

El hidrolacolito de las Calderuelas (Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama), una morfología periglacial singular

The Calderuelas hydro-lacolith (Sierra de Guadarrama National Park), a remarkable periglacial landform

Rosa M. Carrasco¹, Javier Pedraza², Javier Fernández-Lozano³, Jesús Sánchez-Vizcaíno¹, Rodrigo L. Soteres⁴, Theodoros Karampaglidis⁵, Valentí Turu⁶, Xavier Ros⁶ y Oscar Merlo⁷

¹Dpto. Ingeniería Geológica y Minera, Univ. de Castilla-La Mancha, Avda. Carlos III, s/n, 45071 Toledo. E-mail: rosa.carrasco@uclm.es; jesus.svizcaino@uclm.es

²Dpto. de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Univ. Complutense de Madrid, C/ José Antonio Nováis, 12, 28040 Madrid. E-mail: javierp@geo.ucm.es

³Dpto. Ciencias de la Tierra y Física de la Materia Condensada. Univ. de Cantabria. Avda. de los Castros s/n, 39005, Santander. E-mail: j.fernandezlozano@unican.es

⁴Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avda. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago de Chile. E-mail: rsoteres@uc.cl

⁵Dpto. Geoarqueología, Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CNIEH), Paseo Sierra de Atapuerca, s/n, 09002 Burgos España. E-mail: theodoros.karampaglidis@cenieh.es

⁶Fundació Marcel···Chevallier, Edifici Socio-Cultural de La Llacuna, AD500, Andorra la Vella, Andorra. E-mail: igeofundacio@andorra.ad

⁷Departamento de Ingeniería Civil y de la Edificación, UCLM. Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real. oscar.merlo@uclm.es

ABSTRACT

This research describes the finding of a hydro-lacolith in the Sierra de Guadarrama (Central System). The study, based on the combination of Digital Terrain Models (DTM) and geoelectric data, allowed the characterization of the surface morphology and internal structure. The results allow establishing the genesis of this periglacial-related structure and the role played by slope processes in its evolution. Freeze-thawing cycles and hydrogeological conditions are responsible factors that control its evolution over time. Such type of structures show an extraordinary environmental sensitivity, thus their monitoring is of great interest to guarantee their further preservation.

Key-words: hydro-lacolith, periglacial, LiDAR, geoelectric, Sierra de Guadarrama National Park (Spain).

Geogaceta, 67 (2020), 91-94
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Introducción

Los montículos cónicos debidos a hinchamientos del suelo (*frost mounds*) son una de las formas características de los ambientes periglaciares. Para denominarlos se utilizan una serie de términos, siendo los más generalizados pingos, palsas, hidro-lacolitos, crio-lacolitos y ampollas de hielo (Harris *et al.*, 1988). La falta de normalización en el uso de estos términos ha generado cierta confusión pues, si bien hay una serie de rasgos básicos que se tienen en cuenta a la hora de clasificarlos (tamaño, permanencia, contenido en materia orgánica, presencia de lentejones de hielo, tensiones hidráulicas, etc.), no hay un acuerdo general en su aplicación, llegando a utilizar indistintamente cualquiera de esos nombres para denominar estas morfologías (Harris *et al.*, 1988; Zuidhoff y Kolstrup, 2005).

La gran mayoría de estas formas han sido identificadas en contextos de permafrost ártico y subártico, y de montaña (Frenzel, 1959; Mackay, 1998; Woolderink, 2014). Sin embargo, son poco conocidas en ambientes periglaciares estacionales (crionivales), por lo que su estudio es de gran interés (Ward, 2004; Woolderink, 2014).

En el sistema Central español se han identificado hinchamientos (*frost mounds*) catalogados como hidrolacolitos (Molina y Pellitero, 1982; Centeno *et al.*, 1983; Pedraza, 1994) y hasta el momento no existen otras citas sobre este tipo de formas en la Península Ibérica.

