

*“Trabajando para la sociedad”*

## **La fotogrametría como herramienta para la valoración y el análisis de las restauraciones en espacios mineros de la provincia de León. Los casos de Carrasconte, el Feixolín y Santa Lucía de Gordón**

Sergio Alberto Peña Pérez <sup>(1)</sup>

Teléfono: 646158521

Email: spenap00@estudiantes.unileon.es

Amelia Gómez Villar <sup>(1)</sup>

Email: agomv@unileon.es

Rosa Blanca González Gutiérrez <sup>(1)</sup>

Email: blanca.gonzalez@unileon.es

Empresa <sup>(1)</sup>: Universidad de León Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio  
Dirección: Facultad de Filosofía y Letras Campus de Vegazana S/N 24007 León

**Resumen** - *La minería a cielo abierto es una técnica que, a principios de los años ochenta, se generalizó en las cuencas de la provincia de León. Este tipo de minería provoca una transformación del territorio muy importante y, en la mayoría de casos, irreversible, con la eliminación de cubiertas vegetales y suelos, transformación del relieve, modificaciones en las aguas superficiales y subterráneas y la eliminación de los usos tradicionales. Mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas con fotogramas históricos es posible la reconstrucción de estos territorios en varios momentos de la historia, apreciando los cambios que han sufrido las áreas afectadas por este tipo de explotaciones. En este trabajo se han elaborado modelos digitales de superficie y ortofotografías, para tres minas en la provincia de León (El Feixolín, Carrasconte y Santa Lucía) mediante fotogramas históricos desde 1946 hasta 2023. Los productos cartográficos obtenidos muestran una regularización del relieve, eliminando pequeñas vaguadas y arroyos para crear una topografía suave tras las restauraciones. Las ortofotografías muestran la eliminación de la vegetación durante la actividad minera y una lenta recuperación tras las restauraciones.*

### **1. INTRODUCCIÓN.**

La provincia de León atesora una importante riqueza de yacimientos carboníferos, los cuales han sido explotados de manera industrial desde mediados del siglo XIX. Durante más de un siglo, la principal técnica de explotación se basaba en la extracción de mineral mediante galerías subterráneas. La crisis energética de 1973 supuso un gran empuje al carbón nacional por parte del gobierno, coincidiendo con el comienzo de las primeras explotaciones a cielo abierto. A mediados de los años setenta del siglo XX, las técnicas de explotación dieron un importante giro al introducirse técnicas de explotación a cielo abierto en la mayoría de las explotaciones. Este cambio vino ligado a la aparición de maquinaria de gran volumen para el movimiento de tierras y a la creciente necesidad de suministro de carbón para las centrales térmicas que se estaban construyendo por todo el país.

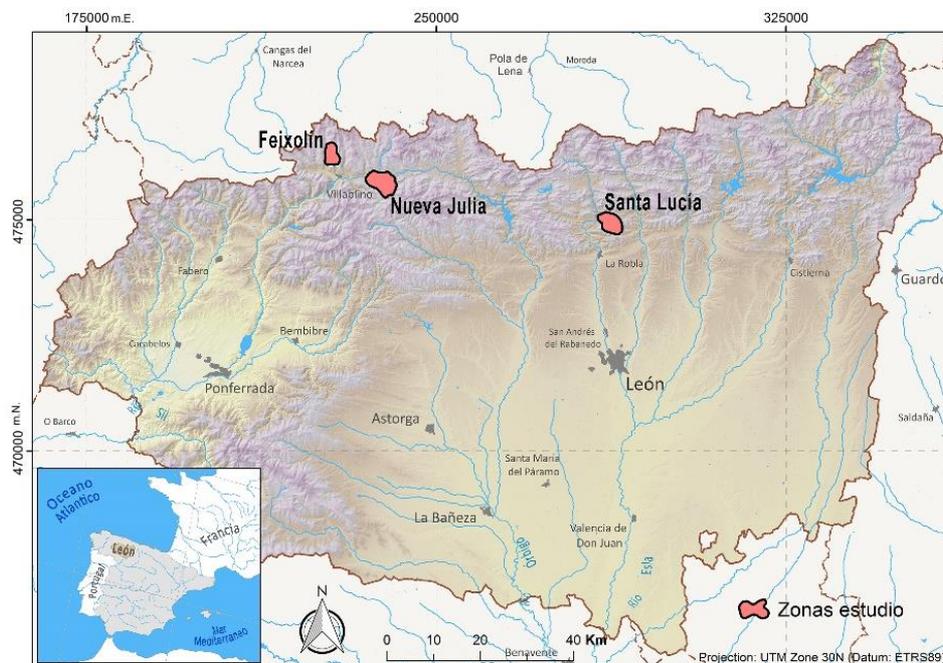
Para principios de los años ochenta, esta técnica se había generalizado por las cuencas mineras de la provincia leonesa (Redondo, 1988). Mientras la actividad subterránea se estancaba y reducía durante las dos siguientes décadas, las explotaciones mineras a cielo abierto aumentaron vertiginosamente (López Trigal, 1995). Coincidiendo con la entrada de España en la Unión Europea, la minería de carbón entró en una dinámica de declive debido principalmente a la imposibilidad de competir en el mercado internacional sin ayuda pública. En el año 2018, la Unión Europea estableció el final de las subvenciones a estas explotaciones, lo cual, junto con la paralización de generación

## *"Trabajando para la sociedad"*

termoeléctrica mediante carbón, supuso el fin para la actividad minera del carbón (Maceda Rubio y Maurín Álvarez, 2022).

La técnica de minería a cielo abierto se caracteriza por la obtención del mineral sin realizar labores subterráneas. Debido a los trabajos en superficie que requieren esta técnica, se producen cambios muy importantes en el paisaje. El trascurso de la actividad altera el terreno generando tajos, escombreras, balas, etc. Estas transformaciones en el terreno provocan afecciones como la desaparición de la cubierta vegetal, modificaciones en la red hidrológica superficial y subterránea, una fuerte alteración del relieve o la eliminación de los usos tradicionales. Las huellas dejadas por la actividad extractiva han configurado un paisaje minero, en ocasiones con grandes extensiones de terreno modificado y con escasas medidas para rehabilitar estos entornos debido a los altos costes que supone para las administraciones públicas (Matías Rodríguez, 2020). En una de las áreas de estudio, la mina a cielo abierto Nueva Julia o mina de Carrasconte, la restauración ha supuesto una inversión superior a 24 millones de euros para la Junta de Castilla y León.

