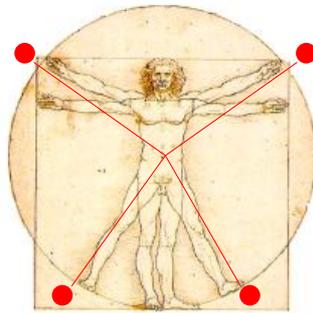


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XII. AÑO 2014

SEPARATA



INFLUENCIA DE LOS ENDURECIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL MICRO-RELIEVE DE LAS SUPERFICIES GRANÍTICAS DE LA PEDRIZA DE MANZANARES. PARQUE NACIONAL DE GUADARRAMA (ESPAÑA)

M. García-Rodríguez, M. Gómez-Heras, R. Fort, M. Álvarez de Buergo, J.D Centeno.



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: García-Rodríguez M, Gómez-Heras M, Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Centeno, J.D. Mayo, 2014.
<http://www.uax.es/publicacion/influencia-de-los-endurecimientos-superficiales-en-el-micro-relieve-de.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*
Escuela Politécnica Superior.
Universidad Alfonso X el Sabio.
28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).
ISSN: 1696-8085
Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

INFLUENCIA DE LOS ENDURECIMIENTOS SUPERFICIALES EN EL MICRO-RELIEVE DE LAS SUPERFICIES GRANÍTICAS DE LA PEDRIZA DE MANZANARES. PARQUE NACIONAL DE GUADARRAMA (ESPAÑA)

**García-Rodríguez M.⁽¹⁾, Gómez-Heras M.⁽²⁾, Fort, R.⁽³⁾,
Álvarez de Buergo, M.⁽³⁾, Centeno, J.D.⁽⁴⁾**

(1) Dpto. Ciencias Analíticas, Fac. de Ciencias UNED. Paseo Senda del Rey 9. 28040, Madrid
E-mail: manu.garo@ccia.uned.es.

(2) CEI Campus Moncloa, UCM-UPM y ETS Arquitectura UPM.

(3) Instituto de Geociencias IGEO (CSIC, UCM).

(4) Departamento de Geodinámica, Facultad de Geología, UCM.

RESUMEN

La Pedriza de Manzanares es un paisaje granítico y forma parte del Parque Nacional del Guadarrama. Gran parte de las superficies de estas rocas están recubiertas por endurecimientos que controlan parcialmente la alteración superficial y la distribución y desarrollo de micro-relieves (rugosidad). En este trabajo se analizan algunos factores (morfología de los abultamientos, temperatura, humedad relativa y dureza) que intervienen en el proceso de destrucción de dichos endurecimientos y en la formación de irregularidades de la superficie del granito. En particular, se estudian las irregularidades a escala centimétrica y decimétrica de una pared denominada el Murito.

PALABRAS CLAVE: *Superficies endurecidas, Meteorización de granitos, Pedriza de Manzanares, Parque Nacional de Guadarrama.*

ABSTRACT

The Pedriza de Manzanares is a granite rocky landscape into the limits of the National Park of Guadarrama. Much of the surfaces of these rocks are covered with hard crusts (case-hardening) that control surface weathering and the distribution and development of micro-relief (roughness). We have measured and analysed some factors (morphology, temperature, relative humidity and hardness) involved in the process of destruction of such case-hardening, that lead to the formation of surface irregularities. Particularly, we studied roughness at centimeter and decimeter scale on a rock-wall called the Murito (little or short wall).

KEY-WORDS: *Case-Hardening, Granite Weathering, Pedriza de Manzanares, National Park of Guadarrama.*

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Contexto, 3. Metodología, 4. Resultados y discusión, 5. Conclusiones, 6. Agradecimientos, 7. Bibliografía.

