucesivos, numerados en el sentido de “aguas abajo”, que cubrían todas las morfologías del talud detectadas en campo. Como indica la Figura 1, en el lado derecho del arroyo se encuentran los taludes que transcurren paralelos o contactan con la carretera JV-3043, mientras que los taludes izquierdos limitan con una ladera de olivar.

El perfil geométrico N° 1 se ubica cerca del canal de desagüe del vado de la carretera JV-3043 (Tabla 8), punto donde la cárcava adquiere súbitamente gran profundidad. El factor de seguridad sin vegetación (FS-SV) es 1,156 para el lado de la carretera con grado de inclinación del talud de 66°, altura de 7,052 m y el ancho de la ladera dentro del círculo de rotura es de 1,846m. En el lado de los cultivos de olivar se tiene un FS-SV de 1,091, el grado de inclinación del talud es de 48°, altura de 9,281 m y el ancho de la ladera dentro del círculo de rotura es de 3,619 m. En consecuencia, en el cultivo de olivar se tiene menor estabilidad en el talud y el mismo es más alto que el talud del lado

de la carretera. Aunque, desde el punto de vista teórico, todo  $FS > 1$  implica la estabilidad del talud, en la práctica no suelen aceptarse  $FS < 1,5$  ya que cualquier cambio en las condiciones del terreno podrían suponer, con  $FS$  próximos a 1, un cambio catastrófico en la estabilidad de la ladera (Ayala y Andreu, 1987).

**Tabla 8.** FS del perfil geométrico N° 1 de la zona con cárcava

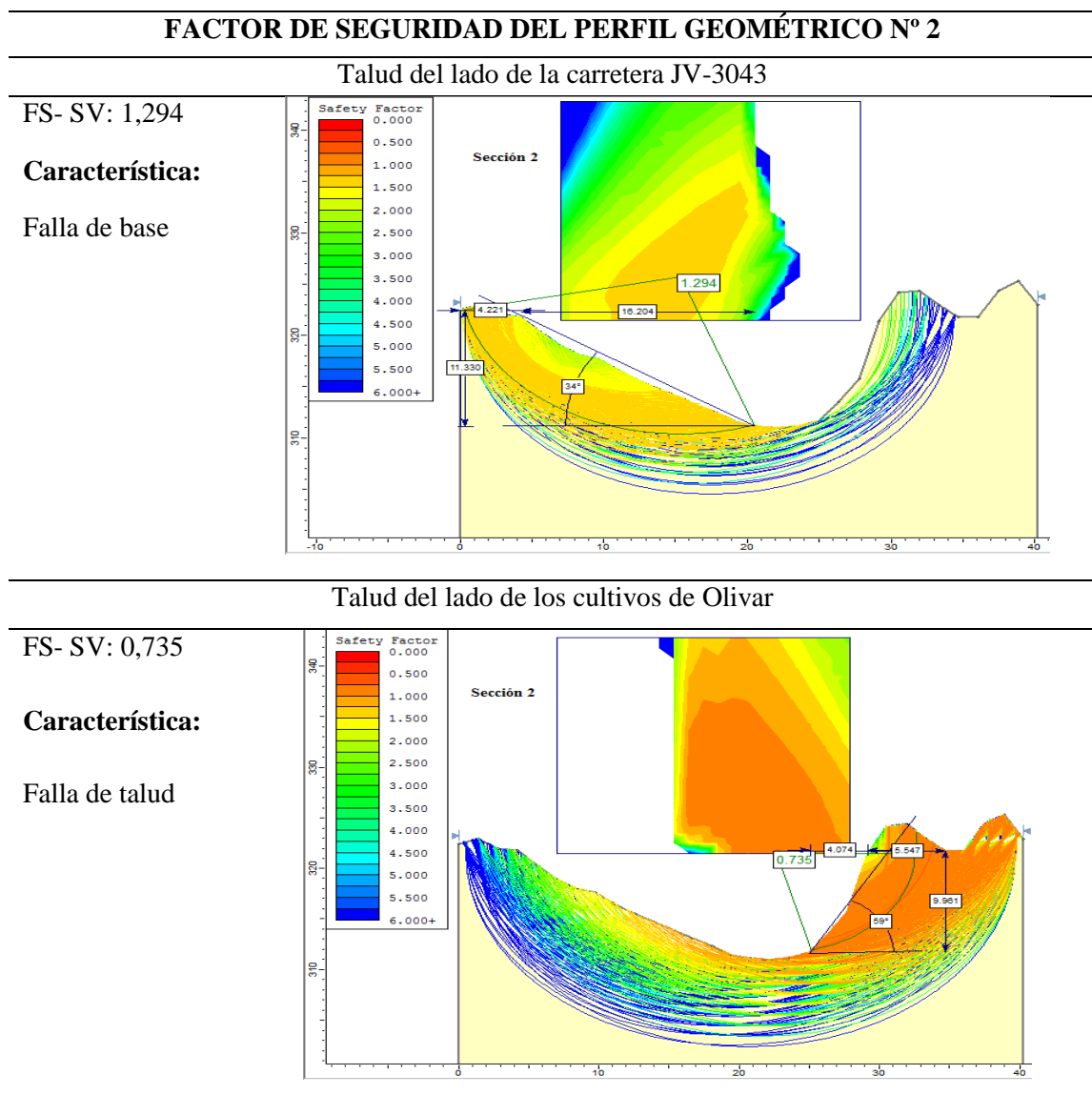


\*FS-SV: Factor de seguridad sin vegetación / FS-CV: Factor de seguridad con vegetación

\*Analizado con ArcMap 10.1y Slide v6.0

En el perfil geométrico N° 2 se caracterizan los taludes de la cárcava por una falla de base para el lado de la carretera JV- 3043 y falla de talud en la zona del olivar. El FS-SV del talud de la carretera es de 1,294 con altura de 11,330 m, el grado de inclinación es de 34° y ancho de la ladera dentro del círculo de rotura es de 4,221m. El talud de la zona de los cultivos de olivar tiene una altura de 9,961m, con grado de inclinación de 59° y el ancho de la ladera es de 5,547m, por lo que su FS-SV es de 0,735, cuyo valor es “Alto” en inestabilidad comparado con el talud de la zona de la carretera (Tabla 9).

**Tabla 9.** FS del perfil geométrico N° 2 de la zona con cárcava



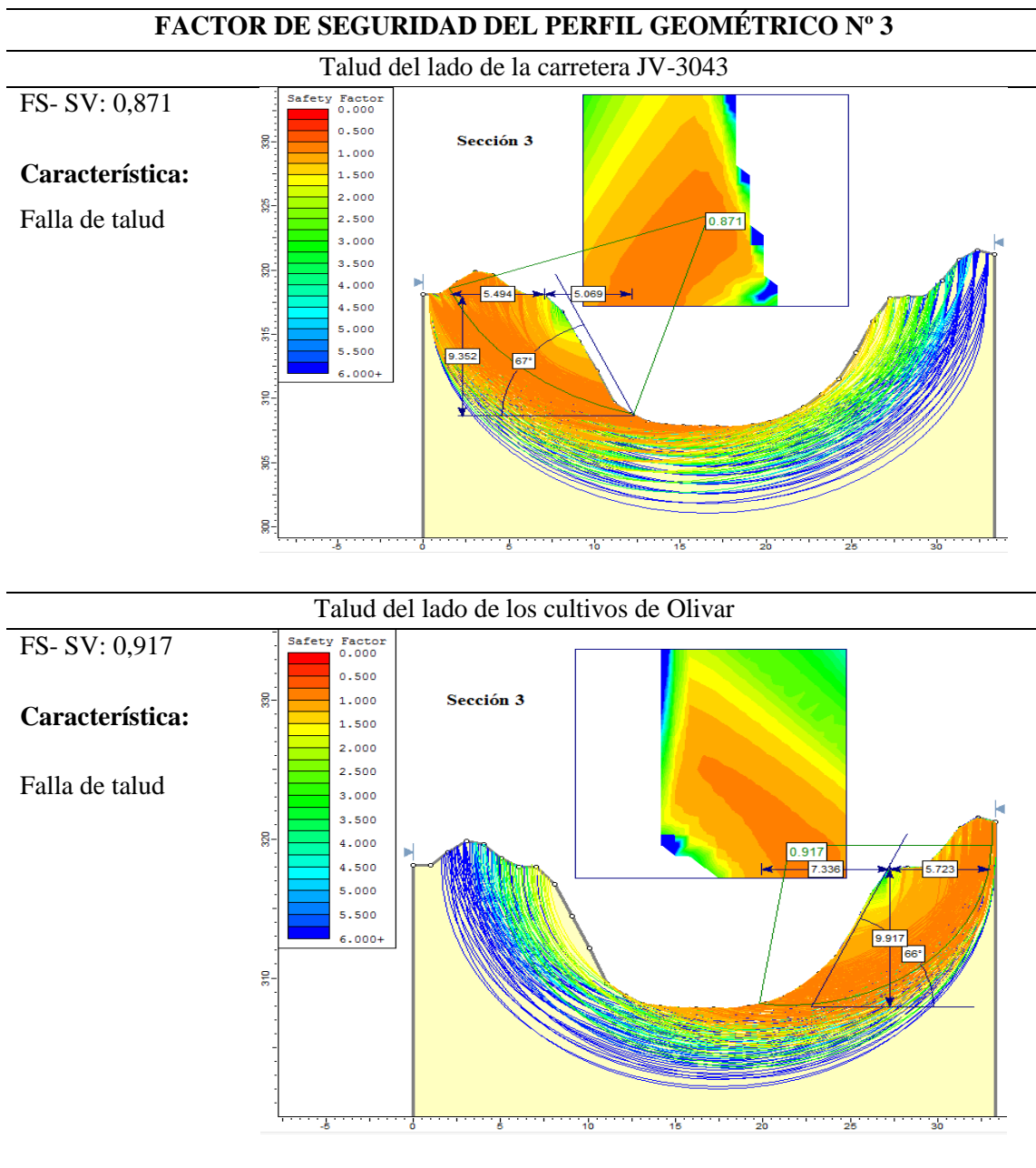
\*FS-SV: Factor de seguridad sin vegetación / FS-CV: Factor de seguridad con vegetación

\*Analizado con ArcMap 10.1y Slide v6.0

\*Elaboración propia

El perfil geométrico N°3 presenta el talud del lado de la carretera JV-3043 tiene un FS-SV de 0,871, la altura es de 9,352 m, con grado de inclinación de 67° y ancho en la zona de la ladera de 5,994 m. En el lado de los cultivos de olivar el FS-SV es de 0,917 del talud, con altura de 9,917 m, grado de inclinación 66° y ancho en la zona de la ladera de 5,723 m. Por lo tanto, en la sección 3 el FS es más alto en el talud de la carretera. En cualquier caso, los dos FS-SV de los taludes son totalmente inaceptables, e indican una gran susceptibilidad al ensanchamiento de la cárcava (Tabla 10).