Hasta mediados de la década de los 80, el único objetivo de la minería a cielo abierto del carbón era la obtención del máximo beneficio, sin plantearse la restauración del medio. No obstante, a partir de 1984 las administraciones públicas redactaron una serie de normas, no solo para exigir planes de restauración, sino para conseguir un aprovechamiento más sostenible de este mineral (Redondo, 1988). Desde los comienzos de este tipo de explotaciones, las restauraciones de los espacios afectados han estado rodeadas de grandes polémicas, ya no solo por los costes inasumibles para las empresas, sino también por la dificultad de la reconstrucción de las zonas montañosas donde se ubican la gran mayoría de estas minas. Estas rehabilitaciones de espacios mineros se deberían realizar desde un punto de vista ecológico, centrando la planificación y el diseño de la restauración en la integración con el paisaje existente en los alrededores de las explotaciones (Arranz González, 2015).



**Figura 1: Mapa de la provincia de León con la localización de las tres áreas de estudio.**

En este trabajo se aplica una metodología basada en la fotogrametría para reconstruir paisajes mineros antes, durante y después del paso de las actividades mineras a cielo abierto. Gracias al empleo de software fotogramétrico y fotografías aéreas, se ha podido modelar el paisaje en diferentes fases de la actividad minera, incluyendo el estado previo del territorio hasta la rehabilitación del mismo.

## *“Trabajando para la sociedad”*

Esto ha permitido el análisis del paisaje, observando desde la cartografía, los cambios que han sufrido las zonas afectadas durante las tres fases de cambio: el estado previo, el trascurso de la actividad minera y la restauración de las explotaciones. Para realizar este estudio, se han seleccionado tres minas a cielo abierto de carbón en el norte de la provincia de León: El Feixolín y Carrasconte (Nueva Julia) en la cuenca de Villablino (Laciana), y Santa Lucía de Gordón en la cuenca Ciñera-Matallana (Montaña Central Leonesa), próximas todas ellas a enclaves de alto valor natural de la Cordillera Cantábrica (Figura 1) como el Parque Natural de Babia y Luna y las Reservas de la Biosfera del Valle de Laciana y Los Argüellos.

## 2. METODOLOGÍA.

La fotogrametría es una técnica que permite realizar mediciones fiables a partir de fotogramas, pudiendo obtener las características métricas, geométricas y la posición en el espacio de un objeto estudiado o, en nuestro caso, el territorio. De este modo, necesitamos dos fuentes de información para poder emplear esta técnica: fotografías aéreas de la zona de estudio y una serie de puntos de los cuales conozcamos sus coordenadas y altura de manera fiable. Para comprobar la viabilidad del uso de la fotogrametría en el estudio de espacios mineros, se han seleccionado diversas series de fotogramas aéreos obtenidos en diferentes años:

- **Serie A:** Las imágenes más antiguas utilizadas han sido las del Vuelo Americano Serie A, realizado entre los años 1945 y 1946 por el *Army Map Service* del ejército estadounidense. Este vuelo surge por la necesidad, para el Bloque Aliado en la II Guerra Mundial, de disponer de una cartografía precisa del territorio europeo, inexistente hasta la época. Si bien la precisión que alcanzan estas imágenes es muy inferior a las realizadas en posteriores décadas, debido a su menor escala y la calidad de la cámara empleada, son las imágenes aéreas más antiguas en gran parte del territorio nacional, de ahí su valor (Pérez Álvarez et al., 2013). Este vuelo se puede adquirir en el Centro Cartográfico y Fotográfico del Ejército del Aire (CECAF).
- **Serie B:** El siguiente vuelo fotogramétrico que encontramos en nuestro país es el Vuelo Americano Serie B. Del mismo modo que el anterior, fue realizado por el ejército de los Estados Unidos a mediados de la década de los cincuenta y, cuenta con mayor calidad que el de la Serie A (Vales et al., 2010). Para el territorio de Castilla y León, las imágenes correspondientes a este vuelo pueden descargarse del servidor FTP del ITACYL.
- **Vuelo interministerial:** Entre el año 1977 y 1985, el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario, comúnmente conocido como IRyDA, realizó el denominado Vuelo Interministerial. Cuenta con mayor detalle y nitidez (escala 1/18:000), así como un excelente estado de conservación, respecto a vuelos anteriores. Para acceder a este vuelo hay que acudir al centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional.
- **Vuelo SGOS;** En el año 1990, la empresa SGOS, realizó un vuelo fotogramétrico con una escala parecida al Vuelo Interministerial. Actualmente, el Departamento de Geografía y Geología de La Universidad de León cuenta con los fotogramas correspondientes a la provincia de León.
- **PNOA:** Los siguientes vuelos utilizados en este trabajo son los realizados por el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA), creado en el 2003 por varios ministerios y las comunidades autónomas, con el objeto de mantener actualizadas las ortofotos de todo el territorio nacional cada dos años. Los fotogramas para los vuelos PNOA están disponibles en el centro de descargas del Instituto Geográfico Nacional.
- **Vuelos UAV:** En la actualidad, la aparición de los UAV, comúnmente denominados drones, nos ha permitido obtener fotografías aéreas en el lugar y momento deseado con calidades muy superiores a los fotogramas tradicionales.

Los vuelos con dron se han realizado con un DJI Phantom 4 Pro Plus (cámara con sensor CMOS de 1” y obturador mecánico con lente de 24 mm) siendo planificados por la aplicación DJI GS Pro. Se han realizado varios vuelos sobre las áreas de estudio para combinar imágenes cenitales y oblicuas, mejorando la precisión en lugares con fuertes relieves como es el caso (James et al. 2017).

