

DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE CAMBIOS GEOMORFOLÓGICOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE VUELOS HISTÓRICOS

JAVIER CARDENAL ESCARCENA ⁽¹⁾, EMILIO MATA DE CASTRO ⁽¹⁾,
JOSÉ LUIS PÉREZ GARCÍA ⁽¹⁾, JORGE DELGADO GARCÍA ⁽¹⁾
ALBERTO GONZÁLEZ DÍEZ ⁽²⁾, J.R. DÍAZ DE TERÁN ⁽²⁾, I. OLAGUE ⁽²⁾.

⁽¹⁾Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Escuela Politécnica Superior de Jaén.
Universidad de Jaén. Campus de las Lagunillas s/n. 23071 Jaén (España)

⁽²⁾Dpto. de Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada. Universidad de Cantabria.
Avda. Los Castros s/n. 39005 Santander.

¹([jcardena](mailto:jcardena@ujaen.es), [emata](mailto:emata@ujaen.es), [jlperz](mailto:jlperz@ujaen.es), [jdelgado](mailto:jdelgado@ujaen.es))@ujaen.es, ²([gonzalea](mailto:gonzalea@unican.es), [diazjr](mailto:diazjr@unican.es))@unican.es

RESUMEN

Las modificaciones del relieve se deben principalmente a procesos geodinámicos, tanto externos como internos, al cambio climático y a la intervención humana. La dinámica de estos procesos se puede manifestar como un lento y progresivo cambio o como modificaciones importantes del relieve. Los cambios geomorfológicos se pueden considerar como modificaciones de la geometría de la pendiente. Por tanto, la mejora en la medida de la evolución de esta geometría, proporciona un mejor conocimiento de este cambio. Para ello, se propone el empleo de la fotogrametría digital y la comparación de vuelos correspondientes a diferentes fechas. Se han analizado diversos vuelos sobre el Valle del Pas (Cantabria), tanto históricos como actuales, estableciendo un método de comparación de vuelos de diferentes épocas y características para, a través del análisis de los MDT, explorar las posibilidades de determinación del cambio geomorfológico.

Palabras clave: Monitorización, deslizamientos, MDT, fotogrametría digital, geomorfología

DETECTION AND QUANTIFICATION OF GEOMORPHOLOGIC CHANGES FROM HISTORICAL FLIGHTS ANALYSIS

ABSTRACT

Terrain relief modifications are mainly due to geodynamic processes, both internal and external earth processes, to climate change and to human activities. The dynamics of these processes can be shown as slow and progressive changes or as major relief modifications. Geomorphologic changes can be considered as slope geometry modifications. Thus the

improvement in the monitoring of slopes provides a better knowledge of the geomorphologic change. In this work we propose the use of digital photogrammetry and the comparison of different dates photogrammetric flights in order to measure the change. Several flights from 1957 to 2003 over the Pas Valley (Cantabrian Range, Northern Spain) have been studied. A method to compare flights from different dates and features has been set up in order to explore the possibilities of monitoring the geomorphologic change through the analysis of digital terrain models (DTM).

Keywords: Monitoring, landslides, DTM, digital photogrammetry, geomorphology

1. Introducción

Los movimientos en masa son unos procesos geomorfológicos muy importantes cuyo desarrollo causa una potencial amenaza para la vida humana y bienes. Son uno de los procesos naturales con mayor riesgo asociado en cuanto a número de víctimas y daños materiales. Ayala-Carcedo (1994) analiza el periodo 1000-1994 y concluye que los deslizamientos de ladera han supuesto para ese periodo una pérdida de vidas humanas superiores a 280.000 personas, siendo el tercer riesgo natural (después de terremotos e inundaciones) en coste de vidas humanas. Hay que tener en cuenta, además, que este coste ha continuado creciendo en la última década debido al aumento demográfico y al incremento del impacto ambiental. Los costes económicos del fenómeno son también muy importantes. Así, en España el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) estima unos costes asociados a los deslizamientos para el periodo 1990-1994 de unos 36 millones de euros/año.

Por tanto existe un interés real para establecer los mecanismos de los movimientos de ladera y obtener los mapas de susceptibilidad que permitan una adecuada ordenación del territorio, ya que una de las herramientas más útiles para mitigar el desarrollo de estos procesos es la elaboración de mapas de riesgo y de susceptibilidad. Sin embargo, la elaboración de tales mapas no es una tarea sencilla, debido a la complejidad de estos fenómenos y a las dificultades para predecir adecuadamente su comportamiento futuro.

Los proyectos del Plan Nacional I+D+i FODISPIL (Aplicación de la FOTogrametría DIGital al análisis de la Susceptibilidad de los Procesos de Inestabilidad de Laderas, 2003-2005) y MAPMUT (La Mejora del Análisis de Peligrosidad mediante el desarrollo y empleo de Modelos digitales Útiles de la geometría del Terreno, 2007-2009) están enfocados hacia la mejora en la realización de mapas de susceptibilidad a partir de información de entrada de gran calidad (González-Díez, *et al.*, 2004 y Cardenal *et al.*, 2006a). Esta información, principalmente cartográfica, se ha generado mediante técnicas de fotogrametría digital. Las técnicas de fotogrametría digital permiten la generación de modelos digitales de elevación (MDT) y la captura tridimensional, definida en coordenadas terreno XYZ, de los factores condicionantes y los rasgos geomorfológicos característicos de los deslizamientos (vegetación, litología, fracturas, coronas de deslizamientos, etc.). Ello de por sí introduce una mejora sustancial sobre la cartografía en 2D obtenida mediante métodos clásicos de fotointerpretación a través de estereoscopio sobre

fotografías aéreas o sobre cartografías previas (en ocasiones de escala y calidad inadecuada) realizadas en los trabajos habituales de carácter geomorfológico.