**Tabla 10.** FS del perfil geométrico N° 3 de la zona con cárcava

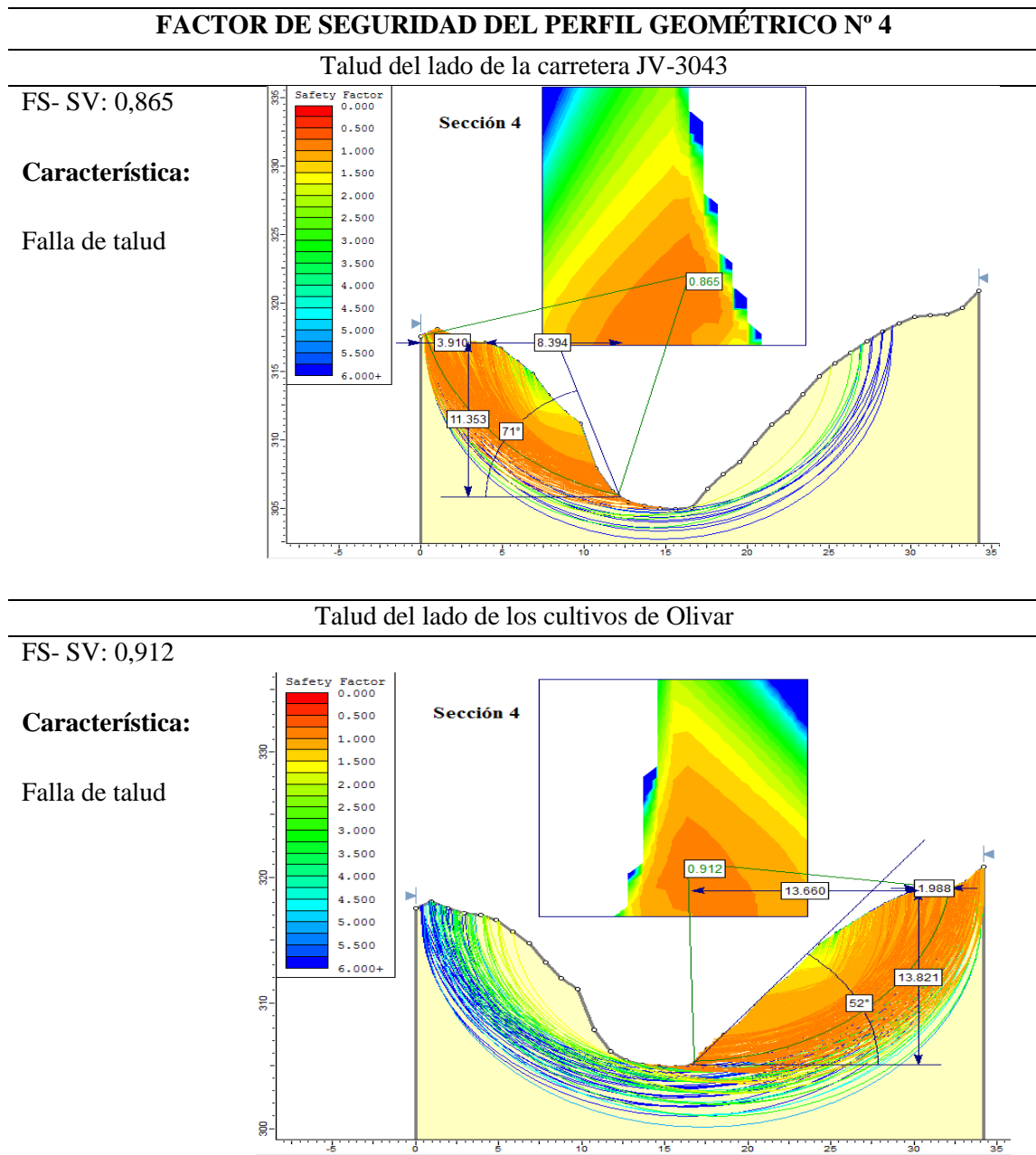


\*FS-SV: Factor de seguridad sin vegetación / FS-CV: Factor de seguridad con vegetación

\*Analizado con ArcMap 10.1y Slide v6.0

El FS-SV de 0,865 con altura en el talud de 11,353 m, con grado de inclinación de 71° y ancho de la ladera de 3,910 m para el lado de la carretera JV-3043 es más inestable que el talud del lado de los cultivos de olivar con FS-SV de 0,912. La altura de este talud es de 13,821 m, con grado de inclinación de 52° y con poco ancho de la ladera con 1,988 m. Esta diferencia en los taludes de la cárcava se debe al grado de inclinación más fuerte que hay en el talud de la carretera (Tabla 11).

**Tabla 11.** FS del perfil geométrico N° 4 de la zona con cárcava

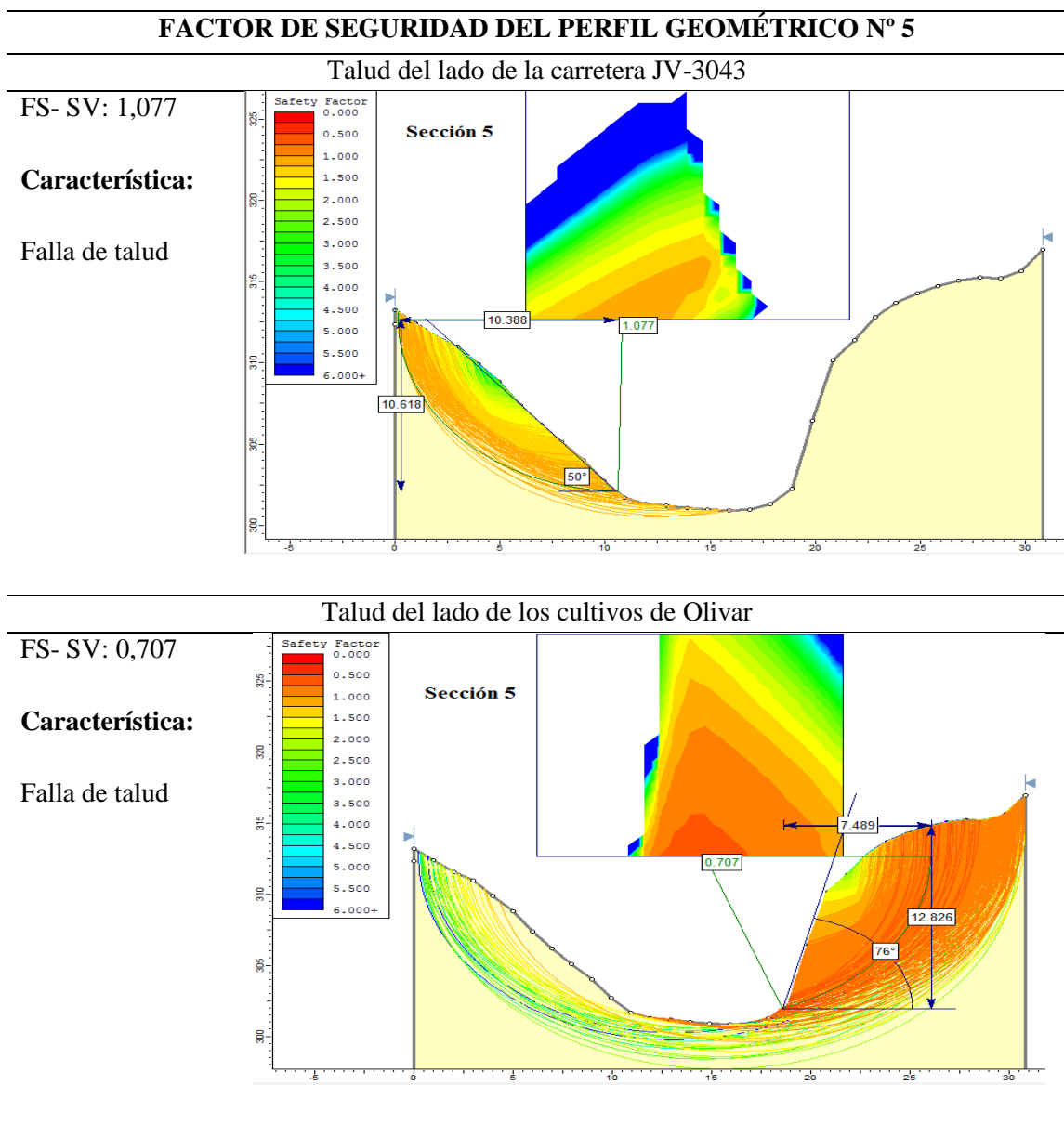


\*FS-SV: Factor de seguridad sin vegetación / FS-CV: Factor de seguridad con vegetación

\*Analizado con ArcMap 10.1y Slide v6.0

El perfil geométrico N° 5 se ubica cerca del deslizamiento de la carretera JV-3043 y se caracteriza esta sección por tener falla de talud. El FS-SV es de 1,077 con altura del talud de 10,618 m, con grado de inclinación de 50° y sin ancho en la zona de la ladera. En el lado de los cultivos de olivar se tiene un FS-SV de 0,707, la altura del talud es de 12,826 m, con grado de inclinación de 76° y con ancho en la ladera de 7,489 m. Por lo tanto, existe más inestabilidad en el talud del cultivo de olivar debido a su altura y grado de inclinación (Tabla 12), aunque de nuevo ambos FS desvelan preocupante inestabilidad.

