

GEOMORFOLOGÍA EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO, UNA PERSPECTIVA MULTIESCALAR Y DIACRÓNICA.

Ramón PELLITERO ONDICOL
School of Geosciences. University of Aberdeen.
r.pellitero-ondicol@abdn.ac.uk

Recibido: 03/03/2014

Aceptado: 17/09/2014

RESUMEN: Se presentan ejemplos de estudios geomorfológicos a distintas escalas, tanto relativos a procesos actuales como formas y depósitos resultados de procesos geomorfológicos pasados. A escala local se muestran los ejemplos de la gestión de deslizamientos y desprendimientos en la Calzada del Gigante (Irlanda del Norte) y el estudio de flujos de derrubios de Blatten (Suiza), así como las aplicaciones de la geodiversidad a escalas de detalle. A escala regional los ejemplos se centran en la protección y promoción del relieve por su valor patrimonial en Castilla y León y Suiza, explicado como entroncan con los procesos de ordenación territorial. A escala global se explica como la geomorfología subglaciar es esencial en la explicación del proceso de fusión acelerado de la Antártida Occidental, con implicaciones para el aumento del nivel del mar en todo el mundo. Por último se exponen los estudios de ambientes y procesos cuaternarios en Europa, tanto climáticos (el Dryas Reciente como evento climático que puede repetirse en el contexto actual) como dinámicos (la colonización del territorio desde el Neolítico y la intensificación de procesos erosivos). Con este trabajo se pretende destacar la importancia de la Geomorfología en la gestión territorial tanto para la protección del medio natural como la preparación ante riesgos naturales e impactos potenciales de la actividad antrópica.

PALABRAS CLAVE: Geomorfología, Ordenación del Territorio, escala, Geografía

GEOMORPHOLOGY IN GEOGRAPHY AND REGIONAL PLANNING, A MULTISCALE PERSPECTIVE AND DIACHRONIC

ABSTRACT: Some examples of geomorphological studies on different scales are presented, whether they are related to current geomorphic processes or to landforms and deposits inherited from former processes. On a local scale the examples shown are the rockfall and landslide management at the Giant's Causeway (Northern Ireland) and the research on debris flows that threaten the village of Blatten (Switzerland), as well as the application of geodiversity assessment on detail scales. On a regional scale examples are focused on the protection of relief as a heritage value in Castilla y León and Switzerland, explaining how they match within land management processes. On a global scale it is explained how subglacial morphology is essential to explain the ablation and potential collapse of Western Antarctica glaciers, whose melt would affect the world's sea level. Finally examples are shown of Quaternary environments and processes reconstruction in Europe,

which are related either to climatic (the Younger Dryas as a fast cold event which may be triggered again) or dynamic changes (the land colonization after the Neolithic and the resulting enhancement of erosive processes). This paper highlights the relevance of Geomorphology in land management either for environmental protection purposes or preparedness face to natural hazards and potential impacts of Human activity.

KEYWORDS: Geomorphology, Land Management, scale, Geography.

La Ordenación del Territorio es una actividad necesaria para garantizar que el desarrollo económico y la expansión de los ámbitos urbanos, los transportes e incluso los usos agrarios se realicen en unas condiciones de seguridad y aprovechamiento racional de los recursos naturales. El relieve es uno de esos recursos naturales que, aunque en muchas ocasiones ha sido ignorado como un elemento secundario, tiene implicaciones territoriales a todas las escalas. Como ciencia dedicada al estudio del relieve, la Geomorfología tiene por tanto evidentes implicaciones en la ordenación territorial, implicaciones que son diferentes dependiendo de la escala de estudio. En este artículo se muestran algunos ejemplos de estudios geomorfológicos y de sus implicaciones en la ordenación territorial a escala local, regional/nacional y global. La intención final es mostrar que la Geomorfología tiene una aplicación territorial clara a todas las escalas, y una imbricación sólida con otras dinámicas geográficas, tanto de Geografía Física como Humana.

Es la escala local donde la Geomorfología ejerce una mayor influencia en la Ordenación Territorial, ya que las intervenciones sobre el territorio han de tener en cuenta el relieve, y especialmente la dinámica geomorfológica, como elemento potenciador o limitador de las mismas. Los estudios geomorfológicos son básicos en la evaluación de riesgos naturales costeros, fluviales, de laderas o ligados a la actividad volcánica o tectónica. Las políticas regionales y nacionales pueden no tener en cuenta el relieve de la misma manera. Las recomendaciones en relación a la Geomorfología tratan por el contrario de orientar de manera estratégica la ordenación territorial. En los ejemplos mostrados el punto de vista es siempre el de la protección y promoción del relieve como un elemento de valor patrimonial. Por último, a escala global mostramos trabajos de Geomorfología de dimensiones locales y regionales, pero con implicaciones en dinámicas naturales de gran importancia a nivel global. La fusión de los polos como consecuencia del cambio climático es una amenaza para las áreas costeras de todo el mundo, además de un potencial agente de cambio climático brusco en ciertas áreas de la zona templada planetaria. En este artículo se presenta el ejemplo de la importancia de la geomorfología subglaciar en el potencial colapso del casquete polar de la Antártida Occidental.

Otra de las vertientes de la Geomorfología que se abordan es su potencial en la reconstrucción de ambientes pasados, en especial durante el Cuaternario.

Tanto los depósitos como las formas de relieve suelen formarse en unas condiciones dinámicas y climáticas determinadas, que pueden ser identificadas mediante aquellos. En este tipo de estudios las dataciones son un elemento básico para dotarlas de sentido, pero también una de las mayores dificultades y limitaciones. El estudio de eventos pasados, tanto climáticos como dinámicos, tiene su importancia en tanto en cuanto pueden ofrecer pistas de que podemos esperar en la actualidad, con implicaciones tan importantes como el cálculo de periodos de retorno en catástrofes naturales, áreas vulnerables a los mismos, de modelización del cambio climático futuro o de los impactos de las actividades antrópicas.

I. GEOMORFOLOGÍA COMO ELEMENTO VITAL EN LOS PROYECTOS Y PLANES DE ORDENACIÓN DEL TERRITORIO LOCALES.

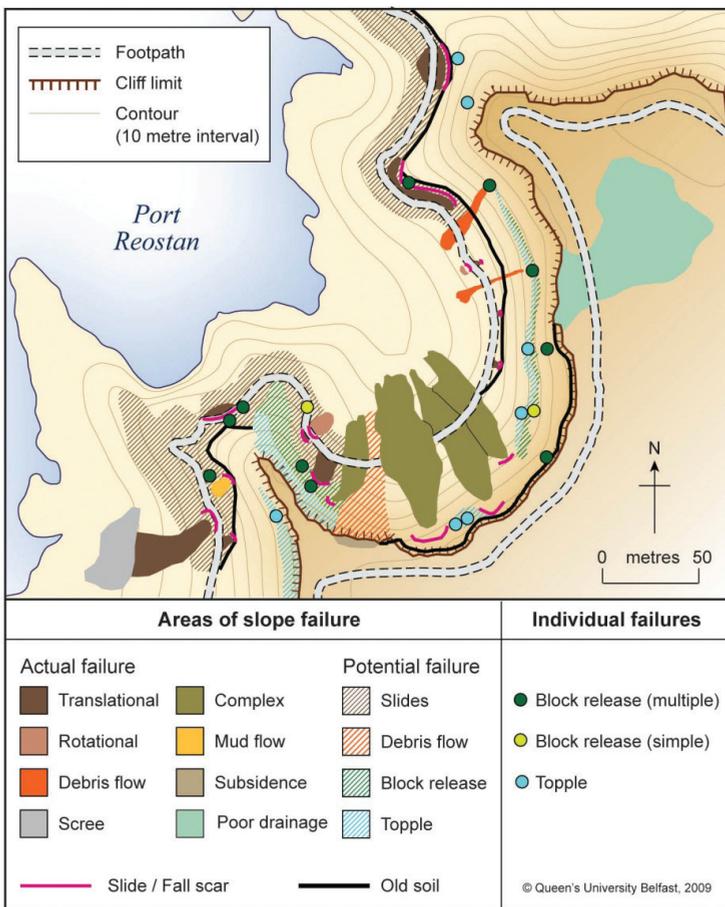
El relieve puede ser visto bien como un elemento limitante a la hora de ordenar el territorio o bien como un elemento a proteger y gestionar debido a sus valores (paisajístico, económico, histórico o científico). Esa visión dual es especialmente importante a escala local, donde la ordenación se plasma en la realidad concreta. La Calzada del Gigante es un lugar donde la Geomorfología es a la vez el factor de atracción más importante (Geomorfología – Recurso) y una de las principales amenazas (Geomorfología - Riesgo).

La Calzada del Gigante (Giant's Causeway) es un tramo de costa basáltica situada al N de Irlanda, declarado Patrimonio de la Humanidad por su geología y geomorfología icónicas, su valor científico, cultural y paisajístico. Es conocida principalmente por las columnas de basalto que forman una suerte de enlosado natural de formas pentagonales y hexagonales, pero posee también espectaculares acantilados en los que sobresale la alternancia de basaltos con paleosuelos formados hace 60 millones de años en condiciones climáticas tropicales (SMITH *et al.*, 2011). Gestionada por el National Trust, la principal asociación británica de protección del patrimonio, la Calzada del Gigante es la tercera atracción turística más visitada de Irlanda del Norte (Tourism Statistics Branch 2012). Los visitantes de la Calzada del Gigante están expuestos a un riesgo proveniente por un lado de la caída de bloques y la ocurrencia de deslizamientos desde la pared del acantilado (McDONNELL *et al.*, 2000, Smith *et al.*, 2011) y por otro de la subida del nivel del mar y del oleaje (SMITH, 2005). Un pequeño camino recorre el acantilado a media ladera, camino que frecuentemente quedaba cortado por deslizamientos, por lo que fue cerrado al público en 1994 a partir de la ensenada de Port Reostan, también conocida como “el Anfiteatro” (Figura 1).