## *“Trabajando para la sociedad”*

Para poder generar las ortoimágenes y los modelos digitales de superficies también se necesitan una serie de puntos de referencia, que cubran la misma área que los fotogramas y de los cuales conozcamos sus coordenadas y altura. Estos puntos sirven para que el software utilizado sea capaz de corregir y georreferenciar los productos obtenidos (Harwin et al., 2015, Nesbit y Hugenholtz, 2019). La mejor manera para adquirir estos puntos de control es mediante la utilización de antenas GPS GNSS de alta precisión (en el caso de este estudio TOPCOM Hiper HR), pero no siempre es factible el uso de estos equipos, ya que para su buen funcionamiento es necesario disponer de una conexión de datos móvil. Debido a la ubicación de las minas estudiadas, la falta de cobertura o la imposibilidad de usar una antena base, no ha permitido la obtención de estos puntos mediante antenas de precisión en todos los casos. Por este motivo, en las minas del Feixolín y Santa Lucía, algunos de los puntos han sido tomados mediante softwares cartográficos y modelos digitales del terreno realizados a partir de datos LIDAR. Estos puntos de control deben estar bien repartidos por el mosaico de imágenes para poder corregir todas las distorsiones que producen las lentes de las cámaras (Martínez-Fernández et al., 2022). El grueso de los puntos de control se ha colocado evitando el centro del mosaico de fotografías (Martínez-Carricondo et al., 2018), allí donde ha sido accesible, y en puntos identificables en todos los grupos de fotografías desde 1946 hasta el 2023. De este modo, se han utilizado puntos que no hayan variado con el paso de los años como cruces de caminos, puentes, muros, carreteras, etc., evitando en lo posible elementos muy cambiantes como la vegetación.

Las imágenes han sido procesadas con el software Agisoft Metashape 2.0.2 (Intel Core I9 - 9900k / 64 Gb RAM / NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti 8Gb) mediante la técnica de SfM (Structure from Motion), basada en la elaboración de una estructura 3D a partir de la superposición de todas las imágenes obtenidas (Westoby, 2012). Esta técnica se basa en el reconocimiento de puntos homólogos en las diferentes imágenes para su posterior unión y proyección. Este proceso se realiza gracias al algoritmo SIFT, el cual identifica puntos clave en cada fotografía que ayudan a relacionar todas las imágenes entre sí. Este algoritmo necesita imágenes con buena calidad y con diversidad de texturas, por ejemplo, en superficies de agua el software es incapaz de encontrar puntos por la homogeneidad de la superficie. Tras identificar estos puntos, proceso que el software denomina orientación o alineación de las fotos, se crea una nube dispersa de puntos. A continuación, el software densifica los puntos creando una nube densa para, posteriormente, realizar una conversión a malla para crear modelos tridimensionales.



***Figura 2: Fotografía de una ladera formada por taludes y escasa vegetación de la mina a cielo abierto de Santa Lucía de Gordón a la izquierda de la foto en marcado contraste con el relieve y la vegetación natural de la zona con las laderas sin alterar (derecha de la foto).***

### **3. RESULTADOS.**

El empleo de la fotogrametría ha permitido la obtención de diversos productos en las tres áreas de estudio (Tabla 1). En las tres minas se han obtenido modelos digitales de superficie (MDS) y ortofotos de los años indicados en la Tabla 1. Para el vuelo Serie A del año 1946, tan solo se ha realizado la

## *“Trabajando para la sociedad”*

zona del Feixolín. Este vuelo tiene zonas de muy poco solapamiento por lo que la restitución fotogramétrica es complicada y, en ocasiones, imposible. Como la actividad minera a cielo abierto no comienza hasta finales de los años setenta, no es estrictamente necesario la utilización del Serie A. Este vuelo sería el de menos calidad de todos, con 149 cm y 76 cm de tamaño de píxel en el MDS y la ortofoto respectivamente. Con el siguiente vuelo, el Serie B, se mejora la calidad de las ortofotos y los modelos considerablemente. Este vuelo es el único disponible, para las áreas de estudio y para toda la provincia de León, que muestra el paisaje antes del comienzo de la actividad minera a cielo abierto hacia mediados de los años setenta del siglo pasado. El vuelo del IRyDA se realizó desde 1977 hasta el año 1985, pudiendo encontrar fotogramas comprendidos entre estos años (1983 para las áreas de estudio) coincidiendo con la expansión y comienzo del cielo abierto. La calidad mejora algo los vuelos anteriores. El MAPA fue realizado por una empresa privada y los fotogramas hoy en día son difíciles de encontrar, aunque la empresa SGOS sigue existiendo con la posibilidad de adquirir imágenes. Este vuelo posee una calidad similar al vuelo IRyDA aunque mejora la nitidez. Para los fotogramas del PNOA existen multitud de años en los que se realizaron vuelos, pudiendo realizar un seguimiento de las explotaciones. Para este trabajo se han escogido vuelos del 2008 y 2014 por ser años donde las explotaciones están muy avanzadas, además de la calidad de sus fotogramas que mejora los tamaños de píxel sustancialmente, rondando la mitad de los vuelos anteriores. Por último, se han realizado vuelos de drones sobre las zonas restauradas en las tres minas. Los drones nos han permitido realizar modelos de elevaciones y ortofotos con una calidad muy superior a los vuelos realizados sobre aeronaves convencionales. Aunque la calidad y actualidad de estos vuelos supera al resto, cabe destacar que los drones no están pensados para cubrir áreas muy extensas. Para volar las superficies de las minas ha sido necesaria una planificación exhaustiva de los vuelos, cubriendo la máxima superficie posible teniendo en cuenta la autonomía de los equipos y la legislación actual.

Los modelos de elevaciones obtenidos, como su propio nombre indica, son modelos que incorporan todo tipo de superficies como las edificaciones o la vegetación. Por este motivo, esta técnica no permite realizar mediciones precisas como cálculo de volúmenes extraídos. El software fotogramétrico tiene opciones para filtrar la nube de puntos, pero estas herramientas siempre cometen errores, sobre todo en zonas de vegetación baja. Aun así, la obtención de unos pocos puntos de control ha permitido medir el error medio de los modelos de elevaciones y, comparando las medidas tomadas en zonas de terreno despejado, el error medio de los modelos es de 2,37 metros. Este error no parece elevado, sobre todo teniendo en cuenta que se han empleado con imágenes históricas con baja calidad.