**Tabla 12.** FS del perfil geométrico N° 5 de la zona con cárcava



\*FS-SV: Factor de seguridad sin vegetación / FS-CV: Factor de seguridad con vegetación




\*Analizado con ArcMap 10.1y Slide v6.0

El factor de seguridad de los taludes es “Bajo” para ambos lados del Arroyo Ibros. Dada la notable inestabilidad de los taludes de la cárcava, que explican el significativo incremento en anchura producido en las últimas décadas, se concluye que es absolutamente recomendable proceder a realizar alguna acción restaurativa de dichos taludes. La restauración de estos taludes puede emprenderse desde un punto de vista meramente ingenieril, a través de muros de contención (i.e. escolleras, gaviones, etc.) o a través de procedimientos bioingenieriles, siendo esta la alternativa contemplada en este trabajo.

Una vez decididos a emplear la bioingeniería como técnica restaurativa, en base a los objetivos que se han planteado en este trabajo, debemos decidir qué especies han de ser implantadas en los taludes, siguiendo la premisa básica de autoctonía. La bioingeniería de taludes ha avanzado de forma notable en algunos países, como USA o el norte de Europa, por lo que se disponen de tablas completas de las propiedades mecánicas de múltiples especies herbáceas, arbustivas y arbóreas propias de climas más húmedos y fríos (Norris *et al.*, 2008; Morgan y Rickson, 2011). No obstante, esta información es mucho más escasa en clima mediterráneo, y con plantas propias de nuestro entorno, característica que facilita el éxito (por su adaptación) de la actuación.

Entre los autores que han estudiado propiedades mecánicas de plantas mediterráneas autóctonas podemos citar a De Baets *et al.*, (2008, 2009) o Van Beek *et al.*, (2005). Dada la elevada profundidad de los taludes de la Cuenca Ibros (hasta 14 metros en el perfil 3), se hace necesaria la implantación de especies con aparatos radiculares lo más profundos posibles, en combinación con otras especies herbáceas de aparatos más someros pero densos (como las gramíneas). Se ha optado por una combinación recomendada por De Baets *et al.*, (2008), que incluye una gramínea perenne (*Brachypodium retusum*), un arbusto con raíces profundas (*Crataegus monogyna*) y una leguminosa pulviniforme (*Ulex parviflorus*), todas ellas autóctonas del Mediterráneo. Los valores promedio de las propiedades mecánicas de las tres plantas se detallan en la Tabla 13, como el ángulo de inserción de la raíz con la superficie de rotura de 45°, el peso específico o densidad de la vegetación con 2,5 kN/m<sup>3</sup>, fuerza tensil con 8 kN y la cohesión de la raíz con 3,5 kPa.

**Tabla 13.** Propiedades mecánicas de las plantas

Propiedades	Valores	Especies vegetales		
		a) <i>Brachypodium retusum</i>	b) <i>Crataegus monogyna</i>	c) <i>Ulex parviflorus</i>
Ángulo raíz (°)	45			
Peso específico de la vegetación (kN/m <sup>3</sup> )	2,5			
Fuerza tensil (kN)	8			
Cohesión de la raíz (kPa)	3,5			

Fuente: a) *Brachypodium retusum* (De Baets *et al.*, 2008); b) *Crataegus monogyna* (<http://www.bioscripts.net>); y, c) *Ulex parviflorus* (<http://www.carex.cat>)

Los valores más altos del incremento del FS por el efecto de la restauración se obtienen en la sección 1 del lado de la carretera (1,156 a 2,19) y en la sección 5 del lado de los cultivos de olivar (0,707 a 1,27). Los porcentajes promedio de reducción de la inestabilidad de los taludes son del 30,2% (lado de la carretera) y 33,86% (lado del olivar) (Tabla 14).

**Tabla 14.** Comparación de FS por el efecto de la vegetación en los taludes

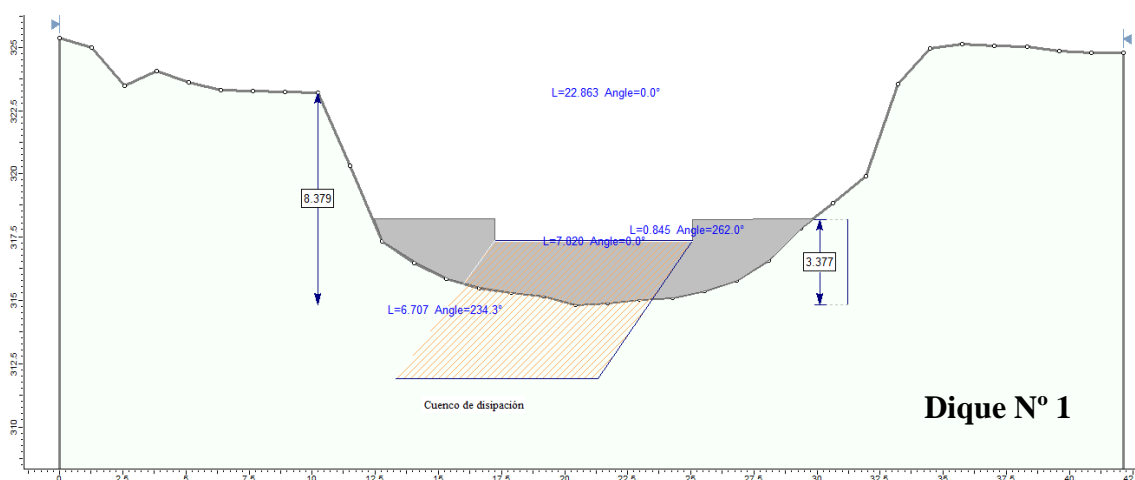
Nº Sección	Factores de seguridad					
	Talud del lado de la carretera (JV-3043)			Talud del lado de los cultivos de olivar		
	SV	CV	% incremento	SV	CV	% incremento
1	1,156	2,19	47,2	1,091	1,54	29,2
2	1,294	1,63	20,6	0,735	1,27	42,1
3	0,871	1,25	30,3	0,917	1,34	31,6
4	0,865	1,09	20,6	0,912	1,17	22,1
5	1,077	1,59	32,3	0,707	1,27	44,3
Promedio	---	---	30,2	---	---	33,86

\*SV analizado con el método de Fellenius / CV se aplicó el método simple

#### 4.6. Diseño de los diques de retención de sedimentos

El establecimiento y el distanciamiento de los diques en la longitud de estudio de cárcavas (0,60 km o 600 m) se realizó con el criterio de Heede (1976), que utiliza la pendiente de las cárcavas. Como la zona de flujo concentrado (cárcavas) de la cuenca Ibros tiene una pendiente de 3,35%, le corresponde un distanciamiento entre diques de 30 a 45 metros y aproximadamente  $\leq 10$  diques. Sin embargo, esta zona de la cuenca Ibros tiene pronunciados meandros, siendo de bastante sinuosidad el curso del arroyo. Como el autor antes citado destaca que se debe establecer los diques en zonas rectas (además de intervenir otros factores como el grado de inclinación y la altura de los taludes), se decidió establecer una pantalla de únicamente cinco diques, aprovechando los tramos de mayor desarrollo rectilíneo. A continuación se detallan los resultados del diseño de los diques, adaptados al perfil transversal del arroyo en cada uno de los cinco puntos elegidos.

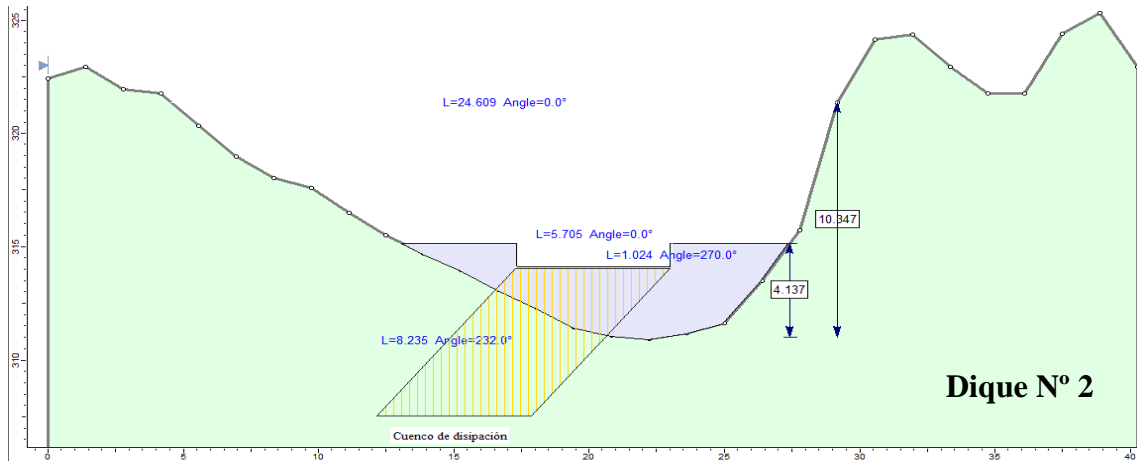
El dique N° 1 (Fig. 26) debe tener una altura de 3,377 m con ancho en la parte alta del dique de 17,413 m. El aliviadero se diseñó con un ancho de 7,020 m y con altura de 0,845 m. La longitud del cuenco de disipación es de 6,7032 m.