1. Introducción

La Pedriza de Manzanares está representada por granitos que intruyeron en el Sistema Central Español a finales del Paleozoico y alcanzaron su posición actual durante la orogenia Alpina. Se trata de una de las zonas más emblemáticas del Parque Nacional del Guadarrama en la región de Madrid. Estos granitos están afectados por un complejo sistema de fracturas que han originado un paisaje en el que abundan formas dómicas, paredes de verticalidad variada, y numerosos bloques sueltos. Es frecuente encontrar formas de alteración y meteorización características como tafoni, pilas, pilancones, acanaladuras o agrietamientos poligonales entre otras. En este trabajo se analizan las variables que intervienen en la aparición de micro-relieve a escala centimétrica (rugosidad) sobre un muro de granito, en una etapa previa al desarrollo de alguna de las formas antes citadas, incidiendo en la relación entre la presencia de superficies endurecidas “hardening” y el desarrollo de la rugosidad sobre la roca.

1.1. Superficies endurecidas y formas asociadas

El endurecimiento superficial de las rocas es un proceso común que afecta a rocas de diferentes litologías, creando una superficie externa más resistente a la erosión que la parte interior. En rocas cristalinas como el granito, este tipo de proceso tiende a perder cohesión en las zonas internas (Conca, 1985). El origen de estos endurecimientos es muy discutido y todavía se encuentra en fase de estudio (Dorn, 1998). En la bibliografía existente pueden encontrarse ejemplos de endurecimientos sobre rocas de muy diversa litología y relacionadas con ambientes bioclimáticos también muy variados. Por ejemplo, existen trabajos de endurecimientos sobre rocas graníticas en Francia y Marruecos (Robinson y Williams, 1987; Robinson y Williams, 1992), Córcega (Wilhelmy, 1964), Australia (Branagan, 1983) así como en muchos otros lugares del mundo. Dependiendo de las características de la superficie endurecida su origen puede relacionarse con procesos subsuperficiales o bien aéreos.

Si el endurecimiento superficial se produce en ambientes subsuperficiales cuando la roca todavía está enterrada (Mottershead y Pye, 1994), suele estar formado por óxidos de hierro y sílice (Merrill, 1906) que precipitan sobre las superficies rocosas o sobre planos de fractura internos (Conca 1985). Twidale (1982) y Campbell y Twidale (1995) también señalan que esa concentración de óxidos de hierro y sílice puede ser igualmente un relicto de características asociadas con el frente de alteración, en los que las concentraciones de hierro comúnmente alcanzan valores de dos a tres veces mayores que en la roca fresca. En este contexto, el agua de la roca puede movilizar sales hacia la

superficie donde las precipita creando una superficie endurecida y dejando un núcleo más debilitado (Hobbs, 1919). La evidencia del endurecimiento tiene lugar cuando la roca ha salido al exterior y su superficie empieza a ser erosionada. La idea más generalizada sobre el origen de los endurecimientos superficiales en granito es atribuirlo, a soluciones del material meteorizado que se moviliza por evaporación en la superficie de la roca y capilaridad desde el interior, precipitando (Garner, 1974; Twidale, 1982; Watson y Pye, 1985) y formando una costra sobre la superficie (Figura 1.1).