El cierre del camino ha cercenado también el acceso a algunos de los enclaves más espectaculares del lugar, como las Chimney Tops o los acantilados

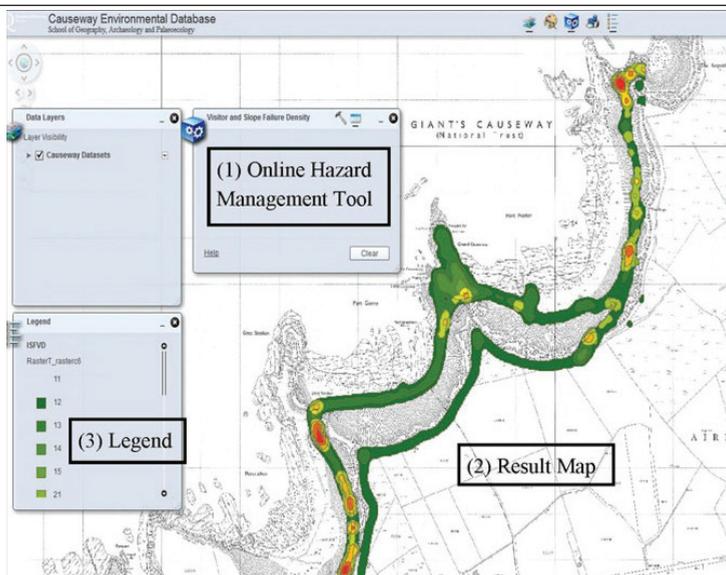
de Port na Tober. El National Trust ha optado por dirigir el interés de los turistas exclusivamente al pavimento basáltico de la Calzada del Gigante, con un acceso fácil y adaptado a todos los públicos, y a su nuevo centro de interpretación. En el plan de ordenación del año 2005 se especifica la Geomorfología como un elemento a proteger dentro de la Calzada del Gigante, que ha de ser entendida no como un museo geológico al aire libre, sino como un lugar con una dinámica natural propia que ha de ser preservada (SMITH, 2005). Todo ello conlleva por un lado prohibir los trabajos de estabilización de las paredes, limitando los mismos a reponer el camino después de que ocurra un deslizamiento.

Figura 1. Mapa de deslizamientos y desprendimientos en el sector del “Anfiteatro”, Calzada del Gigante (Irlanda del Norte). El camino que discurre a media ladera fue cerrado al público a partir de este sector hacia el Este debido a la inseguridad del mismo. Extraído de Smith et al. 2011



Sin embargo el inventario realizado en 2009 (SMITH *et al.*, 2011) demuestra que los lugares abiertos al público no son 100% seguros, ya que una gran cantidad de deslizamientos y desprendimientos recientes y relictos fue identificado. Debía realizarse un mapa de riesgo que tuviera en cuenta también el momento en que estos son más activos con vistas a cerrar en esas ocasiones el acceso a turistas. Dicho trabajo fue abordado recientemente basado en la cartografía desarrollada en SMITH *et al.*, (2011). En este caso se identifica no solamente los deslizamientos como peligro sino también los visitantes como elemento vulnerable en la ecuación Riesgo Natural= Peligrosidad + Vulnerabilidad. Para ello se dotó a algunos visitantes de un GPS que registraba su movimiento dentro del entorno de la Calzada del Gigante, creando un mapa de densidad de visitantes que se comparó con uno de densidad de deslizamientos. El resultado marca los lugares con un mayor riesgo, Las áreas marcadas en rojo corresponden a lugares donde se combinan una alta densidad (y por tanto frecuencia) de deslizamientos con una presencia más continua de visitantes (BRATTON *et al.*, 2013) (Figura 2). Todavía queda trabajo por hacer como por ejemplo evaluar los momentos de ocurrencia de los deslizamientos y desprendimientos para ver si coinciden con momentos de alta afluencia de visitantes, o incluso predecir los desprendimientos más probables para realizar cortes temporales en los caminos de acceso, dichos trabajos han sido propuestos en el plan publicado este año (NORTHERN IRELAND ENVIRONMENT AGENCY, 2013), que además recoge la conservación de los atributos geológicos y geomorfológicos como objetivo prioritario.

Figura 2. Mapa de riesgo geomorfológico para los visitantes de la Calzada del Gigante (Irlanda del Norte). Extraído de BRATTON *et al.* (2013).



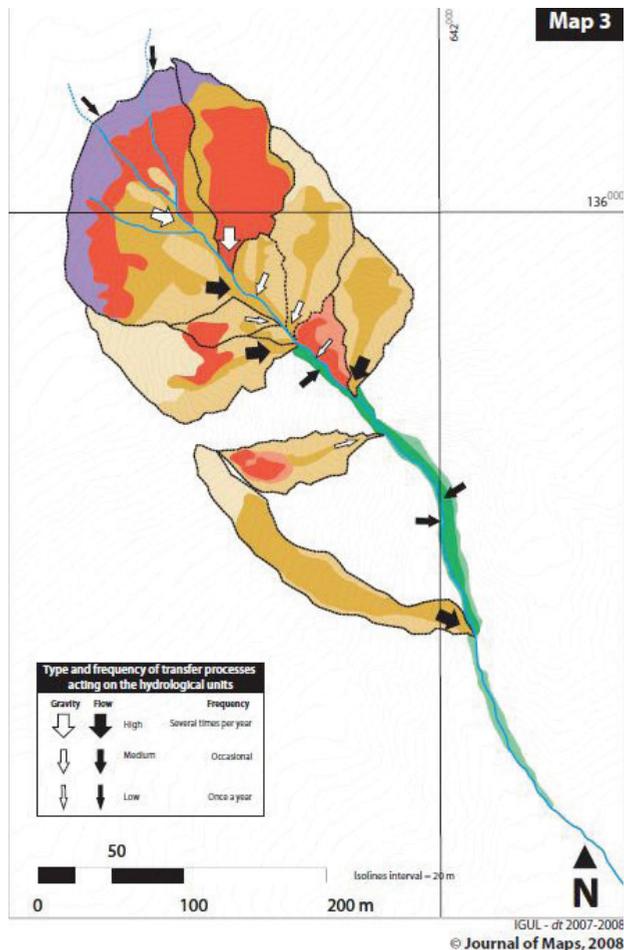
Este tipo de trabajos se ha venido realizando recientemente en áreas alpinas. Los Alpes son una región particular en cuanto a su ocupación y ordenación territorial. A pesar de ser una cordillera abrupta, su ocupación ha sido secular, dando un poblamiento mucho más denso que áreas colindantes y menos abruptas, tales como el Jura, la Selva Negra, los Vosgos o el Macizo Central. Ello se debe en gran parte a la diversidad climática y ecológica que otorgan el gradiente altitudinal, la variedad de orientaciones y efecto barrera tanto al Frente Polar como a los vientos cálidos y frecuentemente húmedos provenientes del Mediterráneo, lo cual hace de muchos valles interiores (como el Valais suizo) áreas predominantemente templadas y secas (MUTTON, 1961, p. 84). El poblamiento se ha hecho a expensas de un territorio donde los riesgos naturales de origen geomorfológico son considerables, en especial los asociados a deslizamientos y desprendimientos, flujos de derrubios y avenidas súbitas, aludes de nieve o hielo. Sin embargo, generalmente las áreas más expuestas no eran habitadas, o solamente lo eran estacionalmente, como ocurre con los pastos de altura (*alpages*), que dan nombre a la región.

Sin embargo los Alpes se han convertido, desde principios del S. XX y crecientemente hasta la actualidad, en un espacio de atracción turística, tanto estival como sobre todo invernal. Ello ha conllevado una creciente presión sobre el espacio, que en ocasiones se traduce en la colonización de espacios de alta peligrosidad antes deshabitados, o en el uso permanente de espacios anteriormente estacionales (los citados pastos de altura) (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 1999, p. 389). Es necesario por tanto conocer los procesos geomorfológicos que originan estos riesgos con mayor detalle. En el caso por ejemplo de las avenidas y flujos de derrubios, su riesgo puede aumentar con el arrastre de material detrítico, que aumenta su volumen y velocidad.

El trabajo de THELER *et al.* (2008, 2010) evalúa la peligrosidad asociada a una cabecera torrencial con flujos de derrubios recurrentes a cuyo pie se encuentra la localidad de Blatten, en el cantón de Valais (Suiza). Esta investigación se basa en un aporte tradicional de la geomorfología, el mapa geomorfológico, para evolucionar a un mapa dinámico, más útil para la gestión del riesgo. Para ello identifica las áreas con mayor pendiente, menor vegetación y mayor disponibilidad de sedimento. En segundo lugar comprueba si estas están conectadas con el canal de drenaje principal, lo cual conlleva un transporte rápido hasta la base del flujo de derrubios en eventos de precipitaciones intensas. Por último realiza mediciones y trabajo de campo después de cada reactivación del flujo de derrubios, para conocer los lugares que han aportado y en los que se ha depositado material. Las conclusiones se plasman en un mapa, donde la intensidad de los colores indica lo proclives que son las áreas a la erosión y por tanto al aporte de material, mientras que el color indica el carácter del sedimento disponible.