En este trabajo se presenta un nuevo hinchamiento similar a los ya descritos y localizado en la Sierra de Guadarrama. Frente a los anteriores, generalmente estacionales y de dimensiones menores (inferiores a 10 m de diámetro), el analizado en este trabajo presenta dimensiones

RESUMEN

En este trabajo se describe el hallazgo de un hidrolacolito en la Sierra de Guadarrama (Sistema Central). Su estudio se ha realizado mediante la caracterización morfológica y de la estructura interna, a través del empleo de Modelos Digitales del Terreno (MDT) obtenidos de datos LiDAR y varios perfiles geoelectrónicos. Los resultados permiten establecer la génesis de esta estructura, de origen periglacial, y la influencia de los procesos de ladera en su evolución. Los ciclos hielo-deshielo y las condiciones hidrogeológicas del entorno son los factores que controlan la evolución que presenta a lo largo del tiempo esta morfología. Estas estructuras muestran una extraordinaria sensibilidad ambiental, por lo que su monitorización resulta de gran interés para garantizar su preservación futura.

Palabras clave: hidrolacolito, periglacial, LiDAR, geoelectrónico, Parque Nacional Sierra de Guadarrama (España).

Fecha de recepción: 27/02/2019
Fecha de revisión: 17/10/2019
Fecha de aceptación: 22/11/2019

mayores y una notable permanencia en el tiempo. Esto hace que sea sumamente singular y de gran relevancia a escala regional por sus implicaciones genéticas y climáticas. Para el estudio de su génesis se ha llevado a cabo una caracterización morfológica mediante el uso de LiDAR aerotransportado y una tomografía eléctrica que ha permitido analizar su estructura.

Contexto geológico y geomorfológico

El área de estudio se ubica a 1950 m de altitud en la cabecera del arroyo de las Calderuelas (vertiente oriental de los Montes Carpetanos), dentro del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (Fig. 1).

El hinchamiento aparece al pie de la ladera, en la margen derecha del arroyo.

El sustrato geológico está formado por rocas metamórficas, principalmente por ortogneises glandulares con intercalaciones de leucogneises y paragneises semipelíticos. En el fondo del valle y parte de las laderas ese sustrato está cubierto por formaciones superficiales de poco espesor (2-6 m) que, en general, se han clasificado como coluviones asociados a procesos solifluidales (Ruiz-García *et al.*, 1991).

De acuerdo con los datos meteorológicos disponibles correspondientes al periodo 1971-2001 (AEMET-IPMA, 2011), el clima en la zona es de tipo mediterráneo de montaña, con una fuerte influencia continental (Dsb y DsC de la clasificación de Köppen-Geiger). Entre los 1600 y los 2000 m de altitud las temperaturas medias oscilan entre 8 y 3 °C, alcanzando valores mínimos de -9 °C y máximos de 25 °C en invierno y verano, respectivamente. Las precipitaciones anuales oscilan entre 1200 y 2500 mm, siendo en forma de nieve durante el periodo comprendido entre noviembre y mayo (Comunidad de Madrid, 2007).

Metodología

Caracterización morfológica

La caracterización morfológica del hinchamiento se ha llevado a cabo mediante la comparación de imágenes aéreas entre los años 1946 y 2017 procedentes de las Series A-B del Vuelo Americano y el IGN-PNOA. Además, se ha obtenido un modelo digital del terreno (MDT) a partir de datos LiDAR del vuelo PNOA-2010 del Instituto Geográfico Nacional (www.ign.es). El procesado, filtrado y generación del MDT, a partir de la nube de puntos con una densidad de 1 p/m² y una precisión altimétrica de 20 cm RMSEz, se ha realizado con el programa Global Mapper v20®. Una vez obtenido el modelo con una interpolación de 1 m, mediante el método *Binning*, se realizó una estimación de la superficie, perímetro y cubicación de la forma.

Estructura interna

La tomografía eléctrica permite obtener un panel de resistividades en 2D (Reynolds, 2011) que facilita la identificación de la geometría del lecho rocoso, así como diferenciar capas del relleno sedimentario en función del contenido