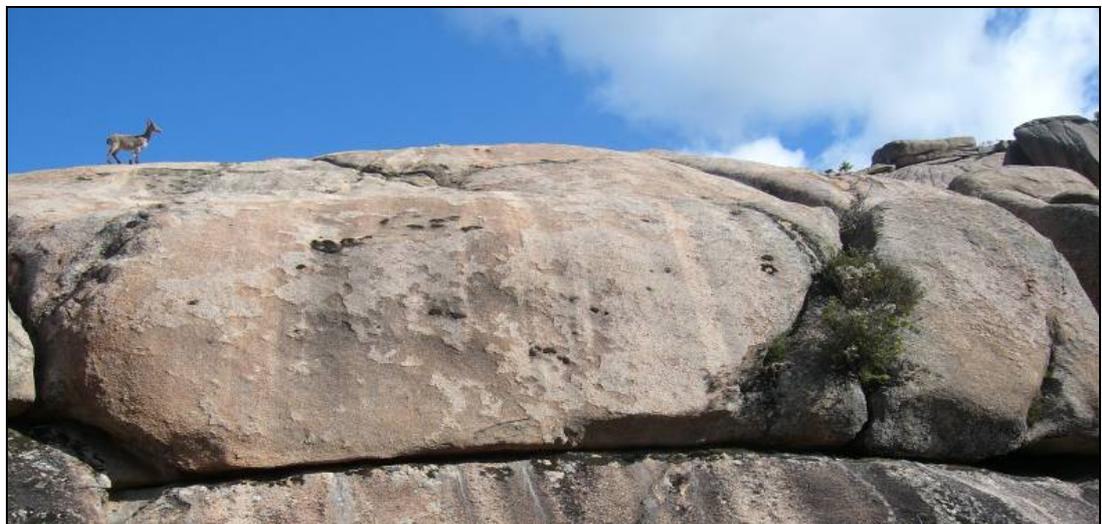


Figura 1.1. Superficie de roca granítica en la que se observa una superficie endurecida (tonos claros) y otra más meteorizada (tonos rojizos) en la que se ha desprendido el endurecimiento (La Pedriza de Manzanares).

Las superficies endurecidas sobre las rocas graníticas ayudan a estabilizar la superficie de las rocas ante la erosión. Cuando se produce la rotura de dichos endurecimientos, el proceso de meteorización avanza con rapidez hacia el interior de la roca, aprovechando zonas débiles como pequeñas oquedades o fracturas, favoreciendo una meteorización diferencial de su superficie. Ejemplo de una forma singular que resultan de la rotura y meteorización de la una superficie endurecida, son algún tipo de agrietamientos poligonales (Figura 1.2), que llegan a formar placas resistentes a la meteorización separadas del cuerpo de roca hasta varios centímetros (5 – 10 cm).

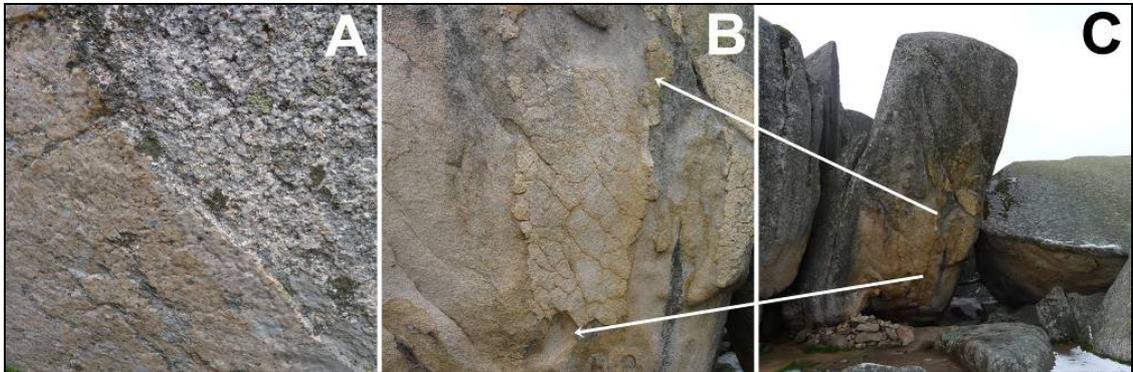


Figura 1.2. (a) Detalle de una superficie endurecida (hardening). (b) Agrietamientos poligonales desarrollados sobre una superficie endurecida. (c) Vista general del bloque de la figura (b) en La Pedriza de Manzanares.

Cuando los agrietamientos se desarrollan sobre bolos graníticos de superficies curvas, es frecuente que la placa llegue a desprenderse por completo y se inicie el desarrollo de un tafoni (de Prado, 1975), sobre una zona de menor dureza (Figura 1.3).



Figura 1.3. (a, b, c) Inicio de tafonización sobre granito alterado por desprendimiento de las placas endurecidas de los agrietamientos poligonales en Zarzalejo (Madrid).

El estudio de los agrietamientos poligonales (García-Rodríguez et al., 2012 y 2013) y el mecanismo de incisión de los bordes de las placas, pone de manifiesto la diferencia de dureza entre la placa externa y el granito interior más debilitado (Hobbs, 1919), formando canales profundos en los que la meteorización ha actuado con celeridad.