En este trabajo se analizan las posibilidades de detección de cambios geomorfológicos a partir de vuelos específicos realizados en el marco de los proyectos de investigación anteriormente citados, los cuales se han comparado con otros vuelos previos existentes en las zonas de trabajo. Es importante indicar que el trabajo no sólo se ha limitado a la cartografía de los deslizamientos de ladera, sino que se ha extendido a otros elementos de interés tales como los cambios antrópicos (desmontes y rellenos) asociados a áreas afectadas por inestabilidades que se han corregido artificialmente. La idea ha sido evaluar las posibilidades de detección y cuantificación de estos cambios (superficies afectadas, espesores de material movilizado en superficie y cubicaciones).

2. Área de estudio

Esta metodología está siendo aplicada en dos ámbitos climáticos y geológicos diferentes localizados en Cantabria (zona del Valle del Pas) y en un sector de las provincias de Jaén y Granada. Los resultados presentados en este trabajo se han centrado en el área de Villafufre (comarca del Pas-Miera, Cantabria). El área de estudio de Villafufre tiene una extensión de 3 km² y un relieve pronunciado que varía entre los 100 m. y los 450 m. s.n.m. Los materiales son básicamente de edad triásica (arcillas, yesos y ofitas del Keuper) con calizas y dolomías jurásicas situadas en las zonas superiores ([figura 1](#)).

Se han descrito sectores de drenaje preferente que comunican las dolinas de las partes superiores con las zonas bajas del valle. En relación a estas áreas de drenaje, y ligados a episodios especialmente lluviosos, es frecuente que se desarrollen y/o reactiven los deslizamientos. Los movimientos de ladera en Villafufre, de tipología habitual de flujos de tierra (earth-flows), afectan aproximadamente a un 45% del área y se localizan principalmente en el Keuper (González-Díez, 1995). El área de estudio fue analizada, desde un punto de vista geomorfológico, con el fin de identificar las zonas en las que se han producido cambios en el relieve durante los últimos 15 años que abarca el estudio. Dentro del área de estudio se identificaron varias zonas en las que hay pruebas manifiestas de cambio geomorfológico.

3. Vuelos históricos y actuales

Se han utilizado diversos vuelos históricos y actuales en el marco de los proyectos mencionados. Estos vuelos se han procesado con estaciones fotogramétricas digitales SOCET SET® y Leica Photogrammetry Suite® (LPS). Un resumen de las características de estos vuelos se presenta en la [tabla 1](#).

3.1. Vuelos históricos

Un aspecto interesante de estos proyectos de investigación, ha sido sin duda el procesado de los vuelos históricos, lo cual ha permitido ampliar el registro temporal de la información disponible. Se ha dispuesto de un total de cinco vuelos (tanto en color como pancromáticos) sobre la zona de trabajo para el periodo entre 1957 y 2001 con escalas entre 1:33.000 y 1:15.000. La calidad de los contactos (en algunos casos ha sido imposible la localización de los negativos originales para su correcta digitalización) y los datos disponibles (en algunos vuelos no se dispone del certificado de calibración de la cámara empleada) han llevado a procesar sólo tres vuelos: un vuelo a escala 1:33.000 realizado con película pancromática del año 1957 (empleado sólo para su evaluación y comprobación de su calidad métrica); un vuelo a escala 1:20.000 pancromático realizado el año 1970; y un vuelo a escala 1:15.000 con película en color volado en 1988. Todos los fotogramas han sido escaneados con un escáner fotogramétrico (Vexcel Ultrascan 5000) utilizando un tamaño de pixel entre 7.5 y 12 micras.

3.2. Vuelos recientes y ejemplos de aplicación

Dentro del proyecto FODISIL se han realizado un total de 8 vuelos. Los vuelos, en color y en película infrarroja, han sido habitualmente de escala 1:5000, aunque se ha volado también a escalas 1:3500 y 1:10000 para comprobación de escalas óptimas de vuelo. La cámara empleada ha sido una Zeiss RMKTOP. Durante el último vuelo, realizado en el marco del proyecto MAPMUT, se ha elegido la opción de un vuelo combinado cámara digital (Z/I DMC) y LIDAR (Leica ALS50-II) equipado con sistemas GPS/IMU para orientación directa.

Los vuelos hechos con cámara analógica se han orientado mediante una red de puntos de apoyo diseñada específicamente para este proyecto. Los puntos de control se han ubicado en áreas estables. El ajuste indica que es posible obtener errores en coordenadas terreno inferiores a ± 0.2 m. (gracias al tamaño de pixel empleado). Debido a la buena calidad de las imágenes (tanto métrica como resolutive) ha sido posible la mejora en la cartografía de rasgos premonitorios en relación a imágenes previas. Además combinando toda la información disponible se han podido establecer las evoluciones temporales de algunos procesos. La [figura 2](#) muestra un ejemplo de evolución de un rasgo detectado en 1988. En el vuelo del 2003, se aprecia como la evolución del deslizamiento generado destruye una casa y la vegetación cercana (Olague *et al.*, 2004; Cardenal *et al.*, 2006a).