**Fig. 26.** Diseño del dique N° 1

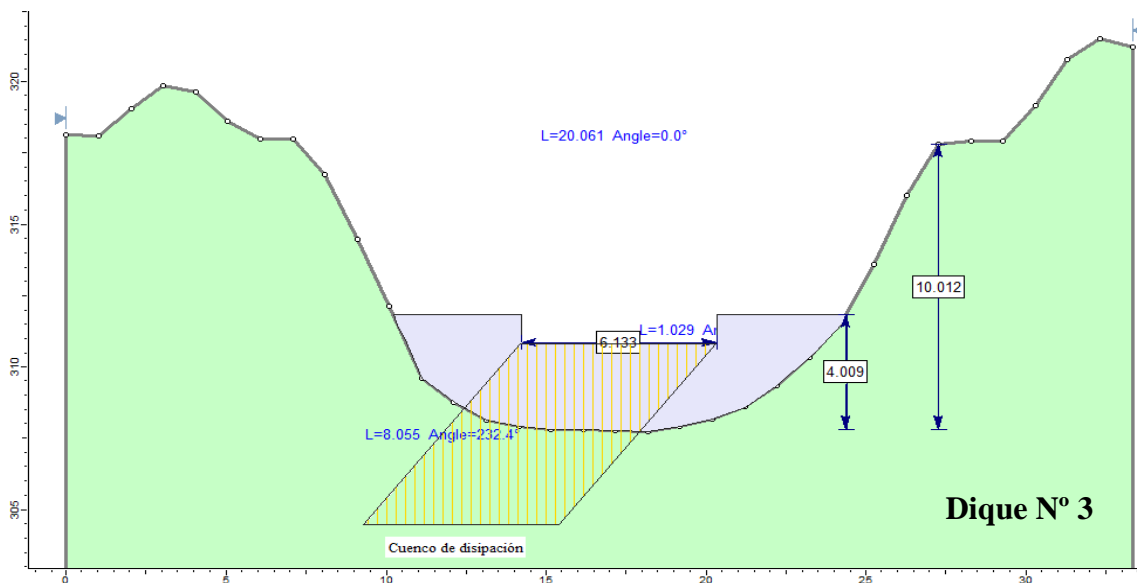
Elaboración propia.-

El dique N° 2 (Fig. 27) debe tener una altura de 4,137 m con ancho en la parte alta del dique de 14,237 m. La anchura del aliviadero es de 5,705 m y con altura de 4,137 m. La longitud del cuenco de disipación de 8,235 m.



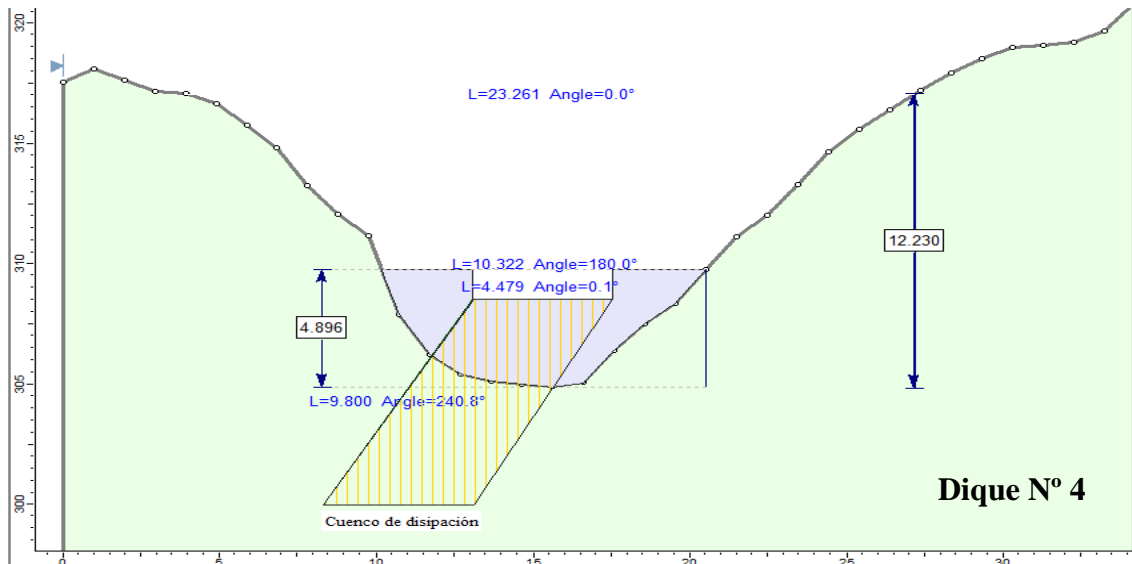
**Fig. 27.** Diseño del dique N° 2  
Elaboración propia.-

El dique N° 3 (Fig. 28) debe tener una altura de 4,009 m con ancho en la parte alta del dique de 14,168 m. La geometría del diseño del aliviadero debe tener un ancho de 6,133 m y con altura de 1,029 m. La longitud del cuenco de disipación es de 8,055 m.



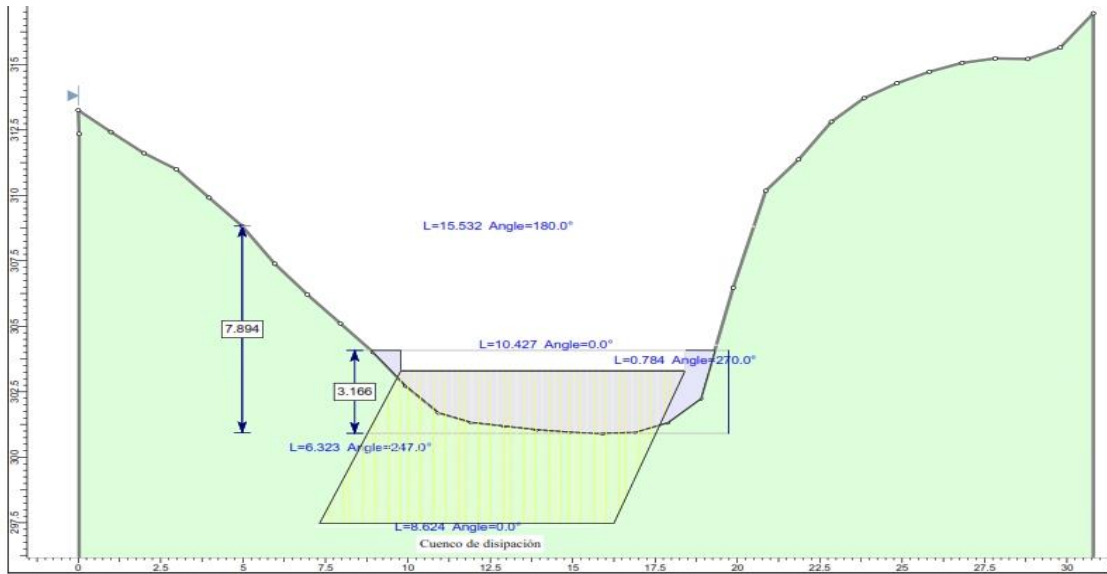
**Fig. 28.** Diseño del dique N° 3  
Elaboración propia.-

La geometría del dique N° 4 (Fig. 29) está diseñado con una altura de 4,896 m con ancho en la parte alta del dique de 10,322 m. El aliviadero debe tener un ancho de 4,479 m y con altura de 1,223 m. La longitud del cuenco de disipación es de 9,800 m.



**Fig. 29.** Diseño del dique N° 4  
Elaboración propia.-

Respecto al dique N° 5 (Fig. 30), no se consiguió un diseño funcional del mismo capaz de adaptarse a la sección transversal del arroyo en el punto previamente determinado. Esta dificultad se debió, principalmente, a la irregularidad y asimetría del perfil geométrico, que condicionaron un dique con altura de 3,166 m, y 10,427 m de anchura en la coronadura (parte más alta del dique). El problema que presenta este diseño es su incompatibilidad con la anchura del aliviadero calculada con la ecuación 9, 8,624 m, que ocuparía casi todo el ancho de la parte alta del dique. Las marcadas diferencias en los ángulos de inclinación del talud en las vertientes opuestas impiden calcular con precisión una altura máxima de la cárcava, a partir de la que fijar la anchura del dique en la coronadura y probar con distintos valores de las ecuaciones 8 y 9 hasta conseguir una relación anchura del aliviadero/ anchura del dique en la coronadura funcional (esta relación debe ser menor de 0,5). A pesar de los problemas de funcionalidad, incluiremos este dique en los cálculos del volumen de sedimento retenido.



**Fig. 30.** Diseño del dique N° 5  
Elaboración propia.-

La identificación de la sección idónea para el diseño de los cinco diques resultó ser difícil, debido a las características geométricas y a la sinuosidad de los 0,60 km de cárcavas de estudio. Sin embargo, se logró establecer los tramos lineales, a pesar de la influencia de los factores negativos de la zona como los grados de inclinación, ancho de la cárcava, las elevadas profundidades (alturas), la irregularidad de las secciones transversales y el material blando que no soporta estructuras de diques más compactas como presas de arco.

Una vez establecido el diseño geométrico del dique, queda decidir qué tipo de dique se adaptaría mejor a la misma. En nuestra opinión, los diques de gaviones serían una alternativa eficiente, aunque los caudales de diseño están en el límite superior de lo aceptable para este tipo de diques ( $20 m^3$ , según Desta y Adugna, 2012), teniendo poco margen de seguridad. En cualquier caso, dado el material blando y arcilloso del lecho y los taludes de la cárcava, no sería posible establecer diques más sólidos de material impermeable, como diques de mampostería o de arco, debido a que las cargas hidráulicas generarían solicitaciones en la cimentación inasumibles por un material tan poco competente como el arcilloso.

#### 4.6.1. Volumen de sedimentos retenidos

La Tabla 15 muestra el volumen total de sedimentos que se retendrán en el tramo de cárcavas de estudio, se obtiene mediante la suma de los volúmenes totales de sedimentos retenidos por cada dique. El volumen aproximado de sedimentos es 15.441,06  $m^3$  en una longitud de 438,23  $m$ .