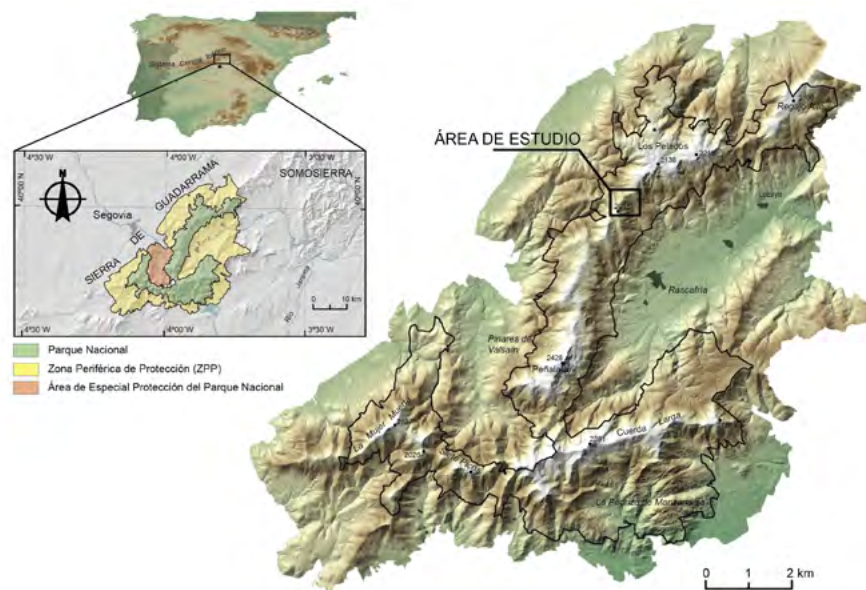


Fig. 1.- Localización del área de estudio en la Sierra de Guadarrama. Ver figura a color en la web.
 Fig. 1.- Study area sketch-map. See color figure in the web.

mineral, la porosidad y los fluidos presentes (Schrott y Sass, 2008; Hausmann *et al.*, 2013). Los perfiles geoelectrónicos se obtuvieron utilizando un equipo AGI Supersting de 8 canales, con dispositivos Dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger y espaciado entre los electrodos de 1,5 a 2 m. Se midieron nueve perfiles con longitudes de 48 a 137 m. Se utilizaron las configuraciones de los electrodos de Wenner y Dipolo-Dipolo y la profundidad máxima alcanzada fue de 10 a 24 m. Para la inversión de datos de campo con corrección tipográfica, se utilizó el software RES2DINV® (Loke *et al.*, 2010).

Resultados e interpretación

La zona donde se ubica el hidrolacolito (Fig. 2A) es un valle de fondo plano que fue ocupado por un glaciar durante la última glaciación, datada en la Sierra de Guadarrama entre los 26 ka BP y los 11-12 ka BP (Palacios *et al.*, 2012; Carrasco *et al.*, 2016). Los depósitos superficiales cubren el fondo del valle y parte de las laderas en afloramientos discontinuos. Se trata de un *till* subglaciar, depósitos de vertiente postglaciares (lenguas solifluidales y *debris-flows*) y, localmente, suelos turbosos.

El hidrolacolito está desarrollado en una de esas lenguas solifluidales, identificable por la acumulación de material al pie de la ladera y la cicatriz de vaciado en el escarpe. Estos elementos geomorfológicos son perceptibles ya en las imágenes aéreas de la Serie-A (1945), y el hincha-

miento se identifica en la minuta cartográfica de 1927 (Fig. 2B). Asimismo, cabe destacar el desarrollo de un drenaje asociado, que indica la presencia de abundante agua en la zona. Sin embargo, el encharcamiento ha variado a lo largo del tiempo, sugiriendo una actividad discontinua en la evolución del hidrolacolito.

El modelo digital LiDAR de alta resolución muestra una morfología ligeramente elíptica de dirección NE-SO. Su estructura presenta una forma cóncava en la base (Fig. 2D). Los principales parámetros morfométricos se presentan en la Tabla I.

A partir de la distribución de la resistividad eléctrica es posible diferenciar tres unidades geoelectrónicas (G1, G2 y G3; Fig. 2E).

La unidad inferior (G1) se interpreta como el sustrato rocoso y presenta una resistividad relativamente baja (<900 Ω m). La unidad intermedia (G2) se interpreta como el material movilizado por el movimiento en masa, en el que varía el contenido en finos, siendo inferior en el núcleo resistivo G2a (>8000 Ω m) que en el G2b (≈ 3000 Ω m). La unidad superior (G3) presenta una resistividad baja, similar a G1, y se interpreta como parte de la formación superficial con un alto contenido en finos.