En la [figura 3](#) se presenta otro ejemplo de evolución de un deslizamiento. La evolución temporal se ha establecido a partir de la restitución de los vuelos de 1970, 1988 y 2003. En base a medidas realizadas desde las coronas a un muro de piedra estable se han podido establecer, por ejemplo, tasas de desplazamiento anual entre 0.07-0.11 m/año (Olague *et al.*, 2004).

Por otro lado, ha sido también interesante comprobar las características métricas del vuelo de 1957. Este vuelo, conocido como el "vuelo americano" (Urteaga y Nadal, 2001), constituye una valiosa fuente de información para estudios de fotointerpretación y de evolución de usos del terreno. Aunque a priori las características de este vuelo (1:33.000) lo hacían inapropiado para su empleo en

el análisis de deslizamientos en Villafufre, dada la magnitud de los movimientos de esta área ([figura 1](#), [figura 2](#) y [figura 3](#)), es interesante su evaluación. En efecto, frecuentemente se emplean métodos de mayor imprecisión para obtener la información básica del terreno para la modelización de los deslizamientos y elaboración de los mapas de susceptibilidad.

En cualquier caso, hay que tener presente los importantes problemas que pueden surgir al utilizar este tipo de fotografías, dado que no está garantizada una apropiada conservación de los contactos, no se dispone de marcas fiduciales ([figura 4](#)) y hay una carencia casi absoluta de datos de la cámara empleada (a excepción de la distancia focal que aparece como dato marginal). Además, existe un serio problema a la hora de poder seleccionar puntos de control adecuados habida cuenta los drásticos cambios en el paisaje sucedidos en los últimos 50 años. En este sentido el empleo del método de autocalibración con parámetros adicionales (Kraus, 1992) de acuerdo con el modelo de 12 parámetros de Ebner (Leica Geosystem, 2003) ha permitido alcanzar precisiones del orden de ± 2 m. y ± 3 m. en planimetría y altimetría, respectivamente. La no utilización de parámetros adicionales o el empleo de un modelo de parámetros adicionales inadecuado eleva los errores a ± 7 m. y ± 18 m. en planimetría y altimetría, respectivamente (Cardenal *et al.*, 2006b).

4. Generación de modelos digitales del terreno para el análisis del cambio geomorfológico

Si bien la fotogrametría digital es ya de por sí un avance para el estudio de la evolución de los cambios en el terreno debido a deslizamientos o a otras causas, como se ha indicado en el apartado anterior, es obvio que su potencial puede ser mayor. Las estaciones digitales permiten una mejor y más precisa fotointerpretación de los cambios (Brunsdén y Chandler, 1996; Walstra *et al.*, 2004; Fernández del Castillo *et al.*, 2006), así la restitución tridimensional estereoscópica permite, a su vez, un mejor control de la evolución temporal de los rasgos (coronas de deslizamientos, por ejemplo; [figura 3](#)).

Por otro lado, la generación de un MDT de suficiente detalle puede ampliar significativamente las posibilidades de estudio. Gracias a la comparación de modelos digitales del terreno de diferentes épocas, se pueden estimar secciones, superficies movilizadas (dado que el espesor real puede ser desconocido si no está localizada la profundidad a la que rompe el terreno) e incluso realizar balances del material desplazado (tanto depósitos como denudación). Pero para ello se requieren datos de partida de una adecuada calidad, ya que la generación de MDT en una estación digital necesita de unas imágenes de una determinada resolución geométrica y radiométrica para que funcionen apropiadamente los algoritmos de correlación. Si bien esta calidad se puede controlar en vuelos ad hoc que se planifiquen para un estudio concreto (en el pliego de condiciones se especificarán la calidad y distribución del control, la escala, el GSD, etc., necesarios para alcanzar los requisitos de precisión de acuerdo con la magnitud de los desplazamientos), no sucede lo mismo con la calidad de los vuelos anteriores que se puedan emplear. Si se acude a vuelos históricos su calidad puede estar de hecho muy limitada y hacerla inadecuada para la generación de un MDT útil para el análisis geomorfológico, aunque pueda ser de calidad suficiente para un estudio de fotointerpretación o de evolución planimétrica de rasgos.