1.2. Meteorización del granito

Existen muchos factores que participan en la meteorización del granito y que actúan simultáneamente. Los factores externos más influyentes tienen relación con el régimen climático y oscilaciones térmicas (Vidal Romaní y Twidale, 2010), con procesos químicos en los que la hidrólisis e hidratación son las principales reacciones que contribuyen a desagregar la roca (Twidale, 1982; Matsukura y Tanaka, 2000), con la rotura debido a la expansión de la parte más superficial de la roca (Sosman, 1916; Schulke, 1973), con procesos de hielo – deshielo (Twidale, 1982), por desecación de las superficies rocosas debido a la insolación y rotura de la parte superficial (Robinson y Williams, 1989), o debido a microorganismos (Viles y Goudie, 2004).

El mecanismo de meteorización y pérdida de material de superficies graníticas incluye dos mecanismos que fueron descritos por Kvelberg y Popoff (1938), por desagregación granular, o por desagregación de pequeñas placas que se van desprendiendo paralelamente al frente de alteración (Figura 1.4). Estos mecanismos se hacen activos por procesos de meteorización bien mecánicos o químicos tales como los citados anteriormente.

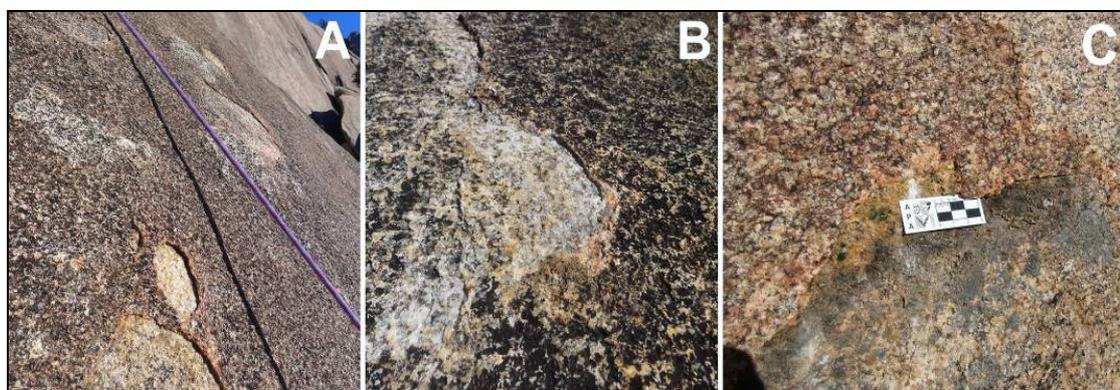


Figura 1.4. Meteorización de granito en lajas en La Pedriza de Manzanares. (a) Vista general, (b y c) detalle de descamaciones en capas (ambas a la misma escala).

Los cambios térmicos influyen en la meteorización por diferencias de temperatura a escala de los granos minerales que componen la roca (Hall and André, 2003; Gómez-Heras et al., 2006). La insolación es un agente potencial de meteorización a través de los esfuerzos generados por diferencias de temperatura (Rice 1976; Smith, 1977, Gómez-Heras et al., 2008). En rocas heterogéneas como el granito, los cristales que componen

la roca, como por ejemplo el cuarzo y el feldespato, tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica y por tanto diferente respuesta ante la meteorización por efecto de la temperatura. Ishimaru y Yoshikawa (2000) atribuyen el gradiente térmico como uno de los principales procesos de la micro descamación que producen incisiones en los granitoides (Hall y Andre, 2003). Van Autenboer (1964) apoya el efecto de modificaciones periódicas de humedad junto a la cristalización de sales (Bradley et al., 1978) como los principales mecanismos responsables de la primera fase de alteración del granito en la incisión y origen de formas tipo tafoni. Las sales incrementan la solubilidad de los silicatos en periodos húmedos, y cristalizan en periodos secos produciendo una meteorización mecánica (Mustoe, 1982; Young, 1987). El yeso y la halita han sido aceptadas como las sales que más influyen en la profundización de la rugosidad (en estudios de tafoni) en rocas graníticas (Bradley et al., 1978). Para explicar la presencia de sales en zonas donde la roca original carece de ellas, Brandmeier et al., (2011) sugieren que pueden llegar transportadas por el aire desde zonas desérticas o zonas con polución industrial.