**Tabla 15.** Volumen de sedimentos que podrían retener los diques

<b>Nº Dique</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Volumen (<math>m^3</math>)</b>
<b>1</b>	2,523	16,103	35,33	1435,38
<b>2</b>	3,192	11,859	113,77	4306,64
<b>3</b>	3,093	13,031	137,84	5555,63
<b>4</b>	3,651	9,126	64,04	2133,42
<b>5</b>	2,385	9,657	87,27	2009,99
<b>TOTAL</b>			<b>438,23</b>	<b>15.441,06</b>

## 5. Discusión de resultados

La cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros posee una superficie de  $25,44 \text{ km}^2$  y una longitud hidrológica más larga de  $15,68 \text{ km}$  con presencia de una potente erosión en cárcavas. Se caracteriza por el uso mayoritario del suelo en olivar convencional ( $> 90\%$ ), este tipo de agricultura se estableció en la zona a partir del año 1956 hasta la actualidad. En comarcas donde el uso del suelo predominante es el olivar, las densidades de cárcavas son del orden de  $1 \text{ km} / \text{km}^2$ , que luego la cuenca superaría ampliamente este valor medio (Gómez, 2015). Para Amiri *et al.*, (2019) la erosión en cárcavas ocurre en los suelos de textura débil y loess (depósitos sedimentarios arcillosos de origen eólico), así como en las litologías blandas de las regiones áridas y semiáridas, condiciones ambas que se dan en nuestra cuenca hidrográfica Ibros, cubriendo una la mayor superficie con textura arcillosa ( $2.503 \text{ ha}$ ).

Mongil y Navarro (2012) emplearon en su investigación el modelo del NC en tres puntos de muestreo en laderas de cultivos cerealistas de Valladolid, obteniendo a partir de la textura suelos los grupos hidrológicos C y D, con una tendencia hacia el grupo B en el bosque. Bajo la misma metodología de NC, se obtuvo suelos tipo D y B en la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros. Estos autores destacan que el uso de los SIG es esencial en la metodología de NC. Esto coincide con Camarasa *et al.*, (s.f.) que utilizaron el método de curvas de nivel para la estimación del umbral de escorrentía empleando la herramienta SIG. En uno de los escasos estudios que aplican el modelo del NC al olivar, Romero *et al.*, (2007) comparan la asignación de grupos hidrológicos del suelo en función de la textura, con mediciones propias de la velocidad de infiltración en campo (infiltrómetro de doble anillo) en parcelas con cubierta y sin cubierta. Concluyen que la estimación de la velocidad de infiltración en función de la textura funciona muy bien en el caso de los suelos bajo cultivo convencional (sin cubierta), pero no se ajusta del todo bien a los suelos con cubierta, donde la velocidad de infiltración fue superior a lo predicho en función de la textura. Esto implica que los NC en olivar con cubierta son menores que los predichos según la Guía USDA-NRCS (1986), generando menos escorrentías y descargas de lo esperado. El NC y el grupo hidrológico están directamente relacionados con la escorrentía total producida. En nuestro caso, se obtuvo para la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros un valor de

22,10 mm en la condición actual (cultivo convencional sin cubierta). Según Carvajal (2017), de todos los procesos hidrológicos, la escorrentía es el que más atención requiere debido a sus potenciales efectos en la conservación y degradación de los recursos naturales.

Según Plaza y Rodríguez (2013), los parámetros del suelo de densidad ( $\gamma$ ), cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción ( $\varphi'$ ) resultan ser los que determinan el comportamiento que tendrá la ladera. En el análisis de FS de las cárcavas de Ibros se incluyeron los parámetros de resistencia residuales del suelo:  $c'$  de 12,00 kPa y  $\varphi'$  de 19,10° en condiciones de no saturación del suelo. Sin embargo, el nivel freático es también un factor importante en relación con las tensiones efectivas; tal como sucede en los climas subtropicales con la inestabilidad de los taludes que derivan en deslizamientos. Los FS de los taludes del Arroyo Ibros se obtuvieron por el método Fellenius (Método de dovelas). Los resultados del autor antes mencionado acerca de la comparación de los FS obtenidos para las superficies potenciales de falla (SPF) en Chile, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, confirma que Fellenius es más conservador (FS bajos) que otros modelos como Bishop y Janbú, lo que es deseable puesto que permite un mayor margen de seguridad respecto a las roturas. Así mismo, Plaza y Rodríguez (2013) recomiendan el método de Fellenius porque simplifica notablemente el procedimiento de cálculo a la hora de abordar el problema de la estabilidad. Por ejemplo, Firdaus *et al.*, (2017) utilizó el Método de Dovelas con Fellenius para analizar un talud de una Planta Hidroeléctrica X de la Provincia de Sulawesi – Indonesia.

Los resultados del área de estudio de la cuenca del Maharloo de la Provincia de la Fars, Irán demuestra que la mayor parte de la erosión en cárcavas ocurrió cuando las precipitaciones eran de alta intensidad (Amiri *et al.*, 2019). Es así que la variación estacional del clima y la gran irregularidad de precipitaciones en el Mediterráneo contribuyen a la exportación de sedimentos, generando una gran escorrentía superficial que se crea en las avenidas dando origen a una intensa erosión mecánica en el conjunto de la cuenca (Ayala *et al.*, 1986). Tal como sucedió en el 2009 en el Arroyo Ibros, con una inundación repentina en la cuenca que generó un caudal extraordinario superior a 150 m<sup>3</sup>/s (Del Moral-Erencia y Bohorquez, 2017). En función de este antecedente, nuestros resultados predicen precipitaciones de 48,94 mm/día en un periodo de retorno

de 10 años. Las precipitaciones máximas en un día deben ser bastante superiores si considerásemos periodos de retorno de 25, 50 o 100 años (estos últimos, del orden de los tratados por Del Moral-Erencia y Bohorquez). Sin embargo, desde el punto de vista de la restauración de cárcavas, se tiende a recomendar actualmente el empleo de periodos de retorno de diez años (Gómez *et al.*, 2011). Según Castillo *et al.*, (2013), la erosión por flujo concentrado es la que genera cárcavas principalmente en las zonas de vaguada, en su estudio realizado en varias explotaciones de cultivos herbáceos en la cuenca del Arroyo Galapagares, ubicado en la Provincia de Córdoba, España en los años 2010 al 2012, coincidentes en parte con dos años de cuantiosas lluvias, determinó que sólo como consecuencia del aumento de tamaño de las cárcavas se perdió una cantidad equivalente de suelo de 6 cm en el conjunto de la superficie de la cuenca. Por lo tanto, se perdió en tres años lo que naturaleza requiere de siglos para su formación.

Los factores de seguridad de los taludes se encuentran con valores por debajo de 1,29 para ambos lados del Arroyo Ibros. El Anejo Nacional Español del Eurocódigo EC-7 establece un  $FS \geq 1,5$  para cimentaciones de obras de carreteras que pueden afectarse por acciones permanentes, tanto favorables como desfavorables, estructurales o geotécnicas, incluyendo las cargas gravitacionales debidas al peso del terreno o al agua (Estaire *et al.*, 2016). Entonces, los FS de 1,156; 1,294; 0,871; 0,865; y 1,077 determinados en los cinco taludes del Arroyo Ibros ubicados cerca de la carretera JV-3043 están por debajo del límite admitido por el Anejo Nacional Español. En el estudio Firdaus *et al.*, (2017) cálculo un FS de 1,132 no aceptable dentro del límite de seguridad establecido por Minister of Public Work Indonesia Regulation No: 22/PRT/M/2007 para una Planta Hidroeléctrica X de Indonesia.

De Baets *et al.*, (2008) publican coeficientes de cohesión y fuerza tensil de las plantas, entre ellas está la *Brachypodium retusum*, *Crataegus monogyna* y *Ulex parviflorus* pertenecientes al sotobosque natural de España, de tipo arbusto y césped. La revegetación con estas especies, al menos a nivel teórico, arrojó como resultado un incremento del FS medio con respecto a los taludes no revegetados entre un 30,20% y 33,86%. De Baets *et al.*, (2008) detalla que la especie *Brachypodium retusum* tiene raíces fuertes y aumenta la resistencia al cizallamiento del suelo de (100 a 244) kPa; se pueden plantar en las paredes de las pendientes para estabilizar el suelo de 0–0,20 m.

*Crataegus monogyna*, para Norris *et al.*, (2008), es una planta con efectos positivos para los deslizamientos de taludes ya que puede vivir por más de 100 años, por tanto, su efecto es prolongado en la estabilización de taludes. Así también, estos autores describen que una combinación de especies arbustivas y herbáceas es más efectiva que el empleo de cubiertas monoespecíficas, ya que mejoran la cohesión ( $c'$ ), debido a las raíces finas y densas de las gramíneas (*Brachypodium retursum*), a la vez que se genera una mayor fuerza tensil de anclaje en profundidad, debido a las raíces leñosas y profundas de los arbustos (*Crataegus monogyna*, *Ulex parviflorus*). Respecto a especies genistoides como *Ulex Parviflorus*, Preti y Giardrossich (2009) indican que presentan las características aún más favorables de las especies herbáceas y arbustivas, ya que generan una alta densidad o concentración de raíces fibrosas de pequeño diámetro y profundas que penetran la superficie de rotura potencial, aumentando la estabilidad de taludes. Otro criterio de selección de plantas para taludes adyacentes a carreteras es que debe considerarse factores como la tolerancia a la sal de las plantas, su resistencia al viento y la contaminación, y los niveles de mantenimiento requeridos (MacNeil *et al.*, 2001), aspecto este último que se reduce al mínimo por tratarse de especies autóctonas mediterráneas.

La morfología de cárcavas del Arroyo Ibros representa un ecosistema global de la cuenca hidrográfica degradada. Y, para Mongil *et al.*, (2015) este problema de cárcavas se debe al soleamiento excesivo del estío como también se ve retroalimentada y favorecida por la falta de vegetación leñosa protectora y la torrencialidad de la lluvia. Para la cuenca hidrográfica del Arroyo Ibros se propone la restauración con vegetación. Entonces, basado en las conclusiones de Mongil *et al.*, (2015) en su estudio de “Restauración forestal en cárcavas”, refiere que el establecimiento de un bosque formado mayoritariamente por especies del género *Pinus* (Sierra Ávila – Centro de España) ha solucionado casi totalmente los graves problemas de erosión laminar, en regueros, en cárcavas y en barrancos, en un plazo bastante corto de tiempo (unos 20 años), y se ha incidido positivamente en los procesos de edafogénesis y en la regularización del ciclo hidrológico. Por consiguiente, Taguas *et al.*, (2010) describe que entre las mejores estrategias de manejo del suelo en Olivar son las medidas de revegetación en la cabecera, el establecimiento de elementos transversales de retención y el no laboreo en las inmediaciones de las cárcavas. Dichas medidas se asocian a los resultados positivos que se han obtenido en este trabajo, demostrando una disminución

del 46% del caudal de descarga si se estableciera vegetación en la cuenca Ibros, es decir de  $18,13m^3/s$  a  $9,85m^3/s$ . Así también, del 30,2% (vertiente paralela a la carretera) y 33,86% (vertiente paralela a los cultivos de olivar) de reducción de la inestabilidad de los taludes y se retendría sedimentos con diques en un volumen de  $15.441,06 m^3$ .