4.1. Orientación de los vuelos de 1988 y 2003 en Villafufre

En este trabajo se ha analizado el vuelo de 1988 y se ha comparado con el vuelo de 2003. En primer lugar, se ha establecido como fija la orientación del vuelo de 2003 en base a puntos de control. La mayor parte de estos puntos (seleccionados para una apropiada medida en los fotogramas 1:5000 de 2003) no pudieron ser identificados en el vuelo de 1988, por no existir en esas fechas, por diferente resolución de las imágenes 1:15000, incertidumbre en su identificación, etc. Por tanto, se densificó una red de control a partir del vuelo de 2003 para que pudiese ser empleada en la orientación del vuelo de 1988. A pesar de haber transcurrido sólo 15 años entre ambos vuelos, la zona ha sufrido importantes cambios por lo que se estableció una red de puntos bien definidos y estables en esquinas (con cota a techo) de construcciones. Así, detalles en carreteras, caminos rurales, cruces, vallas, etc., no se emplearon por lo general al ser evidentes las muestras de su modificación en esos años. Para detectar anomalías o errores de identificación y medida en los puntos seleccionados se midieron agrupaciones de 2 ó 3 puntos por zona, en lugar de puntos aislados. Se transfirieron un total de 75 puntos, de los cuales 12 se emplearon como puntos de control y 63 como puntos de comprobación (*check points*). En la [tabla 2](#) se indican los errores del vuelo de 1988 y se incluye la propagación del error del vuelo de 2003 a 1988, expresada como combinación cuadrática de los errores de ambos vuelos (tanto de los puntos de control como comprobación). Al proceder de esta forma, se fuerza la orientación del vuelo de 1988 en relación al del 2003. Así, la comparación entre ambos vuelos es mucho más fiable que si éstos hubiesen sido orientados separadamente. Los errores establecidos permiten determinar a priori la magnitud mínima de los desplazamientos que se puedan identificar.

Hay que indicar que el vuelo de 1988 tiene una calidad geométrica y radiométrica inferior al del 2003. Como problemas adicionales hay que mencionar que se carecía de certificado de calibración de la cámara y además de las cuatro marcas fiduciales (la cámara empleada para la realización del vuelo fue una Wild RC10) sólo se podían identificar dos de ellas. De ahí que este vuelo se haya considerado a efectos prácticos como vuelo histórico, a pesar de tener sólo 20 años de antigüedad. Al igual que en el vuelo de 1957, se decidió aplicar el método de autocalibración con parámetros adicionales (Kraus, 1992) para poder así eliminar los probables errores sistemáticos que estarían presentes en los fotogramas. Se utilizó el programa CAP-A de Orima® (funcionando en entorno LPS®). Sin embargo, no se logró una mejora significativa de la precisión comparado con un ajuste de haces convencional sin autocalibración. Es más, en algunas zonas del bloque se deterioró la precisión de los puntos de comprobación, a pesar de haber seleccionado para el cálculo sólo aquellos coeficientes de parámetros adicionales que eran estadísticamente significativos. Por ello se abandonó esta línea de trabajo en el caso del vuelo de 1988 y se tomó como válida la orientación basada sólo en los puntos transferidos del vuelo de 2003, asumiendo los posibles errores sistemáticos.

4.2. Generación de MDT

Una vez considerada como válida la orientación conjunta de ambos bloques, se procedió a la generación de los modelos digitales del terreno para ambas épocas en aquellas zonas donde los estudios de fotointerpretación habían detectado áreas de posibles cambios. De acuerdo con las experiencias previas de los autores en estudios similares de deslizamientos, se generó un primer MDT por correlación a partir del vuelo de referencia del año 2003 (muy superior en calidad respecto al de 1988). Este MDT (generado en SOCET SET®) se lanzó en modo TIN con un espaciado de 1 m. A este primer MDT se le añadieron líneas de ruptura (caminos, vallas, terraplenes, etc.) y se procedió a su edición superponiendo las curvas de nivel al modelo estereoscópico. De esta forma, se densificaba el MDT sólo en aquellas zonas donde era necesario y se consideró válido una vez las curvas de nivel reflejaban adecuadamente la topografía del terreno.

Finalizada la edición del MDT correspondiente al vuelo de 2003 en la zona de detalle seleccionada para el análisis, el MDT era cargado sobre el vuelo de 1988, analizando las diferencias existentes a través de la visión estereoscópica y procediendo a la reedición. Mediante este procedimiento, por un lado, se garantiza la coincidencia de los modelos en las zonas consideradas como estables y, por otro lado, se optimiza el tiempo dedicado a la generación y posterior edición de los MDT frente a la metodología de la generación y edición independiente de los MDT para cada uno de los vuelos disponibles.

5. Áreas de interés analizadas. Ejemplos

Se han seleccionado varias áreas en las que la comparación de los MDT para ambas épocas ha permitido evaluar cambios volumétricos producidos bien por deslizamientos o por otras actividades antrópicas. En estas áreas se han comparado los MDT y calculado diferentes secciones y volúmenes. En la [figura 5](#) y [figura 6](#) se muestran los análisis hechos en la zona 2 de Villafufre. Esta zona corresponde a un área de actuaciones antrópicas donde se han denudado algunos sectores y rellenado barrancos con el fin de corregir el terreno (probablemente afectado por deslizamientos previos). En este ejemplo, se han llegado a detectar variaciones de cota del terreno hasta de 2.75 m. La [figura 5](#) representa una comparación de los MDT de 1988 y 2003. Los colores azules representan aquellas zonas donde el modelo de 2003 está por debajo del modelo de 1988 (es decir el terreno se ha denudado), mientras que los colores rojizos representan las áreas donde el modelo de 2003 está por encima del de 1988 (se ha depositado material en las vaguadas).

En la [figura 5](#) se señala con un círculo rojo el deslizamiento comentado previamente en la [figura 3](#). A pesar que en este deslizamiento se han detectado importantes cambios desde el año 1988 y que la superficie del deslizamiento queda bien caracterizada en el MDT, no se han detectado variaciones significativas en los MDT de las dos épocas. En la [figura 6](#) se representan esquemáticamente las zonas de erosión-depósito y se añade un resumen de algunos datos cuantitativos de los cambios producidos (superficies y volúmenes implicados) en la zona.