**Tabla 1: Tamaño del píxel GSD (Ground Sample Distance) de los diferentes productos cartográficos obtenidos. Expresado en centímetros.**

|                     | FEIXOLÍN        |          | CARRASCONTE     |          | SANTA LUCÍA     |          |
|---------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|
|                     | MDS             | ORTOFOTO | MDS             | ORTOFOTO | MDS             | ORTOFOTO |
| <b>Serie A 1946</b> | 149             | 76       |                 |          |                 |          |
| <b>Serie B 1956</b> | 115             | 58       | 112             | 56       | 122             | 60       |
| <b>IRyDA 1977</b>   | 61              | 30       | 100             | 51       | 104             | 51       |
| <b>MAPA 1990</b>    | 65              | 59       | 109             | 54       | 110             | 55       |
| <b>PNOA</b>         | <b>Año 2008</b> |          | <b>Año 2014</b> |          | <b>Año 2008</b> |          |
|                     | 48              | 25       | 86              | 43       | 53              | 27       |
| <b>DRON 2023</b>    | 16              | 8        | 25              | 12       | 21              | 10       |

### 3.1. Cambios en el relieve.

La topografía del terreno es el rasgo que más cambios sufre tras el paso de la actividad minera. En las explotaciones a cielo abierto se identifican tres tipos de impactos sobre el relieve: las pistas de

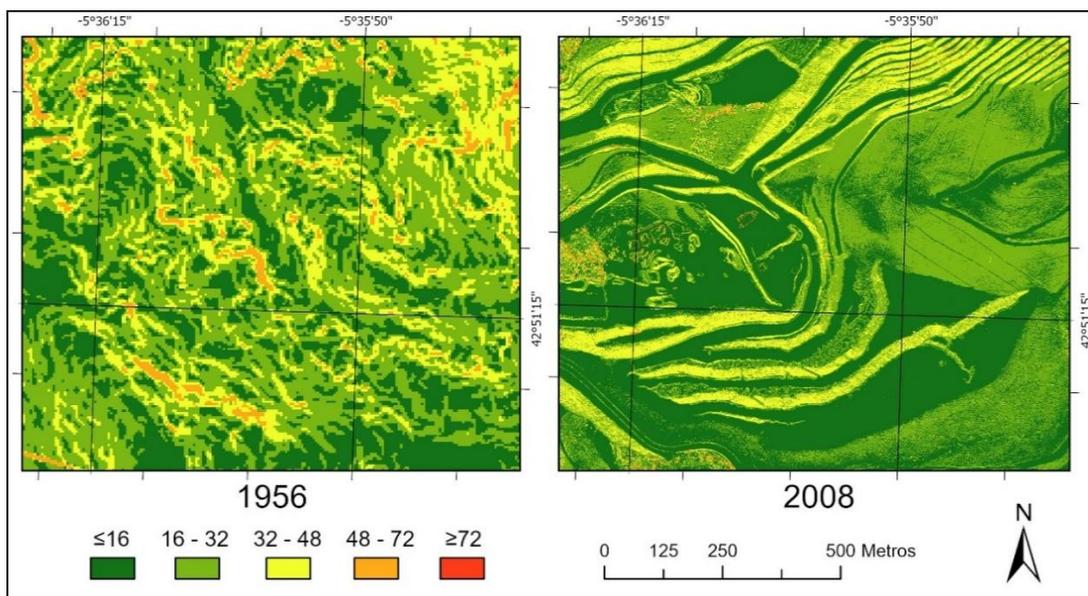
*“Trabajando para la sociedad”*

acceso, las explotaciones o cortas y las acumulaciones de estériles o escombreras (Redondo, 1988). Los modelos digitales de superficie han permitido crear mapas de pendientes, de orientaciones, curvas de nivel y perfiles topográficos, así como realizar unas pequeñas estadísticas de cada explotación. Para las estadísticas, se ha tomado únicamente la superficie que han cubierto los vuelos con dron, zonas ya restauradas de las tres explotaciones (Tabla 2).

**Tabla 2: Estadísticas de pendiente media (porcentaje), orientación media (grados) y altitud mínima (metros). Valores calculados para al área de recubrimiento obtenida con el dron en los años indicados.**

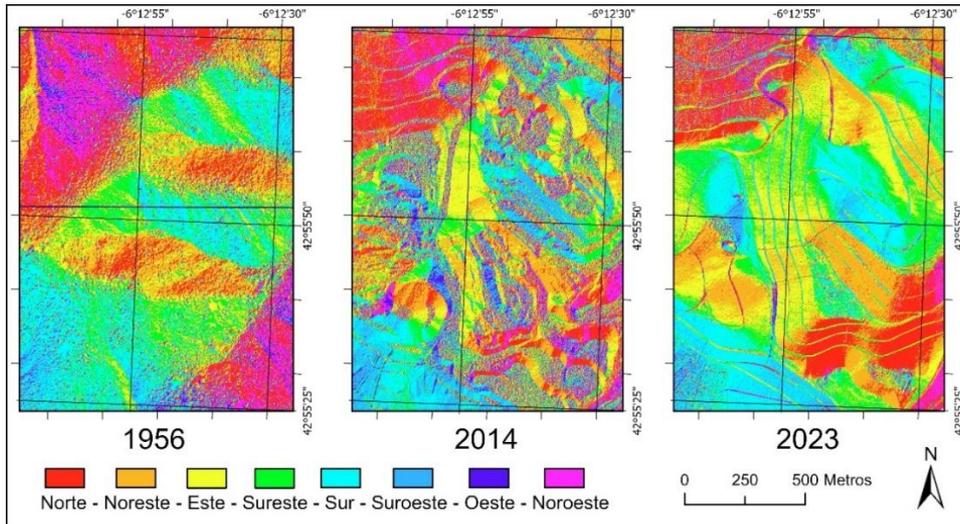
|                          | FEIXOLÍN |        |        | CARRASCONTE |        |        | SANTA LUCÍA |        |       |
|--------------------------|----------|--------|--------|-------------|--------|--------|-------------|--------|-------|
|                          | 1956     | 2008   | 2023   | 1956        | 2014   | 2023   | 1956        | 2008   | 2023  |
| <b>Pendiente media</b>   | 20,85    | 37,41  | 27,29  | 17,49       | 38,42  | 13,54  | 22,23       | 17,02  | 16,64 |
| <b>Orientación media</b> | 195,54   | 181,96 | 182,61 | 171,78      | 164,73 | 152,72 | 176,5       | 191,89 | 196,4 |
| <b>Altitud mínima</b>    | 1242     | 1191   | 1240   | 1299        | 1294   | 1292   | 1185        | 1263   | 1236  |