El estudio de los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión, realizado en 425 diques del río Quipar, afluente del río Segura, Región de Murcia (España), demuestra que la cuarta parte de los diques funcionales sobre margas, margocalizas, conglomerados cuaternarios, aluviones y arenas estarán aterrados en tan solo 10 años; el 90% de los diques sobre margas y margocalizas (Romero, 2015). En nuestro caso, en la cuenca del arroyo Ibros se espera que los cinco diques propuestos con capacidad de almacenar un volumen aproximado de  $15441,06 m^3$  se colmaten con rapidez; ya que el  $2420,65 ha$  de la cuenca hidrográfica Ibros está sobre materiales de mioceno (areniscas, conglomerados, arcillas, calizas y evaporitas); y, según el autor antes mencionado refiere que en los procesos de erosión-sedimentación tiene una gran importancia la litología, habiéndose observado como los diques construidos sobre margas y margocalizas presentan unas tasas de erosión muy altas llegando a colmatarse en pocos años. En el caso de diques de gaviones, como el que aquí se propone, la colmatación es un efecto deseable, ya que posteriormente pueden añadirse de forma sencilla y poco costosa nuevos gaviones a la estructura colmatada, con lo que se va produciendo un relleno efectivo de todo el volumen de la cárcava (Desta y Adugna, 2012). Por otra parte, la colmatación del dique supone un refuerzo a pie de talud que sin duda aumentaría notablemente el factor de seguridad, presentando un efecto sinérgico positivo a todos los niveles.

El volumen de retención calculado ( $15.441,01 m^3$ ) para los cinco diques propuestos para el tramo de cárcavas de Ibros, se puede ver influenciado por la textura arcillosa que caracteriza a la mayor área de la cuenca Ibros ( $2.503 ha$ ). Las litologías arcillosas serían un problema para la acumulación sedimentos y la funcionalidad de los diques. Para Ramos (2014), es otro de los aspectos que se debe tener en cuenta para la eficacia de los diques en la retención de sedimentos, ya que las partículas de menor tamaño, como las arcillas, tienden a continuar en suspensión y atravesar el dique con las aguas de arroyada sin ser retenidas. Pero el asumir la posible pérdida de sedimentos y la

consiguiente disminución en la retención, no puede servir para desacreditar el alto nivel de sedimentos que pueden retener los diques. En cuencas extensas el aporte de sedimentos se da también por deslizamientos de taludes con factores de seguridad bajos, tal como el tramo de cárcavas del arroyo Ibros (entre la carretera JV-3043 y deslizamiento) con un valor máximo de FS en la condición actual de 1,294 (Sección 2, talud del lado de la carretera). Por todo lo anterior, creemos que la solución propuesta sería operativa desde el punto de vista de la restauración agro-hidrológica, por lo que unas de las perspectivas futuras de este trabajo pasarían por el establecimiento en campo de todas estas medidas (diques, revegetación) y la valoración de su efectividad real a medio y largo plazo.

## 6. CONCLUSIONES

El uso del SIG fue fundamental para caracterizar la cuenca hidrográfica y obtener perfiles geométricos de las cárcavas. La cuenca hidrográfica del arroyo Ibros posee 2.544,32 *ha* y la longitud hidrológica más larga mide 15,68 *km*, que representa el trayecto de viaje que recorre la gota de lluvia hasta la desembocadura de la cuenca al Río Guadalimar. Los cultivos de olivar convencional, sin cobertura herbácea, ocupan la mayor parte del área con 2.292 *ha*, y 2.503 *ha* presenta suelos de textura arcillosa. Por lo tanto, la cuenca del Arroyo Ibros se clasifica dentro del grupo hidrológico D y se le asigna un NC promedio de 86 para las condiciones actuales.

La estabilidad de los taludes para ambos lados del Arroyo Ibros con el Método de Dovelas analizado con la metodología de Fellenius, nos permitió obtener los factores de seguridad que son considerados “Inaceptables”, donde el valor máximo de FS es de 1,29. Los taludes de las cárcavas tienen problemas de fallas de talud y de base. Los grados de inclinación son mayores del 50°, con alturas que inician desde los 7,05 *m* hasta 13,82 *m*. Dentro del círculo de rotura de las laderas se tienen anchos desde 0 *m* hasta 5,72 *m* que representa la masa que caerá de forma inmediata o progresiva desde la parte alta del talud. Los FS de los taludes ubicados en el lado de la carretera JV-3043 no cumplen con un  $FS \geq 1,5$  del Anejo Nacional Español del Eurocódigo EC-7 para construcciones de carreteras, lo que explica las graves incidencias geotécnicas en la vía.

La restauración en la cuenca hidrográfica Ibros se basa en establecer vegetación autóctona del Mediterráneo, tanto en los olivares como en los taludes del arroyo. Los resultados simulando las condiciones de cobertura vegetal en los olivares de la cuenca son positivos, obteniendo una reducción de escorrentía de 22,10 *mm* a 13,43 *mm* y un caudal de descarga de 18,13 *m*<sup>3</sup>/*s* a 9,85 *m*<sup>3</sup>/*s*; por lo tanto, la disminución es del 46%. El establecimiento de las especies de plantas *Brachypodium retusum*, *Crataegus monogyna* y *Ulex parviflorus* como técnica de restauración en los taludes, incrementa el FS en ambos lados del Arroyo Ibros, reduciendo la inestabilidad en un promedio del 30,2% (vertiente paralela a la carretera) y 33,86% (vertiente paralela a los olivares). Como medida transversal de corrección hidrológica se proponen cinco diques para la retención de sedimentos, el volumen probable de colmatación es de 15.441,06 *m*<sup>3</sup>.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdulfatai, I. A., Okunlola, I. A., Akande, W. G., Momoh, L. O., y Ibrahim, K. O. (2014). Review of Gully Erosion in Nigeria: Causes, Impacts and Possible Solutions. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(3), 125–129. <https://doi.org/10.12691/JGG-2-3-8>
- Amiri, M., Pourghasemi, H. R., Ghanbarian, G. A., y Afzali, S. F. (2019). Geoderma Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*, 340(January), 55–69. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.042>
- Ashiagbor, G., Forkuo, E. K., Laari, P., y Aabeyir, R. (2013). Modeling soil erosion using Rusle and GIS tools. *International Journal of Remote Sensing y Geoscience (IJRSG)*, 2(4), 17.
- Ayala Carcedo, F., y Andreu Posse, F. J. (1987). *Manual de Ingeniería de Talúdes*. (IGME, Ed.). Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia de España.
- Ayala Carcedo, F., Carballal Puente, L., Duran Valsero, J. J., Hernández Ruiz, M., Jorda Pardo, J. F., Soria Mingorance, J., y Del Valle de Lersundi Manso, J. (1986). *Los problemas de erosión-sedimentación en España: Una perspectiva geológica*. Madrid.
- Calero González, J., Sánchez Gómez, M., Fernández, T., Tovar, J., y García Ruiz, R. (2019). Panorama de la erosión del olivar de Jaén: procesos, metodologías y significación económica y ambiental. *Grandes Cultivos*, 23, 10–14.
- Camarasa, A. M., López García, M. J., y Pascual, J. A. (s.f.). Análisis mediante SIG de los parámetros de producción de escorrentía. *El Acceso a La Información Espacial y Las Nuevas Tecnologías Geográficas*, 49–64.
- Carey, B. (2006). Gully erosion. *Queensland Government Natural Resources and Water*, (March), 4.
- Castillo, C., y Gómez, J. A. (2016). A century of gully erosion research: Urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, 160, 300–319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009>
- Castillo, C., Mora, J., Taguas, E., y Gómez, J. A. (2013). Algunas notas sobre la erosión de suelos en la provincia de Córdoba. *Arvícola*, 4, 7–17.
- Coppin, N. J., y Richards, I. G. (2007). *Use of vegetation in civil engineering* (2nd ed.). London: Construction Industry Research y Information Association (CIRIA).

- Croke, J., y Mockler, S. (2001). Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, Southeastern Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 205–217.
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Muys, B., De Baerdemaeker, J., y Meersmans, J. (2009). Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: application to a Mediterranean ecosystem. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 1374–1392. <https://doi.org/10.1002/esp>
- De Baets, S., Poesen, J., Reubens, B., Wemans, K., De Baerdemaeker, J., y Muys, B. (2008). Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. *Plant and Soil*, 305(1–2), 207–226. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9553-0>
- Del Moral-Erencia, J. D., y Bohorquez, P. (2017). Reconstrucción paleohidráulica de caudal, escorrentía y precipitación durante inundaciones torrenciales en una pequeña subcuenca del río Guadalquivir. *Proceedings de La V Jornada de Ingeniería Del Agua*, 02, 1–10.
- Desta, L., y Adugna, B. (2012). *A Field Guide on Gully Prevention and Control. Ethiopia.*
- Díaz Carvajal, Á., y Mercado Fernández, T. (2017). Determination of curve number in Betancí subwatershed (Córdoba, Colombia) through remote sensing and GIS. *Ingeniería y Desarrollo*, 35, 452–470.
- Díaz Gutiérrez, V., Mongil Manso, J., Navarro Hevia, J., y Ramos Díaz, I. (2012). Erosión en cárcavas : una revisión de los efectos de los diques forestales. In *Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales* (pp. 1–29).
- Estaire Gepp, J., Pardo, F., y Perucho Martínez, Á. (2016). Theoretical framework for the Spanish National Annex to Eurocode 7 (Geotechnical Project). *Ingeniería Civil*, 7, 5–26.
- Firdaus, M., Nayoan, A., Rachman, S., y Pramudhito, H. (2017). Slope analysis with Fellenius Method in Hydroelectric Powerplant X, Southeast Sulawesi Province. In *The 2nd Join Conference of Utsunomiya University and Universitas Padjadjaran* (pp. 190–194). Jakarta. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/145224497.pdf>
- Gómez, J. A. (2015). Procesos erosivos en olivar en Andalucía a diferentes escalas: entendimiento, magnitud, implicaciones e intentos de control. *Cordova: Actas de las IV Jornadas de Ingeniería del Agua.*
- Gómez, J. A., Battany, M., Renschler, C. S., y Fereres, E. (2003). Evaluating the impact of soil management on soil loss in olive orchards. *Soil Use and Management*, 19, 127–134. <https://doi.org/10.1079/SUM2002179>