El siguiente ejemplo (zona 4 de Villafufre) es un claro ejemplo de deslizamiento tipo flujo de tierras (earth flow) generado a partir del año 1988. Este deslizamiento, cuyos rasgos ya aparecen en las imágenes de 1988, provoca una profunda excavación del terreno y un retroceso pronunciado de la corona que destruye e inutiliza el camino ([figura 7](#) y [figura 8](#)). La [figura 7](#) representa una captura en pantalla partida del deslizamiento de la zona 4. En dicha figura se puede observar la imagen correspondiente al año 2003 (izq.) y la del año 1988 (dcha.). Se puede apreciar claramente la evolución del movimiento de tierra. La [figura 8](#) muestra un anáglifo de la zona que permite observar la morfología de la zona en visión tridimensional.

La [figura 9](#) representa una comparación de los MDT de 1988 y 2003. Nuevamente, los colores azules representan aquellas zonas donde el modelo de 2003 está por debajo del modelo de 1988 (es decir el terreno se ha denudado), mientras que los colores rojizos representan las áreas donde el modelo de 2003 esté por encima del de 1988 (ha habido relleno de material). Los cálculos efectuados (mediante el software I-Site Studio®) indican que para esta zona se ha producido una erosión del orden de 890 m³ y un relleno de 350 m³.

La [figura 10](#) muestra dos secciones longitudinales según el eje del deslizamiento correspondientes a los MDT de los años 1988 (perfil azul) y 2003 (perfil rojo). Se aprecia claramente como en las áreas de cabecera se ha producido una importante erosión (con diferencias en Z de hasta -4 m.), mientras que el material movilizado se ha depositado a lo largo de la vaguada (con diferencias máximas en Z de hasta ± 3 m.).

6. Conclusiones

La aplicación de técnicas de fotogrametría digital para obtener información de alta calidad para la elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos, modelización de procesos y cuantificación de cambios volumétricos en el paisaje tiene varias ventajas:

- Los vuelos fotogramétricos permiten la cobertura de áreas relativamente extensas (10-100 km²) con un adecuado nivel de precisión (0.1 a 1m.), siendo una técnica de coste moderado, comparada con otras técnicas de teledetección (imágenes de satélite de alta resolución) o de trabajo en campo.
- La fotogrametría digital es una técnica bien conocida y establecida que se ha aplicado extensamente en cartografía durante los últimos quince años. Además, la alta calidad de imagen es muy útil para establecer la susceptibilidad a los deslizamientos a partir de fotointerpretación.
- Una ventaja fundamental radica en el hecho de que se pueden obtener los rasgos geomorfológicos restituidos en formato espacial georreferenciado (tridimensional).
- El análisis de modelos digitales del terreno de adecuada calidad y que representen fielmente el terreno a la escala de los cambios geomorfológicos constituye una poderosa

herramienta para caracterizar dichos cambios. En este sentido, la generación de los MDT en modo TIN y la edición en base a curvas de nivel superpuestas al modelo estereoscópico supone generar una información de gran utilidad para el estudio cuantitativo de modificaciones del terreno. En estos casos, la comparación de diferentes épocas, especialmente si se emplean vuelos antiguos, conviene que se realice a partir de un único proyecto fotogramétrico orientado simultáneamente. El empleo de vuelos de diferentes fechas (especialmente con vuelos históricos) orientados de forma independiente (al igual que la generación de los MDT) puede no tener la suficiente precisión para discriminar cambios debido a procesos geodinámicos, ya que las diferencias podrían ser debidas a errores acumulados de orientación.

- El empleo de vuelos históricos puede incrementar el periodo de registro de los procesos. Estas imágenes pueden proveer información métrica incluso en el caso de viejos proyectos fotogramétricos (por ejemplo el "vuelo americano" en nuestro ámbito geográfico). La calidad de esta información métrica dependerá de la calidad de las propias imágenes, así como de los datos disponibles. En cualquier caso, la obtención de puntos de control apropiados para la correcta orientación externa del bloque puede ser extremadamente difícil si los cambios en el paisaje han sido grandes. Una red densa y adecuada de puntos de control y comprobación es esencial tanto si se emplean o no modelos matemáticos de autocalibración que permitan la corrección de errores sistemáticos.

Las líneas de trabajo presentes y futuras en el marco del proyecto de investigación MAPMUT (FODISPIL ya ha concluido en la actualidad) están relacionadas con el empleo de sensores aéreos de última generación (sistemas LIDAR para la generación de MDT y cámaras digitales para imágenes de alta resolución; GSD entre 0.10-0.15 m.), así como de sistemas terrestres (láser-escáner terrestre y fotogrametría de objeto cercano) para la obtención de levantamientos detallados de áreas de deslizamiento actualmente activas.

7. Agradecimientos

El presente trabajo ha sido financiado por los proyectos de I+D+I concedidos por el Ministerio de Educación y Ciencia REN 2002/0079/RIES (FODISPIL) y CGL2006-05903/BTE (MAPMUT) y forma parte de las actividades del Grupo de Investigación TEP-213 (Sistemas Fotogramétricos y Topométricos; Grupo de Investigación del Plan Andaluz de Investigación, Desarrollo e Innovación de la Junta de Andalucía). Igualmente el trabajo ha sido parcialmente financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Jaén. Nuestro agradecimiento a I-Site Pty Ltd por las facilidades en el empleo del software I-Site Studio.