El resultado es un mapa de áreas más proclives a ser erosionadas durante un episodio de alta precipitación que genere un flujo de derrubios, así como de su composición sedimentológica (Figura 3). Estas conclusiones pueden ampliarse mediante el uso de mediciones de precisión como LIDAR, laser scanner o GPS diferencial, que permitan monitorizar los procesos que originan esta forma, así como medir el volumen transportado, las áreas de sedimentación secundaria, e, incluso, predecir futuras áreas fuente de sedimentos, como ya se ha hecho en desprendimientos (ABELLÁN *et al.*, 2010).

Figura 3. Mapa dinámico del flujo de derrubios de Blatten. El color simboliza el tipo de material disponible, mientras que la intensidad del color corresponde a la del proceso en ese lugar. Las flechas señalan los lugares de mayor frecuencia de aporte de sedimentos al torrente principal. Extraído de THELER *et al.* (2008).



Por supuesto este trabajo tan detallado no puede realizarse para todas las cuencas de los Alpes, sin embargo es un aporte necesario para la planificación territorial tanto de la localidad de Blatter, situada parcialmente en el abanico aluvial generado por los flujos de derrubios como del *alpage* de Belalp, situado a 2000 metros de altitud en orientación Sur, con suaves colinas adecuadas para la práctica del esquí, pero cuyos nuevos desarrollos inmobiliarios se ven amenazados por el retroceso acelerado (70 metros en 30 años) de la cabecera torrencial (Figura 4).

Figura 4. Nuevos desarrollos en Belalp, situados en las inmediaciones de la cabecera del flujo de derrubios. Imagen cortesía de Google Earth.



Desde el punto de vista de la protección del relieve como elemento ambiental, se ha demostrado que la variedad de elementos geomorfológicos tales como depósitos y formas de relieve tiene un impacto positivo en la variedad biológica o diversidad, ya que crean una mayor variedad de hábitats potenciales (HJORT *et al.*, 2012 y BÉTARD, 2013). Una de las estrategias futuras para la conservación de la biodiversidad es el mantenimiento de las dinámicas geomorfológicas naturales donde estas son activas, como en entornos costeros y en las márgenes fluviales (BRAZIER *et al.*, 2013). Además la valoración de la geodiversidad, entendida como variedad geomorfológica puede ser utilizada como indicador subrogado de biodiversidad a escala local (HJORT *et al.*, 2012). La valoración de geodiversidad en Fuentes Carrionas identifica los circos glaciares de mayor altitud como los lugares de mayor geodiversidad de este macizo de la Cordillera Cantábrica, los cuales

coinciden con hábitats alpinos ricos en endemismos (PELLITERO *et al.*, 2014). Este punto de vista ha sido tratado en más ocasiones a escala regional.

II. GEOMORFOLOGÍA COMO ELEMENTO A TENER EN CUENTA EN LOS PLANES Y PROGRAMAS A ESCALA REGIONAL.

Los ejemplos de ordenación territorial a escala regional y nacional que tengan en cuenta específicamente la Geomorfología no son abundantes. Los estudios proponen líneas maestras o directrices de actuación que luego serán vinculantes en la ordenación definitiva a escala local. Un ejemplo es el realizado por Andreas y Allan (2007) en Costa Rica, que también incluye información geológica y sísmica. El resultado son mapas de aptitud geomorfológica que son utilizados posteriormente en la ordenación territorial a escala local.

Uno de los ámbitos que podemos destacar dentro de la ordenación de elementos geomorfológicos a escala nacional y regionales es el de la protección del patrimonio geomorfológico y de la geodiversidad. Entendemos la geodiversidad como la variedad de elementos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos y edáficos, mientras que el patrimonio geomorfológico se refiere a los elementos del relieve o depósitos que por su importancia paisajística, icónica, cultural, económica o científica merecen ser reconocidos como tal (PELLITERO *et al.*, 2011). Para ello el primer paso es crear una concienciación a nivel político y social sobre la importancia del patrimonio geomorfológico (MANSUR, 2010). Ello acaba por reflejarse en la inclusión de conceptos propios en la legislación. Esto se va consiguiendo poco a poco, y por ejemplo la Ley de Patrimonio Natural y Biodiversidad define el Patrimonio Natural como un “conjunto de bienes y recursos de la naturaleza fuente de diversidad biológica y geológica, que tienen un valor relevante medioambiental, paisajístico, científico o cultural” (Ley 42/2007). Actualmente se encuentra en fase de consulta la Ley de Conservación del Patrimonio Natural de Castilla y León. Dicha ley dota de instrumentos para la protección del paisaje, del cual el relieve es un integrante esencial, al reconocer como criterio de inclusión en la Red de Áreas Naturales Protegidas las que “resulten representativas de los ecosistemas y paisajes naturales o de las formaciones geológicas y geomorfológicas, teniendo en cuenta su diversidad y estado de conservación” (Anteproyecto de Ley de Patrimonio Natural de Castilla y León, art. 51 a). Desafortunadamente todavía no existe una ley europea que avale la protección del patrimonio geomorfológico, existiendo solamente una recomendación del Consejo de Europa (GRAY, 2013 : 216).¹

¹ Para obtener una detallada descripción de la geoconservación en los distintos estados

Un segundo paso es desarrollar herramientas que ayuden en la tarea de protección de la geodiversidad y el patrimonio geomorfológico. Por un lado la evaluación de la geodiversidad es una adaptación de la metodología de evaluación de la biodiversidad, con vistas principalmente a la conservación. Por otro la evaluación del relieve como elemento patrimonial pretende dar una dimensión de valoración y aprovechamiento de la Geomorfología.

La evaluación de la geodiversidad permite conocer los lugares que poseen una mayor variedad geológica, geomorfológica, edáfica e hidrológica. Esta variedad, en el caso de la geomorfología, esta generalmente relacionada con lugares de un paisaje excepcional o con dinámicas especiales que les hacen merecedores de protección (PELLITERO *et al.*, 2014). Además, como hemos visto, a nivel local una mayor variedad geomorfológica conlleva una mayor variedad de hábitats potenciales, y por tanto una mayor biodiversidad (HJORT *et al.*, 2012). En áreas de gran extensión la evaluación de la geodiversidad toma sentido a escala regional. Por ejemplo en Brasil, donde los espacios amplios dificultan trabajos de detalle y la ordenación territorial ha de tener en cuenta esto, la evaluación de geodiversidad permite identificar entornos locales de alto interés paisajístico (PELLITERO *et al.*, 2014), o que en función de su geodiversidad poseen un potencial como áreas de protección o geoparques (PEREIRA *et al.*, 2013; PEREIRA, 2014). Es estos casos el modo de calcular la geodiversidad ha de ser diferente y adaptado a la escala de estudio (PELLITERO *et al.*, 2014).

Desde el punto de vista patrimonial, la identificación y valoración de Lugares de Interés Geomorfológico puede ser utilizada de manera sistemática en el territorio e incorporarse a la ordenación territorial. En este sentido la desarrollada por la escuela de Lausanne (REYNARD, 2005) es generalmente aceptada y ha sido reproducida con variaciones en España (SERRANO y GONZÁLEZ TRUEBA, 2005). Esta metodología atribuye a los elementos geomorfológicos cinco valores que han de ser evaluados: científico, ecológico, estético, cultural y económico. Serrano y González Trueba (2005) añaden un valor potencial de uso y gestión que evalúa la capacidad de acogida del lugar de interés geomorfológico. Este tipo de evaluaciones ofrecen información que, partiendo de una evaluación local, son de gran utilidad para la elaboración de planes a nivel regional.

En PELLITERO *et al.* (2011) se realizó un estudio comparado de los valores de geodiversidad y patrimonio geomorfológico para el Parque Natural de los Cañones del Ebro y Rudrón. Con este estudio el gestor puede definir cuáles son los entornos en los que se puede canalizar una mayor densidad de uso y cuáles deberían permanecer apartados, lo que permite canalizar los flujos turísticos a

consultar capítulo 9 de este mismo libro.

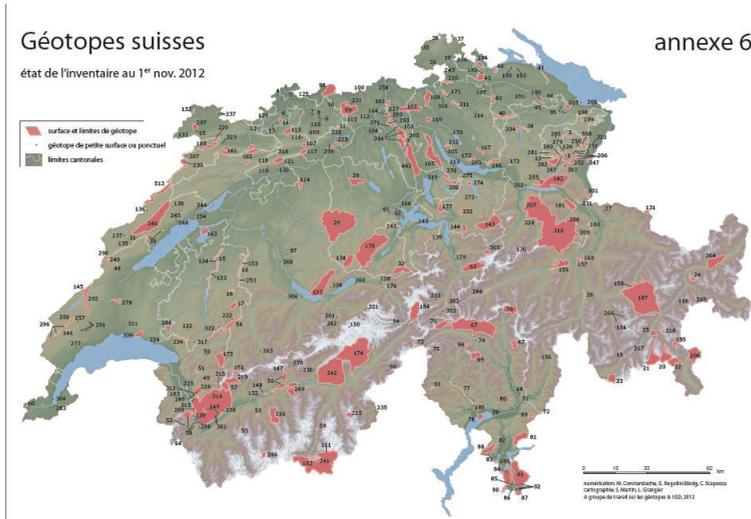
los lugares más espectaculares, más atractivos y a la vez menos susceptibles de degradarse con un uso intensivo (Tabla 1).

Tabla 1. Evaluación de Lugares de Interés geomorfológico en el P.N. Cañones del Ebro y Rudrón. Extraído de PELLITERO *et al.* (2011).