En los casos del Feixolín y Carrasconte, la pendiente media pasa a ser muy superior durante los años de la explotación, al contrario que en Santa Lucía. Tras la restauración las pendientes se reducen quedando en valores inferiores al estado previo a la explotación (Figura 3), a excepción del Feixolín. En este último caso, el que el valor de pendiente media tras la restauración supere a los valores previos, es debido a la presencia de un gran talud abandonado que no ha sido modificado en la restauración. En los valores medios de orientación de las pendientes, hay una pequeña variación de entre 13º y hasta 20º. En mapa de orientaciones (Figura 4), lo que más llama la atención es su homogeneidad, al igual que la de los valores de pendiente (Figura 3). La altitud mínima en las tres zonas también ha sufrido modificaciones, aunque de forma muy diferente en las tres minas. En el Feixolín, la altitud se redujo en 51 metros, pero tras la restauración el valor se recuperó, seguramente por el relleno de algún corte en la mina. En Carrasconte, la variación ha sido mínima, mientras en Santa Lucía la altura mínima ha aumentado en 51 metros, debido probablemente a que la zona analizada fue una escombre durante el periodo de explotación.



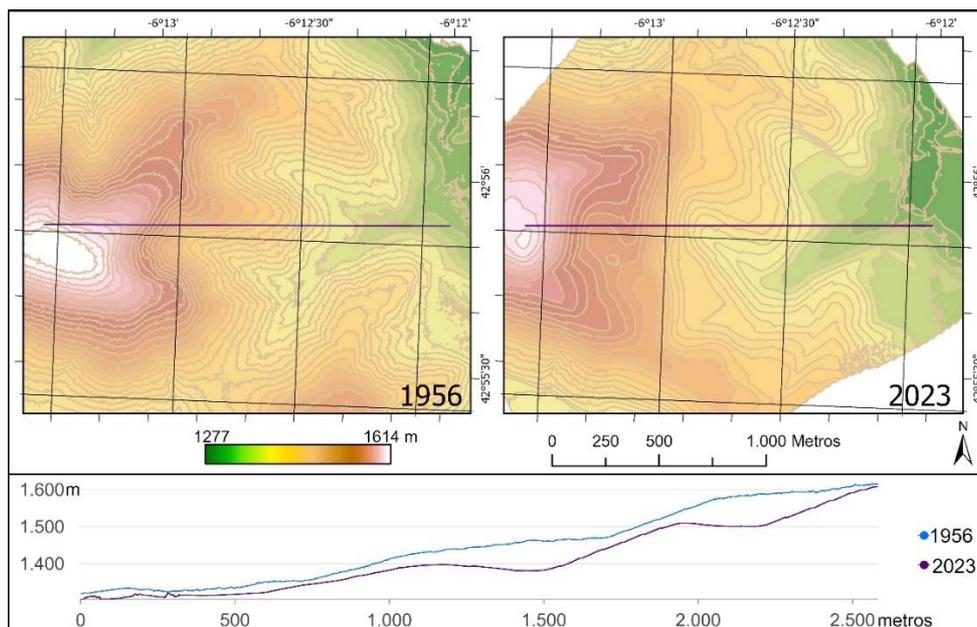
**Figura 3: Mapas de pendientes (en porcentaje???) para los años 1956 y 2008 en un área restaurada de la mina de Santa Lucía.**

*"Trabajando para la sociedad"*



**Figura 4: Mapas de orientaciones para los años 1956, 2014 y 2023 en la mina de Carrasconte (Nueva Julia).**

Las curvas de nivel también muestran laderas muy regularizadas, distanciándose mucho del aspecto que tenía el paisaje previamente a la actividad minera. Los perfiles topográficos realizados en la mina de Carrasconte (Figura 5) revelan dos zonas muy claras donde se observa la falta del material extraído en las cortas. Aunque de forma muy detallada, en el perfil del año 2023, se percibe como las pendientes se encuentran escalonadas separadas por una serie de terrazas por las que circulan pistas. En líneas generales, los perfiles y las curvas de nivel muestran una regularización y simplificación del relieve. Es evidente que las explotaciones a cielo abierto tienen un impacto muy fuerte en la topografía, la cual puede ser mitigada en las restauraciones. Debido a la ubicación de estas minas, muchas de ellas en espacios de alta y media montaña, la actividad minera puede llegar a destruir interesantes formas del relieve imposibles de recuperar. Por ejemplo, en la mina de Carrasconte, el laboreo de la mina ha conllevado la destrucción de un complejo de morrenas, que han sido identificadas y reconstruidas mediante la fotogrametría (Figura 7).