Referencias bibliográficas

- Ayala-Carcedo, F.J., (1994): "Socioeconomic impacts and vulnerability resulting from slope movements". In *Proc. of the US-Spain Workshop on Natural Hazards. Corominas and Georgakakos* (Eds.), Iowa University, pp 235-254.
- Brunsdon, D. y Chandler, J.H. (1996): "Development of an episodic landform change model based upon the Black Ven mudslide 1946-1995". En Anderson, M.G. y Brooks, S.M. (eds.), *Advances in Hillslope Processes*, Wiley, Chichester, UK, 869-896.
- Cardenal, J., Delgado, J., Mata, E; González-Díez, A., Remondo, J., de Terán, J.R., Francés, E., Salas, L., Bonachea, J., Olague, I., Felicísimo, A., Chung Ch. J., Fabbri, A. and Soares, A., (2006a): "The use of digital photogrammetry techniques in landslide instability". In *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Geodetic Roles*, (Gil Cruz and Sanso, Eds.). IAG Springer Series, pág. 259-264.
- Cardenal, J., Delgado, J., Mata, E; González-Díez, A., Olague, I., (2006b): "Use of historical flight for landslide monitoring". *Proceedings of Spatial Accuracy 2006. 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, pág. 129-138. Lisboa. Portugal. Julio 2006.
- Fernández del Castillo, T., Delgado, J., Cardenal, J., Irigaray, C., Rachid el Hamdouni y Chacón, J. (2006): "Improvement of positional accuracy of a landslide database using digital photogrammetry techniques". *Proceedings of Spatial Accuracy 2006. 7th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*, pág. 139-149. Lisboa. Portugal. Julio 2006.
- González-Díez, A. (1995): "Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje". Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo. Spain.
- González-Díez, A.; Cardenal, J.; Delgado, J.; Remondo, J.; Felicísimo, A.; Chung, Ch.J.; Fabbri, A.; Soares, A.; Díaz de Terán, J.R.; Francés, E.; Salas, L.; Mata, E.; Bonachea, J.; Olague, I., (2004): "The FODISPIL Project. An improvement of the landslide susceptibility maps". In *32nd International Geology Congress, Session 11. T11.3: GIS technology and statistical modelling for assessing landslide hazard and risk*. Florence (Italy)
- Kraus, K. (1992): "Photogrammetry. Volume 1: Fundamental and Standard Processes". Ed. Dümmler. 397 pp.
- Leica Geosystems (2003): "Leica Photogrammetry Suite, OrthoBASE & OrthoBASE Pro. User's Guide". Leica Geosystems GIS & Mapping LLC. 516 pp.
- Olague, I., A. González-Díez, Remondo, J., Bonachea, J., Díaz de Terán, J.R. and Cendrero, A. (2004): "The study of temporal occurrence of landslides using digital photogrammetry", In *32nd International Geology Congress, Session 216, G07.05-Geomorphometry and topographic analysis*. Florence (Italy).
- Urteaga L. y Nadal F. (2001): "Las series del mapa topográfico de España a escala 1:50.000". Ministerio de Fomento, Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.
- Walstra, J., Chandler, J.H., Dixon, N. y Dijkstra, T.A. (2004): "Time for change-quantifying landslide evolution using historical aerial photographs and modern photogrammetric methods. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34 (Part XXX), Commission 4, 475-481.

TABLAS

Tabla 1. Principales características y resultados de los vuelos analizados en FODISPIL y MAPMUT (áreas de Villafufre y Miera)

Año	Escala	GSD* (m)	rms del bloque (m)		Observaciones
			XY	Z	
1957	1:33000	0.72	2.02	2.74	Contactos papel B/N
1970	1:20000	0.23	0.86	1.98	Contactos papel B/N
1988	1:15000	0.24	0.23	0.32	Película negativa color
2003	1:5000	0.12	0.15	0.21	Película negativa color Orientación mediante puntos de control
2004	1:10000	0.15	0.09	0.20	Película negativa color Orientación mediante puntos de control
2007		0.15-0.20	--	--	Cámara Z/I DMC. Orientación directa MDS mediante LIDAR

*GSD: Ground sample distance (tamaño del píxel sobre el terreno)

Tabla 2.- Errores de orientación del vuelo de 1988 y 2003 en Villafufre

	Emc X (m)	Emc Y (m)	Emc Z (m)	Observaciones
2003	0,16	0,14	0,16	
1988 (PC)	0,08	0,09	0,03	12 puntos de control (PC)
1988 (CP)	0,15	0,16	0,28	63 puntos de comprobación (CP)
2003-1988	0,23	0,23	0,32	Transferencia errores 2003-1988