	Lugares de interés geomorfológico	Tipo*	Contenido geomorfológico	Contenido cultural	Valor científico	Valor añadido	Valor de uso
1	Cañón del Ebro	LR	Fluvial, procesos de ladera	X	5.6	4.2	8
2	Complejo tobáceo y hoces de Orbaneja	LR	Kárstico, fluvial	X	6.6	6.1	3.3
3	Menadro abandonado y complejo tobáceo de Valdelateja	LR	Kárstico, fluvial, procesos de ladera	X	7.6	6.1	7.7
4	Fuente de Pozo Azul	ES	Kárstico, hidrológico	-	3	3.4	6.1
5	Complejo tobáceo de Tubilla del Agua	LS	Kárstico, hidrológico	X	5	6.1	5.5
6	Hoces del Rudrón	LR	Kárstico, fluvial	-	5.6	4.4	7.7
7	Sistema kárstico y fuentes del Rudrón	LS	Kárstico, hidrológico	-	5	2.8	8.8
8	Anticlinal de Huidobro	ES	Estructural, procesos de ladera, fluvial	-	6.2	4.8	7.7
9	Cuevas del Piscarciano	LR	Kárstico	-	4.4	2.2	2.2
*LR= Lugar representativo; ES= Elemento sobresaliente; LS= Lugar sobresaliente							

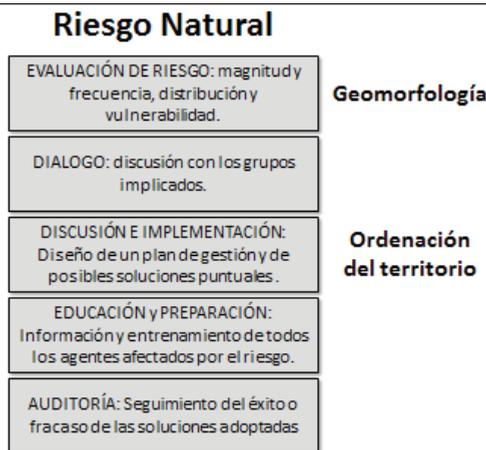
Un tercer paso es la elaboración de inventarios que, habiendo realizado una valoración, presenten los lugares susceptibles de una protección o aprovechamiento en función de su Geomorfología. En Suiza se ha desarrollado un inventario nacional de Lugares de Interés Geológico y Geomorfológico, actualizado periódicamente (REYNARD *et al.*, 2012) (Figura 5). Desafortunadamente, a pesar del trabajo realizado, todavía no se ha conseguido que el estado federal reconozca de manera legal este inventario, debido a que las competencias de protección natural están asumidas por los cantones (REYNARD, 2012).

Figura 5. Lugares de Interes Geologico y Geomorfológico de Suiza, cortesía del Swiss Working Group on Geotopes.



El último paso es la aplicación de todos estos estudios en la realidad concreta. Para ello entre los estudios previos y la ordenación territorial efectiva es necesario un esfuerzo de concienciación de los grupos de acción implicados por ella, lo que garantiza que las directrices de ordenación territorial posean una amplia aceptación. Este esquema ha sido propuesto para los programas de defensa de riesgos naturales (Figura 6) y puede ser adaptado a cualquier planificación territorial.

Figura 6. Niveles de actuación sobre el territorio ante un riesgo natural. Modificado de Bennet y Doyle (1997), p. 349.



Un ejemplo de esto es la evaluación del patrimonio geomorfológico y la geodiversidad también ha sido incorporada recientemente a la Reserva de la Biosfera de los Ancares Leoneses. El proyecto plantea una serie de actuaciones, que incluyen el reconocimiento y cartografía de la geodiversidad, el inventario de lugares de interés geomorfológico y la propuesta de rutas y materiales divulgativos orientados al turismo y al uso sostenible del patrimonio natural. Este proyecto se inició en el curso 2013 completando el trabajo del valle de Fornela, en Peranzanes, y se pretende continuar en los tres cursos posteriores, cada uno dedicado a otro de los municipios de la reserva (ALONSO y HERRERA, 2013). En este caso se pretende que la geomorfología sea un elemento más a tener en cuenta en la gestión territorial, y para ello se ha hecho hincapié en la concienciación de su importancia a los gestores de la reserva, que en este caso son agentes locales (los municipios). De este modo se pone en valor un recurso que anteriormente quedaba ignorado.

III. GEOMORFOLOGÍA APLICADA AL CAMBIO GLOBAL. EL DESHIELO DE LA ANTÁRTIDA Y GROENLANDIA COMO RETOS DE FUTURO.

El calentamiento global es uno de los aspectos más controvertidos, recurrentes y polémicos al que los científicos se enfrentan en la actualidad. Debido a la escala global de impacto y las potenciales consecuencias catastróficas (IPCC 2013), es además un aspecto en el que es urgente un consenso y acción para revertir sus efectos o prepararse para sus consecuencias.

Sin entrar a valorar sus causas, el proceso de calentamiento global está fuera de discusión, y la Geomorfología ha contribuido a su confirmación mediante el estudio de la evolución y dinámica de formas y procesos sensibles a los cambios térmicos, tales como el retroceso de glaciares, que ha sido confirmado en la zona templada (Diolaiuti *et al.* 2012), tropical (RABATEL *et al.*, 2013), o polar (KJÆR *et al.*, 2012), o la evolución del “permafrost” también en áreas alpinas (HARRIS *et al.*, 2009) o polares (BOCKHEIM *et al.*, 2013).

Entre los efectos más importantes podemos citar cómo el calentamiento global va a afectar a los climas a escala local y cómo la fusión de los glaciares de todo el mundo puede provocar un aumento del nivel del mar. La preparación para estas realidades entra de lleno en la ordenación del territorio a escala local y regional, tema que ya hemos tratado anteriormente. Por otro lado descubrir cómo estos efectos pueden desencadenarse en su origen es un ámbito de estudio en el que la Geomorfología tiene mucho que decir.

El aumento del nivel del mar en los últimos 10 años ha sido de aproximadamente 3mm al año a escala mundial. De esos tres milímetros, aproximadamente un 55% se debe a la fusión de los glaciares, siendo el resto aumento de masa relacionado con otros factores o expansión térmica de los océanos (CAZENAVE y LLOVEL, 2010). Alrededor de un 40% del aumento del nivel del mar por fusión glaciaria se debe a la fusión de los casquetes polares de Groenlandia y Antártida, mientras que un 60% corresponde a la fusión de glaciares en áreas de montaña y campos de hielo (MEIER *et al.*, 2007). Choca la escasa participación de la fusión de los casquetes polares antártico y groenlandés en esta dinámica, pero no podemos minimizar su importancia.

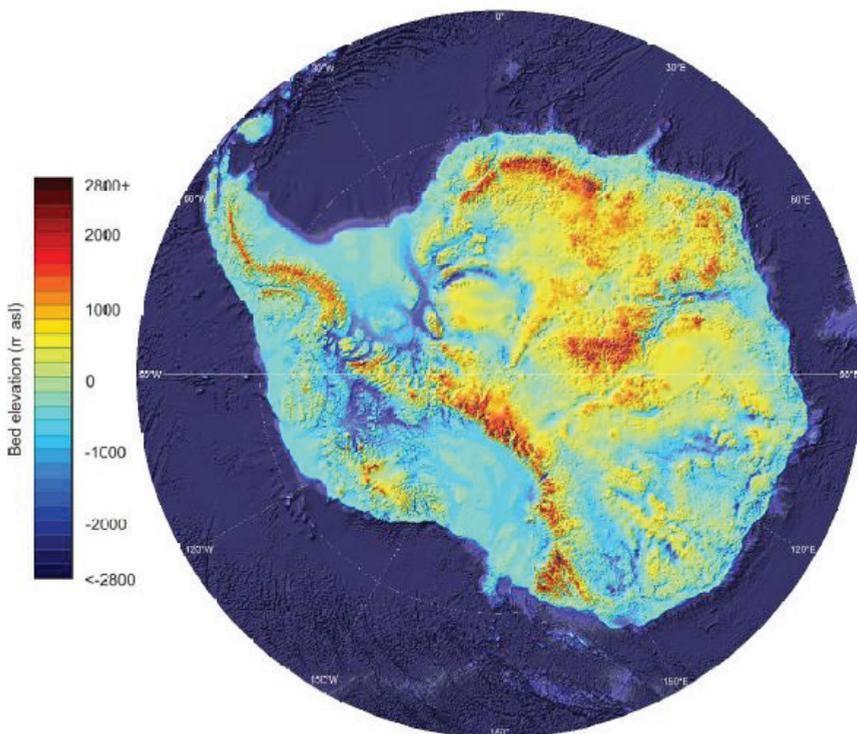
Los glaciares son sistemas que responden a una dinámica de acumulación (por innivación, venteamiento y avalancha) y ablación (por fusión y sublimación). La respuesta de un glaciar a los cambios ambientales dependerá por un lado de la intensidad de dichos cambios y por otro lado de su volumen, su superficie o su forma, pero también de la topografía basal o del tipo del sustrato que el glaciar recorre. Si su frente se encuentra en el mar la dinámica glaciaria se confronta a la dinámica marina (oleaje, mareas, corrientes) que somete a tensiones a la masa de hielo, aumenta su fusión, y disminuye la resistencia en comparación con el sustrato. Todo ello hace que la velocidad de los glaciares con frente marino sea generalmente mayor que los terrestres (BENN y EVANS, 2010: 169-174). Dentro de los glaciares, los casquetes polares son sistemas extremadamente complejos y de gran volumen, que por lo tanto responden a los cambios ambientales consistentes a largo plazo (BENNET y GLASSER, 2009: 72). De ello se deduce que los grandes casquetes polares todavía no han tenido tiempo de reflejar los cambios ambientales que en ellos están ocurriendo. Saber cómo, cuándo y cuánto van a fundirse los casquetes polares es vital porque:

- Su fusión total aumentaría el nivel del mar en 63.5 metros de media a escala global (BENN y EVANS, 2010: 248), aunque este aumento no se reparte uniformemente, ya que localmente las áreas cercanas al casquete polar verían un descenso del nivel del mar por el rebote isostático y por la ausencia de la atracción gravitacional que el hielo ejerce sobre el océano. Por el contrario áreas alejadas de los polos experimentarían un ascenso del nivel del mar mayor de la media (Ver la clase magistral de J. X. Mitrovica en <http://128.111.108.101/Mitrovica-SeaLevelFingerprints-720P-TalkOnly.mp4>).
- El acceso de gran cantidad de agua fría y dulce a las corrientes oceánicas podría tener consecuencias en la interrelación océano - atmósfera y por tanto en los climas regionales, como ya ocurriera en varias ocasiones en el pasado (BROECKER, 2002).