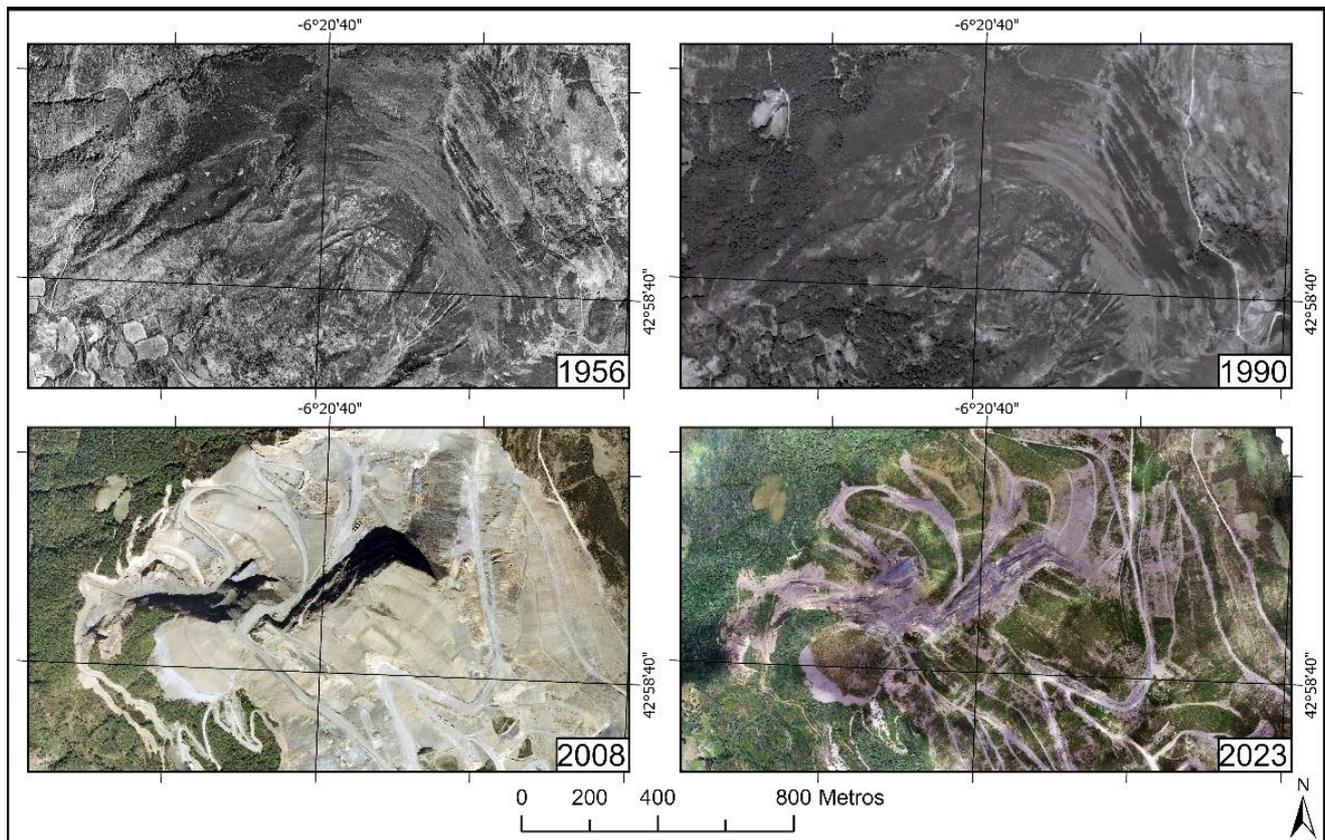
**Figura 5: Mapas de curvas de nivel de la mina a cielo abierto de Carrasconte y perfil topográfico, del año 1956 previo a la explotación y, tras la restauración de la mina en el año 2023.**

*“Trabajando para la sociedad”*

**3.2. Cambios en la vegetación.**

Todas las explotaciones a cielo abierto empiezan con la eliminación de la vegetación y el suelo, con el fin de alcanzar las capas que contienen el mineral deseado (Figura 6). Podríamos decir que la eliminación de la vegetación es el “menor de los problemas”, ya que las zonas afectadas por estas explotaciones suelen estar cubiertas por pastos, matorrales y especies arbóreas jóvenes. Con lo cual podemos deducir que, con las condiciones óptimas, la vegetación podría recuperarse en pocas décadas. No obstante, tras la eliminación del suelo y los cambios en la topografía, la vegetación tiene mucha dificultad para volver a colonizar estas zonas. En la Figura 2, se observa la mina a cielo abierto de Santa Lucía, aún sin restaurar tras el cese de su actividad en 2019, donde destaca la ausencia de vegetación en la corta tras casi 5 años de inactividad.

El análisis de las ortoimágenes creadas permite ver la eliminación de la vegetación en las tres áreas de estudio. Como las restauraciones de las minas de Carrasconte y del Feixolín han sido concluidas recientemente, noviembre de 2015 y junio de 2021 respectivamente, todavía no se observa una clara evolución de la vegetación. En el caso del Feixolín, tras ocho años desde la restauración, se aprecia una colonización de pastos y algunas especies de matorral (Figura 6), pero habrá que esperar para ver como progresan las repoblaciones que se llevaron a cabo durante las restauraciones.



**Figura 6: Ortoimágenes de la mina el Feixolín en varios momentos históricos. En el año 1956 destacan los usos tradicionales en los fondos de valle como los cultivos. Para el año 1990 el abandono de actividades tradicionales hace desaparecer cultivos y fincas de siega, acompañado de un aumento de la vegetación. En el 2008 el comienzo de la actividad minera transforma el territorio totalmente. En el 2023, la restauración intenta una integración con el medio.**

**3.3. Cambios en la hidrología.**

El agua es otro elemento del medio natural afectado por las actividades mineras a cielo abierto. En este caso podemos ver perjudicadas tanto las aguas superficiales como las subterráneas. Mediante