Finalmente se observa una relación inversa entre el espesor de la unidad G3 y la resistividad de la unidad G2 (Fig. 2E), pero también con la elevación topográfica relativa del centro de la estructura. Esta diferenciación concéntrica de las unidades resistivas permite delimitar la zona activa del hidrolacolito.

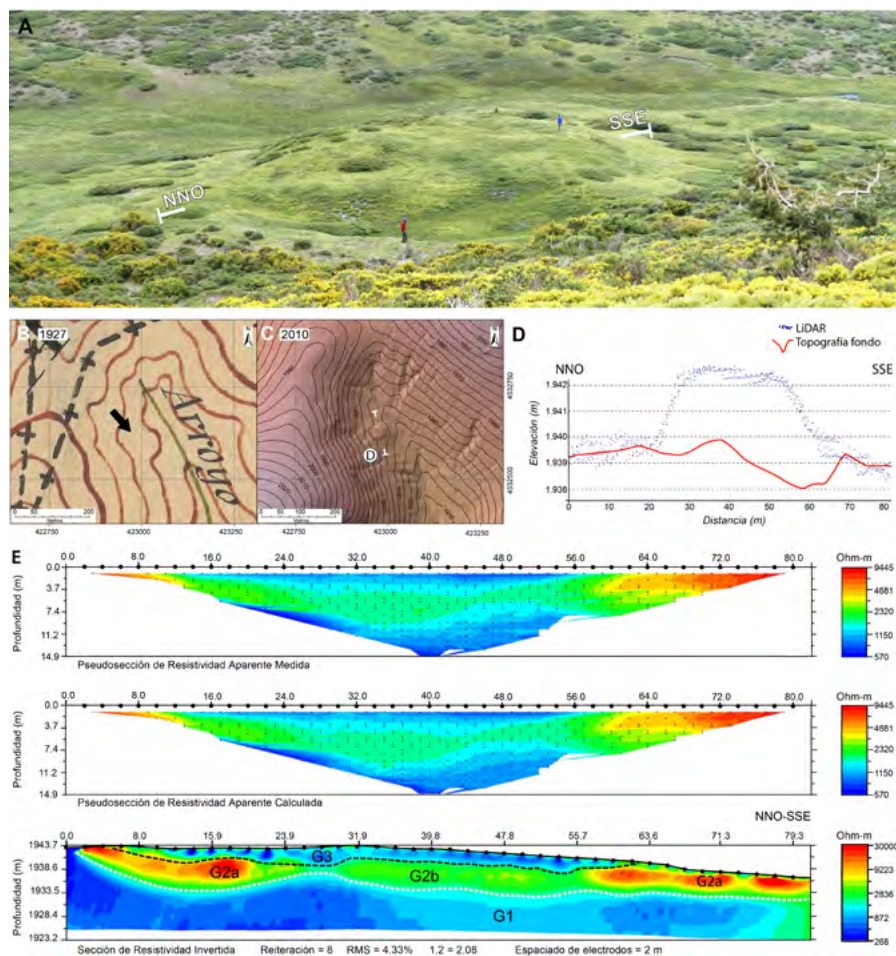


Fig. 2.- A) Vista panorámica del hidrolacolito sobre el fondo de valle del arroyo de las Calderuelas, en el que se indica la localización del perfil geoelectrico. **B)** Minuta cartográfica del IGN correspondiente al año 1927 en la que se aprecia el lobulado de las curvas de nivel (equidistancia 20 m) en la zona de localización del hinchamiento (flecha negra). **C)** MDT y curvas de nivel (equidistancia 5 m) obtenidos del LiDAR-2010 (IGN) con posición del perfil mostrado en D. **D)** Nube de puntos LiDAR y morfología de la base del hidrolacolito obtenida de los perfiles geoelectricos. **E)** Perfil geoelectrico principal en dos dimensiones mostrando los límites de las unidades georesistivas (líneas discontinuas). Ver figura a color en la web.
 Fig. 2.- A) Panoramic view of the hydro-laccolith over the las Calderuelas valley bottom and location of the geoelectric profile. B) 1927 topographic sketch-map by IGN showing the lobulated topographic contours (20 m equidistance) at the morphologic bulge (black arrow). C) 2010 LiDAR-derived DTM (IGN) and contour lines (5 m equidistance) and profile location. D) LiDAR point cloud and bottom surface obtained from geoelectric sections. E) 2D main geoelectric section and pseudo-sections indicating the limits of each geo-resistivity unit (dashed lines). See color figure in the web.