- Gómez, J. A., Sobrinho, T. A., Giráldez, J. V., y Fereres, E. (2009). Soil management effects on runoff, erosion and soil properties in an olive grove of Southern Spain. *Soil and Tillage Research*. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.05.005>
- Gómez, J. A., Taguas, E. V., Vanwalleghem, T., Giráldez, J. V., Sánchez, F., Ayuso, J. L., Mora, J. (2011). Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación de paisajes agrarios. Sevilla: Junta de Andalucía, Consejería de Agricultura y Pesca.
- González García, F., Hoyos de Castro, A., Martín Aranda, J., y Boza López, J. (1989). Memoria de mapa de suelos de Andalucía, escala 1:400.000. Madrid: Junta de Andalucía, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Sevilla).
- Hayas, A., Vanwalleghem, T., Laguna, A., Penã, A., y Giráldez, J. V. (2017). Reconstructing long-term gully dynamics in Mediterranean agricultural areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 235–249. <https://doi.org/10.5194/hess-21-235-2017>
- Heede, B. (1976). *Gully Development and Control* (USDA Fores). Colorado.
- Herrador Lindes, I., y Martín Mesa, A. (2014). Informe de Ejecución 2013 del II Plan Estratégico de la provincia de Jaén. Jaén. Recuperado de <https://www.planestrajalen.org/centro-documental/informe-de-ejecucion/informe-de-ejecucion-2013.html>
- Honorato, R., Barrales, L., y Barrera, I. P. F. (2001). Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX Región de Chile. *Ciencia e Investigación Agraria*, 7–14.
- IGME. (1994). Mapa Geológico de España a escala 1:1.000.000 en formato digital. Recuperado de <http://www.igme.es/>
- Inwangana, F. M., Vandecasteele, I., Trefois, P., Ozer, P., y Moeyersons, J. (2015). The origin and control of mega-gullies in Kinshasa (D.R. Congo). *CATENA*, 125, 38–49. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2014.09.019>
- INES. (2006). Inventario Nacional de Erosión de Suelos, escala 1: 250.000 de la Provincia de Jaén. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de España.
- Jonte, M., Navarro, J., y San Martín, R. (s.f.). Métodos de estimación de la erosión hídrica: Aplicación a los taludes de infraestructuras viarias en Palencia (España).
- Jungerius, P. D., Matundura, J., y Van de Ancker, J. A. M. (2002). Road construction and gully erosion in West Pokot, Kenya. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1247, 1237–1247. <https://doi.org/10.1002/esp.423>

- Junta de Andalucía, Universidad de Córdoba, y Consejo Superior de Investigación Científica. (2014). Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructura de obra civil. Córdoba.
- Katz, H. A., Daniels, J. M., y Ryan, S. (2014). Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 285–295. <https://doi.org/10.1002/esp.3443>
- Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., y Baets, S. De. (2008). The effect of conservation tillage on runoff erosivity and soil erodibility during concentrated flow. *Hydrological Processes*, 1508(September 2007), 1497–1508. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation and Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Lal, R. (2002). *Encyclopedia of soil science (Second)*. New York: Marcel Dekker.
- Mabit, L., Chhem-kieth, S., Toloza, A., Vanwalleghem, T., Bernard, C., Infante, J., ... Gómez, J. A. (2012). Agriculture , Ecosystems and Environment Radioisotopic and physicochemical background indicators to assess soil degradation affecting olive orchards in southern Spain. “Agriculture, Ecosystems and Environment,” 159, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.06.014>
- MacNeil, D. J., Steele, D. P., McMahon, W., y Carder, D. R. (2001). *Vegetation for slope stability*. TRL Limited. Wokingham.
- MAGRAMA. (2015). Encuesta de superficies y rendimientos de cultivos. Ministerio de Agricultura. Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. Recuperado de [http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2015\\_tcm7-424015.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2015_tcm7-424015.pdf)
- Martínez-Valderrama, J., Ibáñez, J., Del Barrio, G., Sanjuán, M. E., Alcalá, F. J., Martínez-Vicente, S., Puigdefábregas, J. (2016). Present and future of desertification in Spain: Implementation of a surveillance system to prevent land degradation. *Science of the Total Environment*, 563–564, 169–178. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.065>
- Martínez Menes, M., Fernández Reynoso, D., y Salas Martínez, R. (2012). Hidrología aplicada a las pequeñas obras hidráulicas. Texcoco.
- Maya, Y. (2011). Diagnóstico ambiental de suelos erosionados. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13, 169–179.
- Mongil, J., y Navarro, J. (2012). Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38(1), 131–153.

- Mongil, J., Navarro, J., y Díaz, V. (2015). Esquema ecológico aplicado a una restauración forestal en cárcavas de la Sierra de Ávila (Centro de España). *Madera Bosques*, 21(1), 11–19.
- Montgomery, D. R. (1994). Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. *Water Resources Research*, 30(6), 1925–1932. Recuperado de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/94WR00538>
- Morgan, R., y Rickson, R. J. (1995). *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach (First)*. London: Routledge, 2011.
- Norris, J., Stokes, A., Mickovski, S., Cammeraat, E., Beek, R., Nicoll, B., y Achim, A. (2008). *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological solutions*. Netherlands: Springer Berlin Heidelberg.
- Nyssen, J., Poesen, J., Moeyersons, J., Luyten, E., Veyret-Picot, M., Deckers, J., Govers, G. (2002). Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1283, 1267–1283. <https://doi.org/10.1002/esp.404>
- Pham, T. G., Degener, J., y Kappas, M. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(2), 99–110. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001>
- Pimentel, D. (2006). Soil Erosion: A food and environmental threat. *Environmental, Development and Sustainability*, 8, 119–137. <https://doi.org/10.1007/s10668-005-1262-8>
- Plaza Sanhueza, C., y Rodríguez Cifuentes, L. (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de La Construcción*, 12, 17–29.
- Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G., y Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. *Catena*, 50(2–4), 91–133. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00143-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00143-1)
- Preti, F., y Giadrossich, F. (2009). Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (*Spartium junceum* L.). *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(9), 1713–1726. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1713-2009>
- Ramos Diez, I. (2014). Eficacia de los diques forestales en el control erosivo en cárcavas corregidas durante las restauraciones del siglo XX en los términos municipales de Saldaña y Lobera de la Vega (Palencia). Universidad de Valladolid.
- Romero Díaz, A. (2015). Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34(0), 83. <https://doi.org/10.18172/cig.1208>

- Romero, P., Castro, G., Gómez, J. A., y Fereres, E. (2007). Curve Number Values for Olive Orchards under Different Soil Management. *Soil Science Society of America Journal*, 71, 1758–1769. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0034>
- Taguas, E., Yuan, Y., Peña, A., y Ayuso, J. L. (2010). Predicción de cárcavas efímeras mediante el Índice Topográfico combinado en una microcuenca de Olivar en Andalucía (España). *Agrociencia*, 44, 409–426.
- USDA-NRCS. (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds (TR-55). USDA-NRCS Technical Release TR-55 (TR55 USCD-). Washington. Recuperado de [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf)
- Valentin, C., Poesen, J., y Li, Y. (2005). Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*, 63(2–3), 132–153. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>
- Van Beek, L. P. H., Wint, J., Cammeraat, L. H., y Edwards, J. P. (2005). Observation and simulation of root reinforcement on abandoned mediterranean slopes. *Plant and Soil*, 278, 55–74. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-7247-4>

## **8. ANEXOS**

### **8.1. Resumen de las asignaturas del Máster**

#### **Técnicas geomáticas aplicadas al medio natural (GIS, teledetección y cartografía geoambiental)**

La asignatura permitió adquirir conocimientos acerca de las técnicas de geomáticas para la adquisición de datos georeferenciados, integración y tratamientos a través del uso del Sistema de Información Geográfica, obteniendo como resultados cartografía ambiental. Se profundizó en los sistemas LIDAR terrestres y aéreos de captura de nubes de puntos, sensores remotos, sistemas aéreos no tripulados (UAV) y la aplicación del software ArcGIS para el procesamiento de imágenes satelitales.

#### **Métodos avanzados de análisis de datos ambientales**

La asignatura brindó los conocimientos teóricos y prácticos para la selección de la técnica de estadística que se debe aplicar a datos ambientales relacionados con ecología, hidrogeología e hidrogeoquímica. Los contenidos estaban orientados al diseño experimental, exploración de datos, estadística multivariante, variogramas, minería de datos y otros. Se usaron programas como R-Studio, Surfer, Past3, SPSS.

#### **Recursos hídricos y ecosistemas acuáticos**

La unidad de aprendizaje abordó la gestión hidrogeológica de acuíferos kársticos, detríticos y humedales para ecosistemas terrestres, principios de sostenibilidad ambiental, políticas, impactos ambientales, análisis de la calidad de agua subterránea a través de indicadores físico-químicos y balance hídrico.

#### **Caracterización de los componentes físicos del hábitat**

La asignatura brindó los conocimientos para el uso de técnicas de análisis geoquímico de muestras, técnicas espectroscópicas, técnicas microanalíticas en microscopía electrónica y técnicas de caracterización de materia orgánica.

## **Conservación y restauración de sistemas terrestres**

Esta unidad incluye contenidos teóricos y prácticos como los temas del control de erosión laminar y en cárcavas, la metodología del Número de Curva y la estabilidad de taludes. Así también, las fases de los proyectos de restauración ecológica y técnicas de muestreo y cuantificación de servicios ecosistémicos de los olivares con cubierta vegetal.