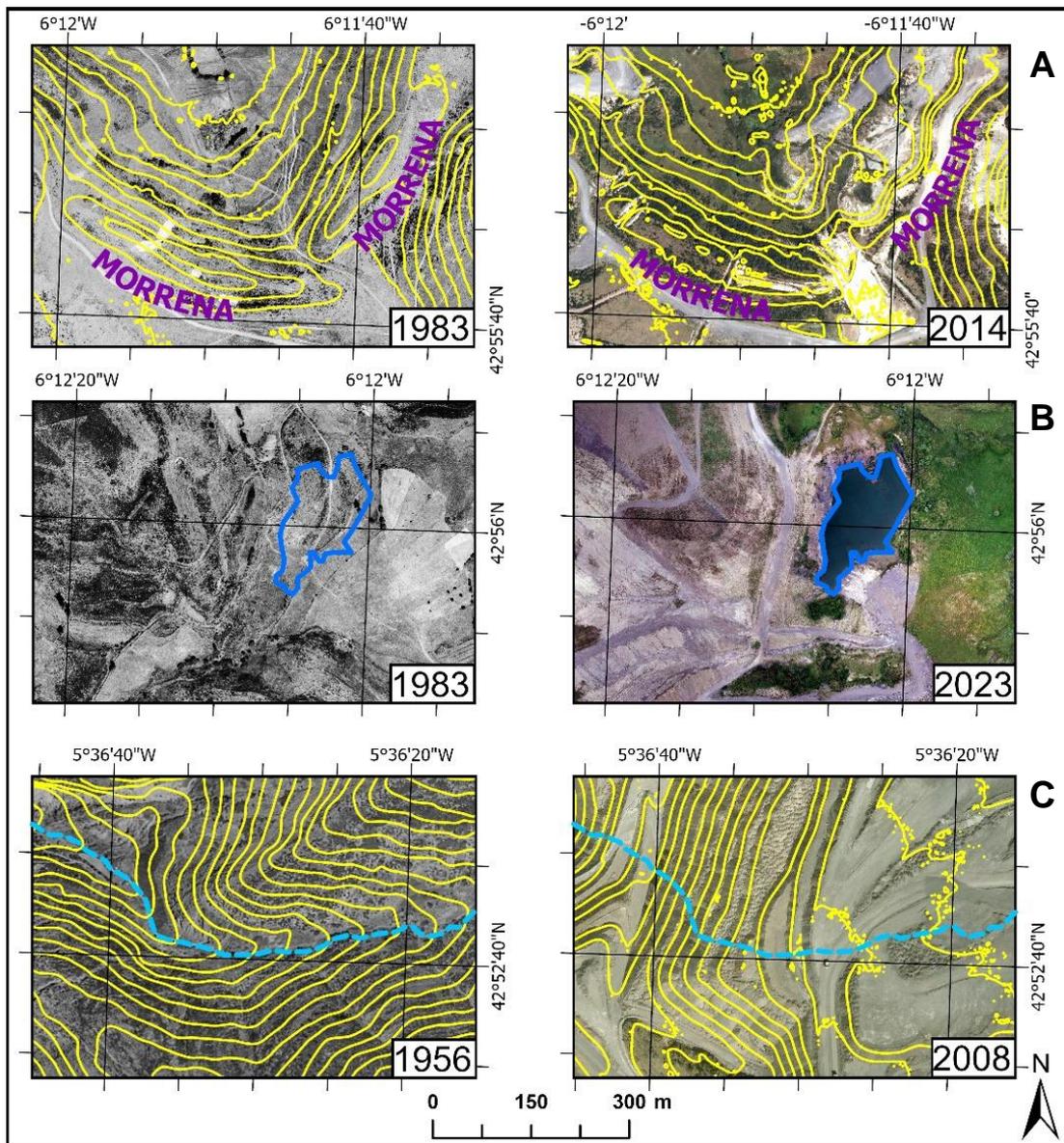
## *"Trabajando para la sociedad"*

la fotogrametría, somos capaces de observar los cambios en las aguas de escorrentía y, en los tres casos de estudio, se observan cambios en pequeños cauces y arroyos, en la mayoría de los casos con la eliminación de estos (Figura 7).

Visualizar estos cambios en la hidrología es posible gracias al uso de productos cartográficos extraídos a partir de los modelos digitales de superficie. De este modo, el análisis de las curvas de nivel nos ha proporcionado información relevante sobre los cambios espaciales que han tenido los cursos de agua o incluso su desaparición, como el ejemplo de la Figura 7 en cielo abierto de Santa Lucía. La eliminación de ciertos arroyos y vaguadas, sumado a la escasa vegetación existente tras las restauraciones, produce un aumento en la capacidad erosiva del agua. Ahora el agua no tiene vegetación para ser frenada, ni posee una red de drenaje para fluir, por lo tanto, es posible la aparición de una fuerte erosión pluvial y por arroyadas superficiales en manto.

Otro rasgo muy característico en las huellas de la actividad minera es la aparición de lagunas artificiales (Figura 7). Las empresas mineras tienen especial cuidado con el diseño de las explotaciones, analizando la cantidad de agua que entra dentro y realizando infraestructuras para evacuar el agua. Esta desviación de los flujos superficiales supone la creación de infraestructuras que, en la mayoría de los casos, son demasiado costosas para asegurar la rentabilidad de la mina. Por ese motivo, las empresas toman la decisión de no realizar estas obras para evacuar el agua, y prefieren bombear el caudal que entra en la explotación. Tras el cese de las explotaciones, el agua no es bombeada al exterior de la mina y se producen pequeñas áreas endorreicas, que se nutren del agua de precipitación y de las aguas que afloran tras el corte de niveles freáticos en las laderas (Izquierdo Vallina, 1986). En los casos de estudio, tanto la mina de Santa Lucía como la de Carrasconte poseen lagunas artificiales tras el paso de la minería, algunas de carácter estacional y otras permanentes durante todo el año. Estas lagunas, aunque son un indicativo del paso de la actividad minera, ayudan a borrar las huellas de las cortas creando a su alrededor vegetación densa y acogiendo a fauna. Sin embargo, en ocasiones estas lagunas poseen aguas muy ácidas, que dificulta la aparición de biodiversidad (Redondo-Vega et al., 2021).

*“Trabajando para la sociedad”*



**Figura 7: Ortoimágenes donde se observan importantes cambios tras el paso de la actividad minera. A. Desaparición de depósitos glaciares en Carrasconte; B. Creación de lagunas; y, C. Destrucción de pequeños arroyos y vaguadas. (igual mejor poner esas letras dentro de la figura. Y lo mismo de antes, si se puede ampliar un poco y si no pasa nada, se ven bien**

#### 4. CONCLUSIONES.

Tras realizar una aproximación al uso de la fotogrametría para el análisis del paisaje en explotaciones mineras a cielo abierto y en especial, de sus restauraciones, se ha llegado a la siguiente serie de conclusiones:

- La fotogrametría es la única herramienta que permite reconstruir los paisajes previos a explotaciones mineras a cielo abierto y así, evaluar los cambios que han sufrido estos lugares. Con esta técnica y, mediante el empleo de fotogramas aéreos históricos, se consigue recuperar con herramientas cartográficas elementos del paisaje en varios momentos históricos. Los productos que obtenemos son modelos digitales de elevaciones y ortofotografías. Cabe destacar, que los modelos digitales obtenidos no son modelos del

## *“Trabajando para la sociedad”*

terreno. Estos modelos incorporan toda aquella superficie como la vegetación o edificaciones. Aunque los softwares permiten filtrar la nube densa de puntos, en la mayoría de las ocasiones no funciona correctamente. Esto quiere decir que no podemos realizar operaciones precisas como el cálculo de volúmenes extraídos, pero sí podemos realizar un análisis global de los cambios en el relieve.