FIGURAS

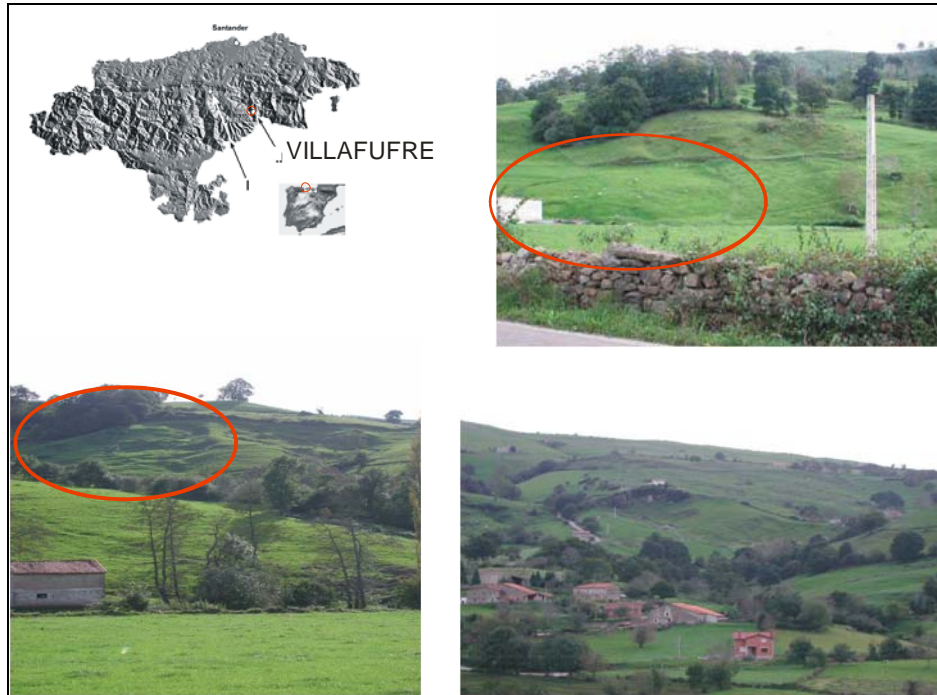


Figura 1. Área de trabajo de Villafufre (Comarca del Pas-Miera, Cantabria). Las áreas en rojo señalan diversas coronas y rasgos geomorfológicos de deslizamientos de ladera.



Figura 2. Evolución de un deslizamiento para el periodo 1988 (derecha) – 2003 (izquierda).

Se puede apreciar la destrucción de la casa, así como la desaparición de los árboles debido a la inestabilidad del terreno.

Cardenal Escarcena J. et al. (2008): "Detección y cuantificación de cambios geomorfológicos a partir del análisis de vuelos históricos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 150-165, ISSN: 1578-5157



Figura 3. Evolución temporal de coronas de deslizamientos desde 1970 a 2003 en un flujo de tierra localizado en el área de Villafufre (derecha).
Izq.: 2003, Centro: 1988; Dcha.: Evolución de las coronas en el periodo 1970-2003.

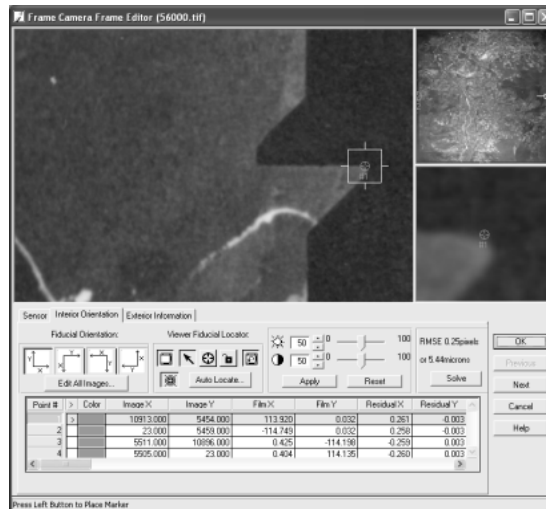


Figura 4. Detalle de marcas de orientación interna de la cámara del vuelo de 1957 en Villafufre.
Captura de pantalla del editor de imagen (*Frame Editor*) de LPS®

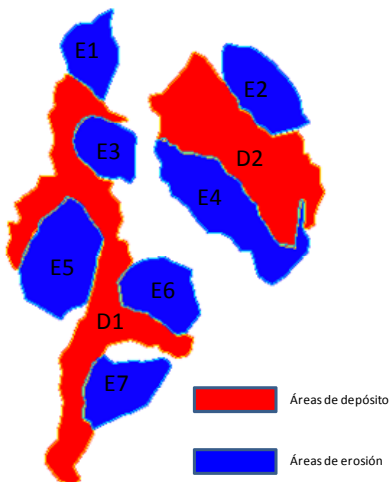


Figura 5. Comparación de los MDT de 1988 y 2003 en la zona 2 de Villafufre.

Los colores azules implican denudación del terreno y los colores rojizos depósito.

En el círculo rojo se indica la situación del deslizamiento de la figura 3.

Captura de pantalla del software I-Site Studio®.



	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
S m ²	422	609	408	1048	901	554	554
TOTAL DE EROSIÓN	-3953		m³				
	D1	D2					
S m ²	2337	1817					
TOTAL DEPÓSITO	2710		m³				

Figura 6. Zona 2 de Villafufre.

En rojo se representan las áreas de depósito y en azul las de erosión o denudación.

La estimaciones de cambios volumétricos se han realizado con I-Site Studio®.