La Antártida contiene el 90% del hielo a escala mundial. Su fusión total aumentaría el nivel del mar una media de 60 metros (BENNET y GLASSER, 2009: 7). El casquete polar antártico se puede dividir en dos áreas, separadas por la Cordillera Transantártica. La Antártida Oriental alberga la mayor parte del hielo, y actualmente presenta un balance de masas positivo, posiblemente derivado del aumento de precipitaciones. El casquete glaciar de Antártida Occidental, por el contrario, presenta un balance de masas fuertemente negativo, y es particularmente frágil por varias razones:

- Es uno de los lugares de mayor aumento de temperaturas a nivel global, con 2,4 grados centígrados de aumento entre 1958 y 2010 (BROMWICH *et al.*, 2013).
- Se encuentra en una cuenca con una altitud media por debajo del nivel del mar (Figura 7), lo que hace que su retroceso no se vea frenado por el cambio de condiciones de drenado en océano a drenado en tierra, como ocurre en la Antártida Oriental o Groenlandia.

Figura 7. Modelo digital de elevaciones de la superficie de la Antártida por debajo del hielo, realizado por el proyecto Bedmap 2 (Fretwell *et al.* 2013)



Como resultado de ello, aquí se encuentran algunos de los glaciares con una mayor pérdida de masa a nivel mundial, como el Pine Island Glacier, que drena el 10% del hielo de este sector, y que retrocede a un ritmo de 1 km, con un adelgazamiento constantemente acelerado de 0.5 m/ año⁻² entre 1990 y 2011 (PARK *et al.*, 2013). La fusión de los hielos de la Antártida Occidental conllevaría un aumento del nivel del mar del orden de 6 metros de media a nivel mundial.

El adelgazamiento dinámico de la capa de hielo de la Antártida Occidental tiene como origen el calentamiento global, pero hay otros agentes que están acelerando este proceso. Para estudiarlos es necesario tener en cuenta la geomorfología subglaciar, ya que ésta canaliza el drenaje de hielo desde el centro del continente antártico. Para ello hay que utilizar mediciones de radar para estimar el espesor de la capa de hielo y la topografía subglaciar, así como mediciones gravimétricas para estimar la estructura geológica debajo del hielo y el espesor de la capa de sedimentos glaciares. En concreto los glaciares que experimentan una mayor pérdida de masa acaban en bahías de gran profundidad (alrededor de 1.5 km.). Dichas bahías no son sino valles glaciares sobreexcavados durante el Máximo Glaciar cuaternario aprovechando estructuras de “rift” (Ó COFAIGH *et al.*, 2011). Estos grandes valles glaciares actúan como vehículos de pérdida de masa glaciar en dos sentidos:

- Desde el océano, los fiordos canalizan agua templada profunda hasta el frente glaciar, aumentando así su fusión (HOLLAND *et al.*, 2010).
- Desde el continente, BINGHAM *et al.* (2012) prueban cómo la estructura de rift se prolonga continente adentro, y cómo la dinámica glaciar sigue esta estructura. En el caso del rift de Ferrigno, éste además ha sido rellenado con sedimentos glaciares de aproximadamente un km. de espesor. Estos sedimentos, al ser menos coherentes que el sustrato, permiten un mejor deslizamiento del hielo en dirección hacia el océano. Por otro lado, por comparación a lo demostrado en otros rift antárticos, el gradiente geotérmico ha de ser mayor en el centro del valle que en los alrededores ya que el espesor de la corteza es menor. Ello promueve la fusión del hielo basal y contribuye a su deslizamiento.

Por tanto los rift antárticos son “autopistas” de exportación de hielo desde el centro del continente hasta el océano, al transmitir de manera efectiva una pérdida de masa forzada desde la costa al interior. Esta dinámica puede tener importantes consecuencias para la estabilidad del casquete polar antártico, provocando una pérdida del mismo más acelerada de lo que cabría esperar en el contexto de calentamiento global actual, y por tanto también en el aumento del nivel del mar. Conocer la geomorfología subglaciar antártica es, en definitiva, vital para realizar

una efectiva predicción de estos eventos de impacto global. Para ello son necesarias costosas campañas de campo que incluyen mediciones de radar o sísmicas, que dan como resultado superficies como la presentada en el citado proyecto Bedmap2 (FRETWELL *et al.*, 2013). Estas campañas son rentables si pensamos que algunos desarrollos de gran envergadura, como son los puertos comerciales o desarrollos urbanos costeros, basados en modelos climáticos de escasa resolución espacio-temporal -sin tener en cuenta cambios en el nivel del mar, la frecuencia de tempestades o la temperatura del océano- tendrán que reformarse en pocas décadas (BECKER *et al.*, 2013).

IV. GEOMORFOLOGÍA EN ESCALAS TEMPORALES, ¿QUE NOS PUEDE DECIR EL PASADO SOBRE EL FUTURO?

Los procesos geomorfológicos tienen la ventaja de estar sujetos a parámetros físicos o químicos, tales como la gravedad, la temperatura o la concentración de compuestos químicos. Frecuentemente nos encontramos en la actualidad con formas o depósitos análogos a otros formados en condiciones dinámicas o climáticas inexistentes. Dichos testigos nos permiten reconstruir como evolucionó un territorio en el pasado. Por otro lado los cambios ambientales actuales tienen nuevos parámetros (como nuevos aerosoles originados por la actividad industrial, contaminación de acuíferos, interrupción de la dinámica costera o fluvial por obras) que les hacen más complejos y menos predecibles de lo que se pueda imaginar. En todo caso es sensato pensar que los ambientes pasados son laboratorios de los que podemos sacar conclusiones sobre las tendencias presentes.

Algunos de los cambios ambientales más intensos y a la vez recientes en la Historia Natural se dieron durante el Cuaternario (2 m.a. a 11.000 años antes del presente). En particular las distintas glaciaciones que tuvieron lugar durante esta era han modelado el relieve de llanuras y montañas, en especial en las zonas templada y polar. A partir de hace entre 18.000 y 16.000 años el clima, hasta entonces dominado por un frío glacial, cambia abruptamente a una dinámica de calentamiento climático. Sin embargo en medio de este calentamiento acelerado sorprende la existencia de una corta fase, de unos 1200 años (12900-11700 años antes del presente) de enfriamiento súbito, el llamado Dryas Reciente.

Una de las características más sorprendentes del Dryas Reciente es que dicho enfriamiento no fue una tendencia progresiva. Estudios recientes (Lane *et al.* 2013) apuntan a que en tan solo una decena de años o incluso menos Europa volvió a padecer un frío glacial. Las causas primeras de este enfriamiento permanecen bajo discusión (ver WITKE *et al.*, 2013 y VAN HOESSEL *et al.*, 2014, así como

las referencias que contienen), siendo este uno de los campos más polémicos dentro de la investigación del Cuaternario. Pero parece claro que el desencadenante fue el enfriamiento súbito del Atlántico Norte, posiblemente por el masivo aporte de agua de fusión glaciaria, y el consiguiente corte de la circulación termohalina y la Corriente del Golfo (McMANUS *et al.*, 2004), la cual mantiene un clima impropriadamente suave en el NW de Europa para la latitud en que se encuentra.

Esta fase dejó una clara impronta en el relieve de Europa Occidental, debido principalmente al reavance de los frentes glaciares. La influencia sin embargo se puede ver en casi todo el Hemisferio Norte, aunque disminuida en intensidad y retrasada a medida que los cambios ambientales viajaron hacia el E (BJÖRCK, 2007).

¿Qué nos dice el Dryas Reciente de la actualidad, a la vista de los registros geomorfológicos?

- Que las dinámicas climáticas no son tan robustas como se puede pensar, y un cambio en un parámetro puede introducir cambios climáticos radicales y, sobre todo, muy rápidos.
- Que un calentamiento global puede, localmente, resultar en un rápido enfriamiento debido a la interrupción de la actual dinámica atmósfera – océano.