## **Caracterización de elementos bióticos del hábitat**

Se brindaron conocimientos técnicos de muestro de biodiversidad acuática y la selección adecuada de los parámetros físicos, químicos, biológicos y microbiológicos para muestreo de agua y en función de los resultados la aplicación de índices de calidad de agua y de biodiversidad acuática. En el ámbito de vegetación se aprendieron las técnicas de muestro y clasificación de las especies vegetales. En fauna se explicaron las técnicas de captura, muestreo y estimación de abundancia de animales.

## **Modelización de la distribución potencial de especies y hábitats**

La asignatura brindo información práctica y ejercicios en clase acerca de la adquisición de información georeferenciada de especies vegetales y fauna de todo el mundo, que se obtienen a través de GBIF con el software R-Studio, se aplicaron algoritmos de programación para obtener mapas de modelización de la distribución espacial de especies en los hábitats que identifican el área ideal para el crecimiento y desarrollo de la especies.

## **Explotación sostenible de suelos y agroecosistemas**

Esta unidad de aprendizaje aporto conocimientos acerca de los problemas de la desertificación y la perdida de suelo, así también se explicaron los pisos bioclimáticos, la vegetación del Mediterráneo y los servicios ecosistémicos de las Dehesas. Se aprendió técnicas de muestreo de suelo superficial y de identificación de plagas en los arboles de olivo.

### **Restauración de impactos asociados a la explotación de recursos geológicos**

En la asignatura de explotación de recursos geológicos se basaron en la descripción de la geología de la roca y que la misma es esencial para la explotación de recursos mineros, el tipo de minerías a cielo abierto y subterráneo, las formas de extracción y los impactos ambientales que derivan. Se realizaron prácticas de muestreo de agua de minería.

### **Geomorfología fluvial y análisis de inundaciones**

En esta unidad de aprendizaje se adoptaron conocimientos prácticos para simular las inundaciones de áreas a través del software Iber, que usa en sus cálculos el modelo digital de elevación del terreno (MDT). Esto nos permitió obtener resultados acerca de los cambios del cauce de agua superficial, la efectividad de las barreras para controlar inundaciones y la influencia del crecimiento urbano. Otro de los temas que se explicaron son los tipos de muestreo de sedimentos que sirven para determinar el antecedente del flujo de agua.

### **Riesgos asociados a la dinámica terrestre**

En esta asignatura se explicaron los distintos procesos de dinámica terrestre (deslizamientos, terremotos, erupciones volcánicas, tsunamis y otros) y se obtuvieron mapas de riesgos a través del uso de SIG. Así también, en campo se adoptaron los conocimientos para poder identificar los procesos dinámicos de las costas (deriva del litoral, olas, mareas y demás) y de movimientos de masas de suelo.

### **Explotación sostenible del patrimonio geológico**

En la unidad de aprendizaje se aportaron conocimientos en campo acerca de la interpretación geológica y la aplicación de metodología de evaluación para el uso científico, educativo, turismo y el riesgo de degradación de los GEOSITE (Lugares de interés geológico).

### **Prácticas externas**

A través de esta asignatura se adquieren conocimientos prácticos en laboratorio y en campo. Permiten acercar al alumno a las áreas de investigación y es una fuente útil para adquirir experiencia laboral.

### **Trabajo de Fin de Master**

Esta asignatura contribuye a la inserción del alumno al ámbito de la investigación científica y es donde se aplican y se combinan los conocimientos adquiridos en las otras asignaturas para conseguir el trabajo de fin de master.

## 8.2. Curriculum Vitae

**Dirección:** ECUADOR: Guayaquil, Sauces 4, Bloque 84  
**Correos electrónicos:** marolasaay@hotmail.com/ marolasaay@gmail.com  
**Teléfono:** 34-632889825

# LOURDES MAROLA SAÁ YÁNEZ

## *Ingeniera en Gestión Ambiental*

### 1. FORMACIÓN ACADÉMICA

EDUCACIÓN PRIMARIA	<b>ESCUELA FISCAL MIXTA “FAUSTO MOLINA MOLINA”</b> <b>Lugar:</b> Quevedo, Provincia de Los Ríos
EDUCACIÓN SECUNDARIA	<b>COLEGIO FISCAL DE SEÑORITAS QUEVEDO</b> <b>Certificado obtenido:</b> Bachiller en Ciencias Físico- Matemáticas <b>Lugar:</b> Quevedo, Provincia de Los Ríos
EDUCACIÓN SUPERIOR	<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO</b> <b>Título profesional:</b> Ingeniera en Gestión Ambiental <b>Proyecto de investigación:</b> “Calidad del Agua en las Albarradas del cantón Mocache, Provincia de Los Ríos - Ecuador”  <b>UNIVERSIDAD DE JAÉN, ESPAÑA</b> Estudiante del <b>Máster en Análisis, Conservación, Restauración de componentes físicos y bióticos de hábitats</b> con beca de atracción al talento. Fecha de inicio: Octubre del 2018

### 2. MÉRITOS ADQUIRIDOS

#### UNIVERSIDAD:

- **MENCIÓN DE HONOR:** Por las más altas calificaciones en Primer año de la Carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental, periodo 2012-2013.
- **CERTIFICACIÓN** al reconocimiento a la Excelencia Académica durante el periodo lectivo 2014-2015, otorgado por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

### 3. CAPACITACIONES

- 3.1. SEMINARIO NACIONAL SOCIO AMBIENTAL: “Perspectivas y análisis sobre la Gestión Ambiental, Forestal y Turística del Ecuador” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

**Fecha:** 24 y 25 de Junio del 2015

- 3.2. SEMINARIO INTERNACIONAL “GESTIÓN AMBIENTAL Y RECURSOS ECOSISTÉMICOS con el tema de “VALORACIÓN DE LOS BIENES Y SERVICIOS AMBIENTALES” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

**Fecha:** 08 al 10 de Junio del 2016

- 3.3. CERTIFICADO DE FINALIZACIÓN DEL CURSO DE INTRODUCCIÓN SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO DE UN CC: LEARN.

**Institución:** United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), The One UN Climate Change Learning Partnership (UN CC: Learn).

**Fecha:** 29 de Noviembre del 2016

- 3.4. Certificado por la participación en calidad de ASISTENTE en el III CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL, FORESTAL Y ECOTURISMO, organizado por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ) y el Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador (CIDE).

**Fecha:** Quevedo, 31 de Mayo, 1-2 de Junio del 2017

- 3.5. Certificado de aprobación del CARE 1 ST WORKSHOP: EMPOWERING CLIMATE CHANGE, organizado por la European Commission, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla y la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

**Fecha:** Quevedo, 24 al 29 de Julio del 2017

- 3.6. Certificado de aprobación del curso GESTIÓN Y CONTROL POR PROCESOS  
**Institución:** Secretaría Nacional de la Administración Pública y la EP Centro de Educación Continua del Instituto de Altos Estudios Nacionales

**Fecha:** 11 de Julio al 08 de Septiembre del 2017

- 3.7. Certificado de INTRODUCCIÓN AL USO Y REPRESENTACIÓN DE INFORMACIÓN GEOESPACIAL.

**Institución:** Centro de Investigación en Geografía y Geomática (Virtual)

**Fecha:** 04 de diciembre del 2017

- 3.8. Certificado de “HUELLA DE CARBONO Y SU APLICACIÓN EN CADENAS AGROPECUARIAS”

**Institución:** Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

**Fecha:** 08,15,23,30 de noviembre del 2017

**3.9. CURSO INTERNACIONAL DE EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES.**

**Institución:** PRODEUTEQ - CECAPRO

**Fecha:** 07 al 15 de Julio del 2018

**3.10. Certificado de participación en Webinar “Manejo del Recurso Hídrico en las IES, el caso del reúso eficiente de las aguas residuales”**

**Institución:** La Vicepresidencia de la Región Colombia de la Organización Universitaria Interamericana, OUI.

**Fecha:** 30 de Agosto del 2018

**4. TRABAJOS DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y EXTENSIÓN ACADÉMICA**

**4.1. Ponente en el II CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA UTC – La Maná 2017, realizo desde el 16 hasta el 20 de Enero del 2017 en la Universidad Técnica de Cotopaxi.**

**Título:** Calidad del agua en las albardas del cantón Mocache (Los Ríos - Ecuador).

**4.2. Ponente en el III CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL, FORESTAL Y ECOTURISMO, en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.**

**Título:** Agentes contaminantes que afectan la calidad del agua en albardas del cantón Mocache (Los Ríos - Ecuador).

**4.3. Ponente en el II SEMINARIO INTERNACIONAL DE BIENES Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS, en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.**

**Título:** Aporte ecológico de las albardas en las zonas rurales del cantón Mocache (Los Ríos - Ecuador).

## 5. RECONOCIMIENTOS

### 5.1. PREMIO A LA CIENCIA en el II CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA UTC – La Maná 2017.

**Fecha:** Desde el 16 hasta el 20 de Enero del 2017

## 6. COMPETENCIAS

6.1. Tratamiento de la información y digital: Manejo de software Microsoft Office, GIS (ArcGIS – QGIS), IBER, SLIDE y estadísticos SPSS, Minitab 14, R Studio.

6.2. Responsabilidad, capacidad de resolución de problemas, organización, adaptabilidad, flexibilidad, decisión, trabajo en equipo, proactiva, gestión y negociación.

## 7. EXPERIENCIA LABORAL

<b>EMPRESA:</b> <b>CARGO:</b>	Asesoría Ambiental de la Ing. Adriana Ortiz Ayudante en registros ambientales, EIA, inspecciones, levantamiento de información geográfica, análisis de normativa ambiental.	<b>Tiempo:</b> 1 año
<b>LUGAR:</b>	Quevedo – Provincia de Los Ríos	
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Dirección de Desarrollo Productivo Forestal de la Subsecretaría de Producción Forestal (SPF) del Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador (MAG).	<b>Tiempo:</b> 1 año y 1 mes
<b>CARGO:</b> <b>LUGAR:</b>	Analista de Desarrollo Forestal 1 Guayaquil, Provincia de Guayas	