Cardenal Escarcena J. et al. (2008): "Detección y cuantificación de cambios geomorfológicos a partir del análisis de vuelos históricos", *GeoFocus (Artículos)*, n° 9, p. 150-165, ISSN: 1578-5157



**Figura 7. Evolución del deslizamiento en la zona 4 de Villafufre.
Izq.: 2003, Dcha.: 1988**

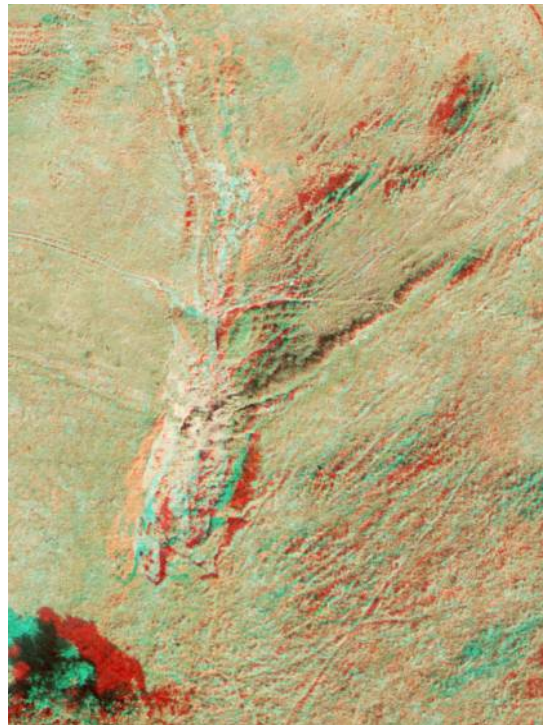


Figura 8. Anaglifo del deslizamiento de la zona 4 de Villafufre (imágenes de 2003).

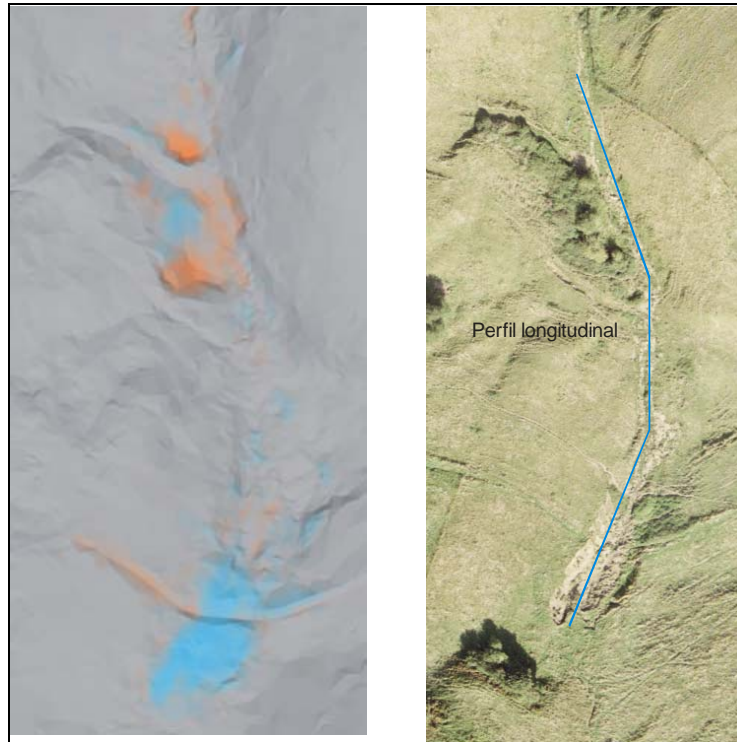


Figura 9. Comparación de los MDT de 1988 y 2003 en la zona 4 de Villafufre (izquierda).

Los colores azules implican denudación del terreno y los colores rojizos relleno o depósito.

En la imagen derecha (vuelo 2003) se indica el trazado en planta del perfil longitudinal del deslizamiento (figura 10).

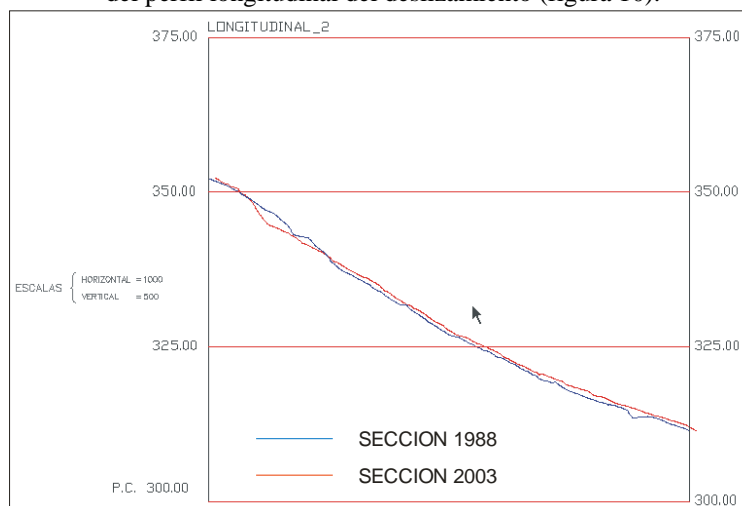


Figura 10. Perfiles longitudinales según el eje del deslizamiento de la zona 4 de Villafufre.

El perfil corresponde al señalado en la figura 9.