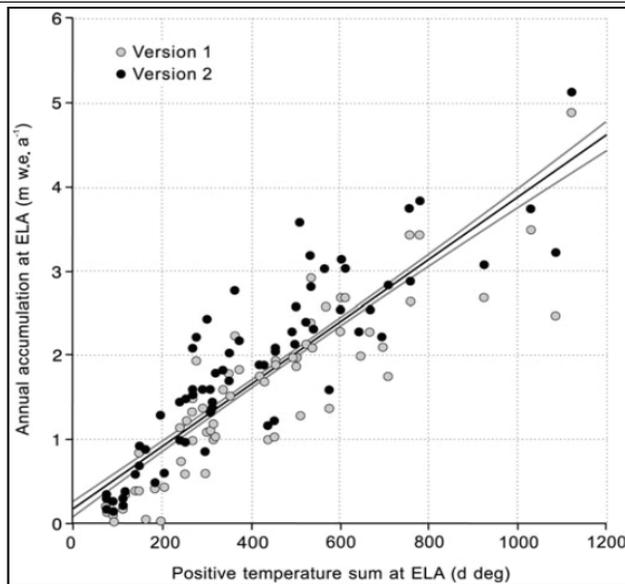
Desde el punto de vista estratégico es interesante proponer escenarios climáticos futuros, que necesariamente han de estar basados en los conocimientos de los cambios climáticos anteriores. Sin llegar a la alarma, se podría plantear una situación de enfriamiento repentino, aunque esta posibilidad, si bien ha tenido eco en los medios, sobre todo a raíz de la aparición de un informe catastrofista (SCHWARTZ y RANDALL, 2003) no ha recibido el apoyo de la comunidad científica ni, de momento, ha visto refrendadas sus teorías.

Es en la realización de modelos climáticos basados en el pasado donde la Geomorfología glaciaria, como testigo de ambientes pasados, tiene cabida. De entre los métodos de reconstrucción paleoambiental la inmensa mayoría ofrecen o bien estimaciones ambientales subjetivas (más o menos frío, más o menos seco, como los estudios polínicos) o bien datos exactos solamente de temperaturas (como por ejemplo los estudios de coleópteros o quironómidos). Los glaciares poseen la ventaja de dejar frecuentemente tanto formas (principalmente morrenas) como depósitos (mantos de till) distinguibles de formas y depósitos de otro origen. A partir de estos elementos es posible reconstruir la extensión y volumen del antiguo glaciar, siguiendo las citadas formas y fórmulas de flujo adaptadas a la reología propia del hielo (BENN y HULTON, 2010). Además las morrenas suelen presentar bloques empastados, que permiten la datación de las mismas por el mé-

todo de los isótopos cosmogénicos, o depósitos de arenas yuxtaglaciares que, de manera más problemática (KLASEN *et al.*, 2007), pueden datarse a partir de OSL (Luminiscencia Ópticamente Inducida).

Para que un glaciar exista debe existir, al menos durante un tiempo suficiente, un aporte nival superior a la cantidad de nieve que se funde o sublima. Por ello en un glaciar en equilibrio existe un área de acumulación, donde el balance de masa entre acumulación y fusión es positivo, y un área de ablación, donde dicho balance es negativo. Ambos están separados por una línea teórica, la ELA (del inglés *Equilibrium Line Altitude*), donde dicho balance está en equilibrio. Dicho equilibrio ha sido descrito en varias ecuaciones que ponen en relación la temperatura media estival con la precipitación (OHMURA *et al.*, 1992, BRAITHWAITE, 2008) (Figura 8). Conociendo la temperatura media de cualquier otro método paleoclimático podemos identificar las condiciones ambientales exactas de un lugar mientras el glaciar estaba presente. Si tenemos una base de datos con diferentes localizaciones, condiciones ambientales y dataciones, podemos reconstruir el clima de regiones enteras para eventos climáticos concretos (MILLS *et al.*, 2012). Además los datos de cambio en la ELA pueden añadirse a modelos climáticos ya desarrollados, como el de Renssen *et al.* (2001), mejorando su calibración (Figura 9).

Figura 8. Relación entre temperatura diaria acumulada y acumulación anual en la ELA, según Braithwaite (2008).



Source: [2]Braithwaite (2008) Temperature at the equilibrium-line altitude of glaciers expressed by the degree-day factor for melting snow.

Figura 9. Mapa de las temperaturas medias y altitud de la ELA en Europa durante el Dryas Reciente. Información extraída de Isarin (1997) y del proyecto “Using glacier-climate proxies to model the Younger Dryas climate in Europe”.



¿Cómo es el desarrollo geográfico y temporal de un cambio climático súbito como el ocurrido en el Dryas Reciente? ¿Qué cantidad de agua de fusión glaciaria es necesaria para desencadenar una fase de esta magnitud? ¿Es razonable pensar que el calentamiento global actual pueda originarlo? De ser así, ¿qué áreas serían las más afectadas? Muchas de esas preguntas, todavía sin responder, tienen gran parte de su respuesta en la Geomorfología.

En otras ocasiones las formas y depósitos que encontramos no tienen que ver con dinámicas climáticas sino con la acción antrópica. La colonización de espacios por el Hombre desde el Neolítico, en especial la roturación de la cubierta vegetal y la sobreexplotación de la misma por el ganado, han dejado su impronta en depósitos y formas de relieve. Entre los impactos provocados por el hombre en el medio natural destaca la roturación de la cubierta vegetal y el pastoreo, lo

que influye en la textura y espesor de los suelos, en el clima local, en el ciclo hidrológico y, finalmente, en la reactivación de procesos geomorfológicos (Goudie 1990). La impronta de este fenómeno ha sido estudiada en sectores de alta y media montaña de la Península Ibérica (GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI y SERRANO, 2007; GARCÍA RUIZ, 2010).

En el N de Burgos por ejemplo la sedimentación de edificios tobáceos se ralentiza alrededor del 4700 B.P., iniciándose una nueva etapa de incisión de los valles. Esta etapa no está relacionada con ningún cambio climático significativo, sino con la colonización del territorio por parte de culturas capaces de intervenir en el territorio (GONZALEZ AMUCHASTEGUI y SERRANO, 2007). Esta realidad también ha sido descrita en Fuentes Carrionas, al N de la provincia de Palencia (PELLITERO, 2012), aunque aquí faltan dataciones que confirmen los indicios. Muchas de estas causas convergen en Fuentes Carrionas. Ya desde el Neolítico ésta era un área ganadera (PÉREZ RODRÍGUEZ, 2010) cuyo uso no cambió sustancialmente con la penetración romana. En la Edad Media los altos valles de Fuentes Carrionas fueron utilizados como pastos para el ganado de la Mesta. Esta actividad decae en los siglos XVII y XVIII para desaparecer prácticamente en el S.XIX. En este momento salen a la venta grandes lotes de terreno de pastos en las desamortizaciones, los cuales son comprados por ganaderos locales que vuelven a explotar intensamente los puertos, aunque en los papeles de compra de los puertos en ningún caso se indica que hayan sido recolonizados por bosques, sino que están ocupados en su mayoría por escobas y brezos (GÓMEZ SAL *et al.*, 1994).

¿Cuáles son las consecuencias de esta presión ganadera sobre el entorno de Fuentes Carrionas? En las laderas los procesos geomorfológicos, en especial el arroyamiento, la erosión laminar y la solifluxión se generalizaron. Acarcavamientos y mantos de till y formación de terracillas son generales en los pastos de altura, por encima de los 1800 metros, aunque actualmente estas formas están siendo progresivamente colonizadas por matorral (Figura 10). En las áreas vulnerables a deslizamientos estos se reactivaron, especialmente en la margen derecha del Carrión en el sector de Santa Marina, unos 7 km. aguas arriba de la localidad de Vidrieros. Los sedimentos exportados de las laderas se acumularon en los fondos de los valles, creando un nivel de terrazas aproximadamente un metro por encima de la llanura de inundación actual, identificables en los valles de Pineda o Cardaño, que indican ríos más caudalosos y que arrastraban una mayor cantidad de sedimentos que en la actualidad.

Figura 10. Cárcavas y terracillas en el área del Ves, a 1800 metros de altura en la cabecera del valle del Carrión (Palencia). Fotografía de Ramón Pellitero



El impacto antrópico pudo llegar a la completa eliminación del suelo en algunos sectores, como el circo del Curavacas, también en Fuentes Carrionas. Este entorno es una superficie de erosión glaciaria de unos 25°, con abundantes microformas de erosión glaciaria (estrías y acanaladuras) y sin cobertura edáfica o vegetal. Sin embargo la descripción del Diccionario de Madoz de este pago es muy diferente: “hay una elevadísima piedra (Curavacas) que domina el pueblo, y que se eleva sobre las demás montañas considerablemente; en su superficie tiene una hermosa pradera, y en el centro de ella un pozo llamado Curavacas de una gran profundidad” (MARTÍNEZ MANCEBO, 1980). Este sector fue incluido en la venta de pastos a los ganaderos de Liébana. Una sobreexplotación de los mismos habría conllevado la completa erosión del suelo. El análisis de los sedimentos atrapados en el Pozo Curavacas puede confirmar o desmentir esta hipótesis.

En definitiva la Geomorfología es capaz de describir los cambios ambientales que se han dado en un territorio con gran detalle. Ello puede ayudarnos a tomar conciencia de la mutabilidad y fragilidad de los sistemas naturales, y por tanto a ordenar la ocupación del territorio y las actividades sobre el mismo de una manera que garantice su sostenibilidad en el tiempo.

V. CONCLUSIONES

Como hemos visto la Geomorfología tiene una implicación importante en la Ordenación del Territorio a cualquier escala, con el aliciente de que la escala temporal amplia, fuera en muchos casos de los parámetros de ocupación humana, permite describir y prevenir de fenómenos que pueden no haber quedado registrados en la Historia local, regional o global. Es por ello que la Geomorfología es un aspecto necesario de la formación de un geógrafo como profesional de la ordenación territorial, y un elemento que ha de tener en cuenta en dicho desempeño profesional.