Discusión

Si tenemos en cuenta la clasificación de Washburn (1979), los hidrolacolitos citados en el sistema Central podrían corresponder a la tipología de palsas. Sin embargo, en otras interpretaciones (Seppälä, 1986; Cummings y Pollard 1989; Pollard y French, 2011) las palsas se originan sin necesidad de una tensión hidrostática positiva (aporte externo de agua), y presentan alternancia de capas de hielo segregado y suelo mineral o turba. Por el contrario, los pingos suelen ser de mayores dimensiones, pueden aparecen aislados y se asocian con remanentes de agua (sistema cerrado o pingos hidrostáticos)

o tensiones hidrostáticas positivas (sistema abierto o pingos hidrodinámicos, Mackay, 1972, 1979). Aunque algunos autores desaconsejan su uso (Harris *et al.*, 1988; Van Everdingen, 1998), el término hidrolacolito se utiliza frecuentemente como sinónimo de pingo hidrodinámico, con un control esencialmente hidráulico externo, y que puede originarse en todo tipo de ambientes periglaciares (Ward, 2004; Woolderink, 2014).

Este hinchamiento identificado en Las Calderuelas presenta una serie de indicadores que lo asocian genéticamente con un proceso de aporte hídrico externo similar al que genera los pingos hidrodinámicos. También converge con los

pingos en sus grandes dimensiones y la permanencia supra estacional. Al aparecer en una zona sin permafrost, y dado que tampoco se detectan signos de segregaciones de hielo capaces de formar lentejones estacionales que controlen el hinchamiento, entendemos que la clasificación más ajustada para esta morfología es la de hidrolacolito.

El valle de las Calderuelas muestra una evolución discontinua de sus laderas, con la presencia de movimientos en masa que se han estabilizado en los últimos 50 años, como denota la abundante vegetación, aunque prosiguen mediante pequeños *debris-flows* y reptaciones del suelo (Fig. 2A).

El proceso desencadenante de la formación del hinchamiento fue un movimiento en masa que dio lugar a una lengua de solifluxión sobre el fondo del valle. Estas condiciones fueron favorables para el desarrollo de un suelo turboso (mezcla de materia mineral y orgánica), que actuó como capa impermeable en la superficie del depósito. La presencia en el subsuelo de un nivel resistivo conectado con la ladera y que presenta un contenido en finos variable (niveles G2a y G2b; Fig. 2E), es el que puede actuar como canalizador del flujo hídrico subterráneo, semiconfinado por las facies más resistentes de la unidad G2. Este proceso sería el responsable de la sobrepresión hidrostática que generó el hinchamiento, favorecido, a su vez, por los procesos de dilatación en las fases de congelación del suelo.

Como se ha indicado previamente, frente a los otros hidrolacolitos descritos en el sistema Central español, el de las Calderuelas presenta unas dimensiones mayores (ver Tabla 1) y una permanencia supra anual. Con los documentos disponibles, ya se detecta su morfología de manera continua desde el año 1927 (Fig. 2B) hasta la actualidad (Fig. 2C). Estos datos hacen que la convergencia de esta morfología con la de los pingos sea notable. Sin embargo, y como ya se ha destacado, en

Medidas	
Eje largo	59 m
Eje corto	22,5 m
Perímetro	170,07 m
Superficie	2126 m ²
Profundidad	4-5 m
Altura sobre base	2-3,5 m
Volumen	4617,37 m ³

Tabla 1.- Principales parámetros morfológicos.
 Table 1.- Main morphological parameters

esta zona no se han encontrado signos de suelos de permafrost. En este contexto, el hidrolacolito de las Calderuelas es un caso excepcional, pero permite trabajar con la hipótesis de que los montículos (estructuras de hinchamiento del suelo) desarrollados en ambientes periglaciares sometidos a ciclos de hilo-deshielo, pueden ser también formas mayores y con permanencia prolongada.