- Los mapas de pendientes y de orientaciones, elaborados mediante los modelos de elevaciones, proporcionan una manera visual de comprender la evolución del relieve en las zonas afectadas por la minería a cielo abierto. Por otro lado, la creación de curvas de nivel permite reconocer fácilmente los cambios en pequeños arroyos y otros elementos del paisaje, destacando la desaparición de depósitos glaciares en Carrasconte.
- En el transcurso de la restauración el relieve ha sufrido un proceso de regularización, simplificando las laderas y vaguadas para crear relieves suaves. Este es el aspecto que más contrasta con el paisaje previo a la actividad minera, donde estaba formado por un relieve irregular, con multitud de pequeños arroyos que más tarde fueron eliminados por la actividad minera.
- Las ortoimágenes han permitido identificar la evolución de elementos como la vegetación o la aparición de lagunas. En todos los casos se observa una eliminación total de vegetación y suelo. Tras las recientes restauraciones no se observa aún una evolución clara de la vegetación, a excepción de la colonización de pastos y algunas especies de matorrales. Otro aspecto muy característico es la aparición de lagunas, las cuales son mantenidas tras las restauraciones debido a que ayudan a integrar y naturalizar el paisaje.
- Los cambios en el paisaje que ha producido la minería a cielo abierto son siempre irreversibles. En los casos de estudio con explotaciones ubicadas en zonas de montaña (fuertes pendientes y condiciones climáticas duras con temperaturas bajas y fuertes precipitaciones) las tareas para una restauración total son inviables a nivel económico, aunque, las restauraciones pretenden integrar las explotaciones con el entorno de la manera más viable, tanto en el aspecto técnica como el económico.

## **AGRADECIMIENTOS.**

Especial agradecimiento al Servicio de Cartografía de la Universidad de León por el apoyo técnico y material en cuestión de drones y equipos GPS de alta precisión y, al Departamento de Geografía y Geología por los fotogramas MAPA de las respectivas áreas de estudio. Este trabajo está enmarcado en el proyecto LAMINE (si tiene referencia el proyecto ponla) (Dinámica ambiental, características y potencialidad de uso de lagunas mineras del noroeste de España), llevado a cabo por el grupo de investigación GEOPAT de la Universidad de León.

## **REFERENCIAS.**

- Arranz-González, J.C. (2015). Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: investigación, desarrollo e innovación en España. IGME.
- Harwin, S., Lucieer, A., Osborn, J. (2015). The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis. *Remote Sens.* 7, 11933–11953. <https://doi.org/10.3390/rs70911933>
- Izquierdo Vallina, J. (1986). Las alteraciones en el medio físico y natural producidas por las explotaciones a cielo abierto. *Actas de Minería y Medio Ambiente*. I.B. Príncipe de Asturias. Aller.
- James, M.R., Robson, S., Smith, M.W. (2017). Smith, M.W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and

*"Trabajando para la sociedad"*

- directly georeferenced surveys. *Earth Surf. Process. Landf.* 42, 1769–1788. <https://doi.org/10.1002/esp.4125>
- López Trigal, Lorenzo. (1995): Las áreas mineras del norte de León y Palencia. Jornadas sobre análisis de espacios marginales en Castilla y León. Asociación de Geógrafos de Castilla y León, Valladolid: 39-51.
- Maceda Rubio, A., Maurín Álvarez, M. (2022). Laciana. En L. López Trigal et al. (Ed.), *El territorio de León: provincias, comarcas y ciudades* (pp. 176-207). Universidad de León.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A., Pérez-Porras, F.J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 72, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- Martínez-Fernández, A., Serrano, E., Pisabarro, A., Sánchez-Fernández, M., de Sanjosé, J.J., Gómez-Lende, M., Rangel-de Lázaro, G., Benito-Calvo, A. (2022) The Influence of Image Properties on High-Detail SfM Photogrammetric Surveys of Complex Geometric Landforms: The Application of a Consumer-Grade UAV Camera in a Rock Glacier Survey. *Remote Sens.* 14, 3528. <https://doi.org/10.3390/rs14153528>
- Matías Rodríguez, R. (2020). Historia de la minería en la provincia de León. Consejería de Cultura y Turismo Junta de Castilla y León.
- Nesbit, P., Hugenholtz, C. (2019). Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. *Remote Sens.* 11, 239. <https://doi.org/10.3390/rs11030239>
- Pérez Álvarez, J.A., Bascón Arroyo, F.M., Crespo Pérez, F.J., Charro Lobato, L. (2013). Project Casey Jones, 1945-46: el vuelo histórico "fotogramétrico" de la serie A en España y sus aplicaciones cartográficas. *Mapping*. Nº 159, págs. 14-25.
- Redondo Vega, J.M. (1988). Las minas de carbón a cielo abierto en la provincia de León: transformación del medio y explotación de recursos no renovables. Universidad de León.
- Redondo-Vega, J. M., Melón-Nava, A., Peña-Pérez, S. A., Santos-González, J., Gómez-Villar, A., González-Gutiérrez, R. B. (2021). Coal pit lakes in abandoned mining areas in León (NW Spain): characteristics and geoecological significance. *Environmental Earth Sciences*, 80(24), 792. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-10037-6>
- Vales, J.J., Carpintero, I.R., Méndez, E., Montoya, G., Pino, I., Prieto Molina, R., Prieto Molina, de Azcárate Fernández, F.G., Cáceres, F., Moreira Madueño, J.M. (2010). Producción de ortofotos históricas para la generación de bases de datos temáticas. Cartografía de usos y coberturas del suelo. REDIAM. La información geográfica al servicio de los ciudadanos: de lo global a lo local. XV Congreso Nacional de Tecnología de la Información Geográfica. Sevilla: Universidad de Sevilla, pp. 370-384.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). 'Structure from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>