VI. AGRADECIMIENTOS

El autor quisiera agradecer la amable invitación del editor de Polígonos, el profesor Fernando Manero, a participar en este número especial. Las investigaciones expuestas en este artículo fueron realizadas o tuve conocimiento de ellas gracias a la beca concedida por el programa FPU (Formación de Profesorado Universitario) del Ministerio de Educación, los proyectos de investigación OAPN 053-2010 y CGL-2010-19729 y el proyecto del Leverhulme Trust “Using glacier-climate proxies to model the Younger Dryas climate in Europe”.

BIBLIOGRAFÍA

- ABELLÁN, A., CALVET, J., VILAPLANA, J. M. y BLANCHARD, J. (2010): “Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring”. *Geomorphology*, 119 (3–4), 162-171.
- ALONSO, N. y HERRERA, P. M. (2013): “Reserva de la Biosfera de los Ancares Leoneses: laboratorio de participación social en la gestión del patrimonio”. *Revista ph*, 84: 108-127. URL: <http://www.iaph.es/revistaph/index.php/revistaph/article/view/3408#>. Uwy-mYWynKd. Último acceso 20-02-2014.
- ANDREAS, M. y ASTORGA, A. (2007): “Incorporating geology and geomorphology in land management decisions in developing countries: A case study in Southern Costa Rica”. *Geomorphology*, 87 (1–2), 68-89.
- BENN, D. I. y EVANS, D. J. A. (2010): *Glaciers & Glaciation*. Hodder Education, Londres.
- BENN, D. I. y HULTON, N. R. J. (2010): “An Excel (TM) spreadsheet program for reconstructing the surface profile of former mountain glaciers and ice caps”. *Computers and Geosciences*, 36 (5), 605-610.
- BENNET, M. R. y DOYLE, P. (1997): “Environmental Geology”. *Geology and the Human Environment*. John Wiley & Sons, Chichester.

- BENNET, M. R. y GLASSER, N. F. (2009): *Glacial Geology. Ice Sheets and Landforms*. Wiley – Blackwell, Chichester.
- BÉTARD, F. (2013): “Patch-Scale Relationships Between Geodiversity and Biodiversity in Hard Rock Quarries: Case Study from a Disused Quartzite Quarry in NW France”. *Geoheritage* 5, 59-71.
- BJÖRCK, S. (2007): “Younger Dryas Oscillation, Global Evidence”. En *Encyclopedia of Quaternary Science* (S.A. ELIAS, ed.), vol. 3. Elsevier B.V., Oxford, 1985–1993.
- BECKER, A. H., ACCIARO, M., ASARIOTIS, R., CABRERA, E., CRETEGNY, L., CRIST, P., ESTEBAN, M., MATHER, A., MESSNER, S., NARUSE, S., NG, A.K.Y., RAHMSTORF, S., SAVONIS, M., SONG, D. K., STENEK, V. y VELEGRAKIS, A. F. (2013): “A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society”, *Climatic Change*, 120(4), 683-695.
- BINGHAM, R. G., FERRACCIOLI, F., KING, E. C., LARTER, R. D., PRITCHARD, H. D., SMITH, A. M. y VAUGHAN, D. G. (2012): “Inland thinning of West Antarctic Ice Sheet steered along subglacial rifts”. *Nature*, 487, 468-471.
- BOCKHEIM, J., VIEIRA, G., RAMOS, M., LÓPEZ-MARTÍNEZ, J., SERRANO, E., GUGLIELMIN, M., WILHELM, K. y NIEUWENDAM, A. (2013): “Climate warming and permafrost dynamics in the Antarctic Peninsula region”, *Global and Planetary Change*, 100, 215-223.
- BRAITHWAITE, R. J. (2008): “Temperature and precipitation climate at the equilibrium line altitude of glaciers expressed by the degree day factor for melting snow”. *Journal of Glaciology*, 54 (186), 437-444.
- BRATTON, A., SMITH, B. J., MCKINLEY, J., LILLEY, K. (2013): “Expanding the Geoconservation Toolbox: Integrated Hazard Management at Dynamic Geoheritage Sites”. *Geoheritage*, 5, 173-183.
- BRAZIER, V., BRUNEAU, P. M. C., GORDON, J. E. y RENNIE A. F. (2013): “Making Space for Nature in a Changing Climate: The Role of Geodiversity in Biodiversity Conservation”. *Scottish Geographical Journal*, 128 (3-4), 211-233.
- BROECKER, W. S. (2002): “Massive iceberg discharges as triggers for global climate change”. *Nature*, 372 (6505), 421–424.
- BROMWICH, D. H., NICOLAS, J. P., MONAGHAN, A. J., LAZZARA, M. A., KELLER, L. M., WEIDNER, G. A. y WILSON, A. B. (2013): “Central West Antarctica among the most rapidly warming regions on Earth”. *Nature Geoscience*, 6, 139 – 145.
- CAZENAVE, A. y LLOVEL, W. (2010): “Contemporary Sea Level Rise”. *Annual Review of Marine Science*, 2, 145-173.
- DIOLAIUTI, G. A., BOCCHIOLA, D., VAGLIASINDI, M., D’AGATA, C. y SMIRAGLIA, C. (2012): “The 1975–2005 glacier changes in Aosta Valley (Italy) and the relations with climate evolution”, *Progress in Physical Geography*, 36, 764-785.
- EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (1999): *Environment in the European Union at the turn of the century*. URL: <http://www.eea.europa.eu/publications/92-9157-202-0>. Último acceso 20-02-2014.
- FRETWELL, P., PRITCHARD, H. D., VAUGHAN, D. G., BAMBER, J. L., BARRAND, N. E., BELL, R., BIANCHI, C., BINGHAM, R. G., BLANKENSHIP, D. D., CASASSA, G., CATANIA, G., CALLENS, D., CONWAY, H., COOK, A. J., CORR, H. F. J., DAMASKE, D., DAMM, V., FERRACCIOLI, F., FORSBERG, R., FUJITA, S., GIM, Y., GOGINENI, P., GRIGGS, J. A., HINDMARSH, R.

- C. A., HOLMLUND, P., HOLT, J. W., JACOBEL, R. W., JENKINS, A., JOKAT, W., JORDAN, T., KING, E. C., KOHLER, J., KRABILL, W., RIGER-KUSK, M., LANGLEY, K. A., LEITCHENKOV, G., LEUSCHEN, C., LUYENDYK, B. P., MATSUOKA, K., MOUGINOT, J., NITSCHKE, F. O., NOGI, Y., NOST, O. A., POPOV, S. V., RIGNOT, E., RIPPIN30, D. M., RIVERA, A., ROBERTS, J., ROSS, N., SIEGERT, M. J., SMITH, A. M., STEINHAGE, D., STUDINGER, M., SUN, B., TINTO, B. K., WELCH, B. C., WILSON, D., YOUNG, D. A., XIANGBIN, C. y ZIRIZZOTTI, A. (2013): "Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica". *The Cryosphere*, 7, 375 – 393.
- GARCÍA RUIZ, J. (2010): "The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review". *CATENA*, 81 (1), 1 –11.
- GÓMEZ SAL, A., RODRÍGUEZ MERINO, E., BUSQUE, J. y RODRÍGUEZ PASCUAL, M. (1994): "Perña-Páramos-Alto Campoo". *Cuadernos de Trashumancia*, 17, 1-99.
- GONZÁLEZ AMUCHASTEGUI, M. J. y SERRANO, E. (2007): "Evolución geomorfológica, cambios ambientales e intervención humana durante el holoceno en la cuenca alta del Ebro: las tobas de los valles del Purón y Molinar". *Estudios Geográficos*, 68, 527-546.
- GOUDIE, A. (1990): *The human impact on natural environment*. Basil Blackwell, Oxford, 3ª edición.
- GRAY, M. (2013): *Geodiversity. Valuing and Conserving Abiotic Nature*. Wiley Blackwell, Londres.
- HARRIS, C., ARENSON, L. U., CHRISTIANSEN, H. H., ETZELMÜLLER, B., FRAUENFELDER, R., GRUBER, S., HAEBERLI, W., HAUCK, C., HÖLZLE, M., HUMLUM, O., ISAKSEN, K., KÄÄB, A., KERN-LÜTSCHG, M. A., LEHNING, M., MATSUOKA, N., MURTON, J. B., NÖTZLI, J., PHILLIPS, M., ROSS, N., SEPPÄLÄ, M., SPRINGMAN, S. M. y MÜHLL, C. V. (2009): "Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses". *Earth-Science Reviews*, 92 (3–4), 117-171.
- HJORT, J., HEIKKINEN, K. y LUOTO, M. 2012. "Inclusion of explicit measures of geodiversity improve biodiversity models in a boreal landscape". *Biodiversity Conservation*, 21, 3487-3506.
- HOLLAND, P. R., JENKINS, A. y HOLLAND, D. M. (2010): "Ice and ocean processes in the Bellingshausen Sea, Antarctica". *Journal of Geophysical Research*, 115 (C05020), 1-16.
- IPCC (2013): Summary for Policymakers. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. (T. F. STOCKER, D. QIN, G. K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX y P. M. MIDGLEY eds.): Cambridge University Press, Cambridge, 3-33.
- ISARIN, R. (1997): *The climate in north-western Europe during the Younger Dryas*. Drukkerij Elinkwijk b.v., Utrecht.
- KLASEN, N., FIEBIG, M., PREUSSER, F., REITNER, J. M. y RADTKE, U. (2007): "Luminescence dating of proglacial sediments from the Eastern Alps". *Quaternary International*, 164–165, 21-32.
- KJÆR, K. H., KHAN, S.A., KORSGAARD, N. S., WAHR, J., BAMBER, J. L., HURKMANS, R., BROEKE, M., TIMM, L. H., KJELDSSEN, K. K., BJØRK, A. A., LARSEN, N. K., JØRGENSEN, L. T., FÆRCH-JENSEN, A., WILLERSLEV, E. (2012): "Aerial Photographs Reveal Late-