Conclusiones

El hidrolacolito estudiado presenta una morfología elíptica. Su origen está asociado a un movimiento en masa que posteriormente evolucionó como una lengua de solifluxión. Dada su localización morfológica ocupando el fondo del valle, el movimiento en masa se desencadenó en la etapa postglaciar, es decir, posterior a los 11-12 ka BP. De acuerdo con los documentos disponibles, el hidrolacolito y, por tanto, el movimiento en masa, ya estaban formados, al menos, en el año 1927. El hinchamiento que sufre la masa deslizada es debido a la presión hidrostática interna y a los procesos de congelación estacionales, responsables de los cambios detectados en su geometría en los últimos 92 años.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Organismo Autónomo de Parques Nacionales (MAGRAMA, proyecto 1092/2014) y por el Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO, proyecto CGL2016-78380). Los autores agradecen a los responsables científicos del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama su inestimable colaboración, también a los editores y revisores Dr. Jerónimo López

y Dr. Miguel Ángel de Pablo por sus comentarios y sugerencias que han contribuido a mejorar este manuscrito.

Referencias

- AEMET/IPMA (2011). *Atlas Climático Ibérico*. AEMET, Madrid. <http://www.aemet.es/es/divulgacion/publicaciones/>.
- Carrasco, R.M., Pedraza, J., Willenbring, J.K., Karampaglidis, T., Soteres, R.L. y Martín-Duque, J.F. (2016). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 110, 1-16.
- Centeno, J.D., Pedraza, J. y Ortega, L.I. (1983). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 81 (3-4), 153-171.
- Comunidad de Madrid. (2007). *Atlas del Medio Ambiente en la Comunidad de Madrid*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Madrid, 83 p.
- Cummings, C.E. y Pollard, W.H. (1989). *Musk-ox* 37, 8-18.
- Frenzel, B. (1959). *Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse* 13, 937-1099.
- Harris, S.A., French, H.M., Heginbottom, J.A., Johnston, G.H., Ladanyi, B., Sego, D.C. y van Everdingen, R.O. (1988). *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. National Research Council of Canada, Technical Memorandum No. 142, Ottawa, 156 p.
- Hausmann, J., Steinel, H., Kreck, M., Werban, U., Vienken, T. y Dietrich, P. (2013). *Geomorphology* 201, 335-343.
- Loke, M.H., Wilkinson, P.B. y Chambers, J.E. (2010). *Geophysical journal international* 183, 1302-1315.
- Mackay, J.R. (1972). *Annals of the Association of American Geographers* 62(1), 1-22.
- Mackay, J.R. (1979). *Géographie physique et Quaternaire* 33(1), 3-61.
- Mackay, J. (1998). *Géographie physique et Quaternaire* 52(3), 1-53.
- Molina, E. y Pellitero, E. (1982). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* 80, 49-56.
- Palacios, D., De Andrés, N., Marcos, J. y Vázquez-Selem, L. (2012). *Geomorphology* 139-140, 67-78.
- Pedraza, J. (1994). En: *Periglaciario en la Península Ibérica, Canarias y Baleares: estudios significativos* (M. Simón-Torres, A. Gómez-Ortiz y F. Salvador-Frach, Eds.). Universidad de Granada, 147-164.
- Pollard, W.H. y French, H.M. (2011). *Canadian Journal of Earth Sciences* 21(10), 1073-1081.
- Reynolds, J.M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons Ltd, 2nd ed., Chichester, UK.
- Ruiz-García, C., Rodríguez-Fernández, L.R. y Pérez-González, A. (1991). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 483 (Segovia) y memoria*. IGME, Madrid, 135 p.
- Schrott, L. y Sass, O. (2008). *Geomorphology* 93, 55-73.
- Seppälä, M. (1986). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 68 (3), 141-147.
- Van Everdingen, R.O. (1998). *Multilanguage glossary of permafrost and related ground-ice terms*. The University of Calgary, Alberta, 159 p.
- Ward, S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology*, Vol I. Routledge, London, 1156 p.
- Washburn, A.L. (1979). *Geocryology*. Edward Arnold, London, 397 p.
- Woolderink, H.A.G. (2014). *Late Weichselian permafrost distribution and degradation. A pingo based reconstruction for the Netherlands*. PhD Dissertation Thesis, Utrecht University, 84 p.
- Zuidhoff, F.S. y Kolstrup, E. (2005). *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 37(1), 49-60.