- 20th-Century Dynamic Ice Loss in Northwestern Greenland". *Science*, 337 (6094), 569-573.
- LANE, C. S., BRAUER, A., BLOCKLEY, S. P. E. y DULSKI, P. (2013): "Volcanic ash reveals time-transgressive abrupt climate change during the Younger Dryas". *Geology*, 41 (12), 1251-1254
- MANSUR, K. L. (2010): "Ordenamento territorial e geoconservação: Análise das normas legais aplicáveis no Brasil e um caso de estudo no estado do Rio de Janeiro". *Geociências*, 29 (2), 237-249.
- MARTÍNEZ MANCEBO, J. (1980): "Usos y costumbres en Fuentes Carrionas. 1ª parte. Etnografía". *Publicaciones de la Institución Tello Téllez de Meneses*, 44, 325-397.
- MCDONNELL, B. A. M., SMITH, B. J. (2000): *An investigation of mass movements in Northeast Ireland, with implications for their management*. Tesis de máster. Queen's University Belfast.
- MCMANUS, J. F., FRANCOIS, R., GHERARDI, J.- M., KEIGWIN, L. D. y BROWN-LEGER, S. (2004): "Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes". *Nature*, 428, 827-837.
- MEIER, M. F., DYURGEROV, M. B., RICK, U. K., O'NEEL, S., PFEFFER, W. A., ANDERSON, R. S., ANDERSON, S. P. y GLAZOVSKY, A. F. (2007): "Glaciers Dominate Eustatic Sea-Level Rise in the 21st Century". *Science*, 317 (5841), 1064-1067
- MILLS, S. C., GRAB, S. W., REA, B. R., CARR, S. J., FARROW, A. (2012): "Shifting westerlies and precipitation patterns during the Late Pleistocene in southern Africa determined using glacier reconstruction and mass balance modelling". *Quaternary Science Reviews*, 55, 145-159
- MUTTON, A. F. A. (1961): *Central Europe. Geographies for Advanced Studies*. Butler y Tanner, Londres.
- NORTHERN IRELAND ENVIRONMENT AGENCY (2013): *Giant's Causeway and Causeway Coast World Heritage Site Management Plan*. 57 p. URL: <http://www.giantscauseway.ccght.org/wp-content/uploads/2013/09/2013-2019-WHS-Management-Plan-Compressed.pdf> . Último acceso: 26/02/2014
- Ó COFAIGH, C., LARTER, R. D., DOWDESWELL, J. A., HILLENBRAND, C. D., PUDSEY, C. J., EVANS, J. y MORRIS, P. (2005): "Flow of the West Antarctic Ice Sheet on the continental margin of the Bellingshausen Sea at the Last Glacial Maximum". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110 (B11), 1-13.
- OHMURA, A., KASSER, P. y FUNK, M. (1992): "Climate at the equilibrium line of glaciers". *Journal of Glaciology*, 38 (130), 397-411.
- PARK, J. W., GOURMELEN, N., SHEPHERD, A., KIM, S. W., VAUGHAN, D. G. y WINGHAM, D. J. (2013): "Sustained retreat of the Pine Island Glacier". *Geophysical Research Letters*, 40 (10), 2137-2142.
- PELLITERO, R. 2012. *Geomorfología, paleoambiente cuaternario y geodiversidad en el macizo de Fuentes Carrionas-Montaña Palentina*. Tesis Doctoral. Universidad de Valladolid.
- PELLITERO, R., GONZÁLEZ-AMUCHASTEGUI, M. J., RUIZ-FLAÑO, P. y SERRANO, E. (2011): "Geodiversity and Geomorphosite Assessment Applied to a Natural Protected Area: the Ebro and Rudrón Gorges Natural Park (Spain)". *Geoheritage* 3, 163-174.

- PELLITERO, R., MANOSSO, F. y SERRANO, E. (2014): "Mid and large scale geodiversity calculation in Fuentes Carrionas (NW Spain) and Serra do Cadeado (Paraná, Brazil): Methodology and application for land management". *Geografiska Annaler*. En prensa.
- PEREIRA, E. (2014): *Modelagem da Geodiversidade da Área de Proteção Ambiental Sul da Região Metropolitana de Belo Horizonte*. Tesis de Máster.
- PEREIRA, D., PEREIRA, P., BRILHA, J. y SANTOS, L., (2013): "Geodiversity Assessment of Parana' State (Brazil): An Innovative Approach". *Environmental Management* 52, 541 – 552.
- PÉREZ RODRÍGUEZ, F. (2010): "El fenómeno megalito en la Montaña Palentina". *Colección de Historia de la Montaña Palentina*, 4, 11-64.
- RABATEL, A., FRANCOU, B., SORUCO, A., GOMEZ, J., CÁCERES, B., CEBALLOS, J. L., BASANTES, R., VUILLE, M., SICART, J. E., HUGGEL, C., SCHEEL, M., LEJEUNE, Y., ARNAUD, Y., COLLET, M., CONDOM, T., CONSOLI, G., FAVIER, V., JOMELLI, V., GALARRAGA, R., GINOT, P., MAISINCHO, L., MENDOZA, J., MÉNÉGOZ, M., RAMIREZ, E., RIBSTEIN, P., SUAREZ, W., VILLACIS, M. y WAGNON, P. (2013): "Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change". *The Cryosphere*, 7 (1), 81-102.
- RENSSEN, H., ISARIN, R. F. B., JACOB, D., PODZUN, R. y VANDENBERGHE, J. (2001): "Simulation of the Younger Dryas climate in Europe using a regional climate model nested in an AGCM: preliminary results". *Global and Planetary Change*, 30 (1–2), 41-57.
- REYNARD, E. (2005): "Geomorphosites et paysages". *Geomorphologie, Relief, Processus, Environment*, 3/2005, 181-188.
- REYNARD, E. (2012): "Geoheritage protection and promotion in Switzerland". *European Geologist*, 34, 43-47.
- REYNARD, E., BERGER, J. P., CONSTANDACHE, M., FELBER, M., GRANGIER, L., HAUSELMANN, P., JEANNIN, P. Y. y MARTIN, S. (2012): *Révision de l'inventaire des géotopes suisses: rapport final*. Swiss Academy of Sciences. URL: <http://www.geosciences.scnat.ch/index.php?lang=fr&nav1=4&nav2=170&nav3=0>. Último acceso 20-02-2014.
- SCHWARTZ, P. y RANDALL, D. (2003): *An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security*. Informe. URL: <http://www.greenpeace.org/international/en/publications/reports/an-abrupt-climate-change-scena/>. Último acceso: 28/02/2014.
- SERRANO, E. y GONZÁLEZ TRUEBA, J. J. (2005): "Assessment of geomorphosites in natural protected areas: the Picos de Europa National Park (Spain)". *Geomorphologie, Relief, Processus, Environment*, 3/2005, 197-208.
- SMITH, B. J. (2005): "Management challenges at a complex geosite: the Giant's Causeway World Heritage Site, Northern Ireland". *Révue de Géomorphologie* 3, 219–226
- SMITH, B. J., PELLITERO, R. y ALEXANDER, G. (2011): "Mapping Slope Instability at the Giant's Causeway and Causeway Coast World Heritage Site: Implications for Site Management". *Geoheritage*, 3, 253-266.
- THELER, D., REYNARD, E. y BARDOU, E. (2008): "Assessing sediment dynamics from geomorphological maps: Bruchi torrential system, Swiss Alps". *Journal of Maps*, 4 (1), 277-289.

- THELER, D., REYNARD, E., LAMBIEL, C., BARDOU, E. (2010): “The contribution of geomorphological mapping to sediment transfer evaluation in small alpine catchments”. *Geomorphology*, 124 (3–4), 113-123.
- TOURISM STATISTICS BRANCH (2012): *Northern Ireland Visitor Attraction Survey*. Northern Ireland Statistics and Research Agency, Belfast. URL: http://www.detini.gov.uk/visitor_attraction_survey_2012.pdf Último acceso: 26/02/2014
- VAN HOESSEL, A., HOEK, W. Z., PENNOCK, G. M. y DRURY, M. Y. (2014): “The Younger Dryas impact hypothesis: a critical review”, *Quaternary Science Reviews*, 83 (1), 95-114.
- WITTKÉ, J. E., WEAVER, J. C., BUNCH, T. E., KENNETT, J. P., KENNETT, D. J., MOORE, A. M. T., HILLMAN, G. C., TANKERSLEY, K., GOODYEAR, A. C., MOORE, C. R., DANIEL, I., RAY, J. H., LOPINOT, N. H., FERRARO, D., ISRADE ALCÁNTARA, I., BISCHOFF, J. L., DECARLI, P. S., HERMES, R. E., KLOOSTERMAN, J. B., REVAY, Z., HOWARD, G. A., KIMBEL, D. R., KLETETSCHKA, G., NABELEK, L., LIPO, C. P., SAKAI, S., WEST A. y FIRESTONE, R. 6B. (2013): “Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago”. *PNAS Progress of the National Academy of Sciences of the United States of America*. E2088–E2097.