El trabajo describe las irregularidades centimétricas o decimétricas desarrolladas sobre en una pared subvertical, de unos 6 m de altura y orientada hacia el sur. Dicha pared se caracteriza por presentar una superficie plana con evidencias de haber estado tapizada prácticamente en su totalidad por una superficie endurecida. Actualmente dicho endurecimiento ha desaparecido en gran parte de pared salvo de forma residual en las partes externas de las rugosidades que se estudian. En este trabajo se ha empleado el término rugosidad o micro-relieve para referirse a cada uno de los “abultamientos” de la roca, caracterizados por una zona de valle que se presenta más meteorizada y una zona externa de mayor dureza con restos de endurecimientos. El objetivo de este trabajo ha sido establecer relaciones entre la morfología de las rugosidades presentes sobre el muro, con las variables que pueden haber intervenido en su desarrollo, como la temperatura, humedad relativa, orientación, verticalidad de la pared y endurecimientos de las partes externas de los abultamientos.

2. Contexto

La Pedriza de Manzanares se localiza en las laderas meridionales de la sierra de Guadarrama, formando una vertiente compleja, entre las cumbres de la sierra de Cuerda Larga y la plataforma de arrasamiento cerca de la población de Manzanares el Real. La atractiva geomorfología de este entorno convirtieron a la Pedriza en uno de los primeros espacios protegidos españoles, hasta incorporarse recientemente a la declaración del Parque Nacional de Guadarrama. Responsable del paisaje actual ha sido el

levantamiento alpino, que ha creado una vertiente escalonada con relieves grabados, conforme la meteorización penetraba a favor de las fracturas y producía la evacuación de regolito hacia la cuenca del Tajo (Pedraza et al., 1989; Centeno, 1988). La red de fracturación preferente es de dirección E-W, ENE-WSW, formando un enrejado ortogonal que condiciona la disposición de los bloques graníticos. Las fracturas tienen una inclinación muy variada, desde prácticamente verticales a horizontales. Son también frecuentes fracturas de tipo curvo que ofrecen relieves con formas dómicas (Pedraza et al., 1989). La dirección predominante de estos planos curvos es E-W, con orientación hacia el sur. La gran red de fracturación y la intensa meteorización del macizo rocoso se inició en condiciones subaéreas.

La Pedriza de Manzanares comprende dos zonas bien definidas con características mineralógicas y geomorfológicas algo diferentes, denominadas Pedriza posterior y Pedriza anterior. La Pedriza posterior incluye las zonas de mayor altitud (p.ej. las Torres con 2029 m). La Pedriza anterior, donde se localiza el muro estudiado en este trabajo, se extiende desde la localidad de Manzanares el Real hasta la falla del collado de la Dehesilla al collado Cabrón. Comprende altitudes de entre unos 900 m, y 1719 m en la cima del Yelmo. En particular, la zona estudiada se sitúa a 1180 m de altitud. La Pedriza anterior está formada por leucogranitos. En estas rocas el feldespato potásico micropertítico cristalizó después del cuarzo y la plagioclasa. La biotita es el principal mineral máfico en estos leucogranitos (Pérez-Soba y Villaseca, 2010). Según el IGME (1988), el clima en la Pedriza anterior es de tipo Mediterráneo templado - frío, húmedo. La pluviometría media anual para todo el rango de altitudes es de 800-1500 mm/año. La temperatura media anual varía de 11-12°C en las partes bajas, a 9-10°C para alturas de entre 1200-1600 m.

El trabajo se ha realizado sobre una pared que en trabajos previos (García-Rodríguez et al., 2013) se denominó como “El Murito”. Se trata de un muro casi vertical de dirección este-oeste, que se corresponde con un plano de fractura y tiene orientación sur.

3. Metodología

Se ha estudiado la rugosidad del Murito sobre una banda de 1,5 m de anchura desde el suelo hasta una altura de 6,5 m (Figura 3.1). El límite superior de la zona estudiada viene limitado por una fractura horizontal que representa una discontinuidad sobre la que apoya un bloque independiente de la zona estudiada.

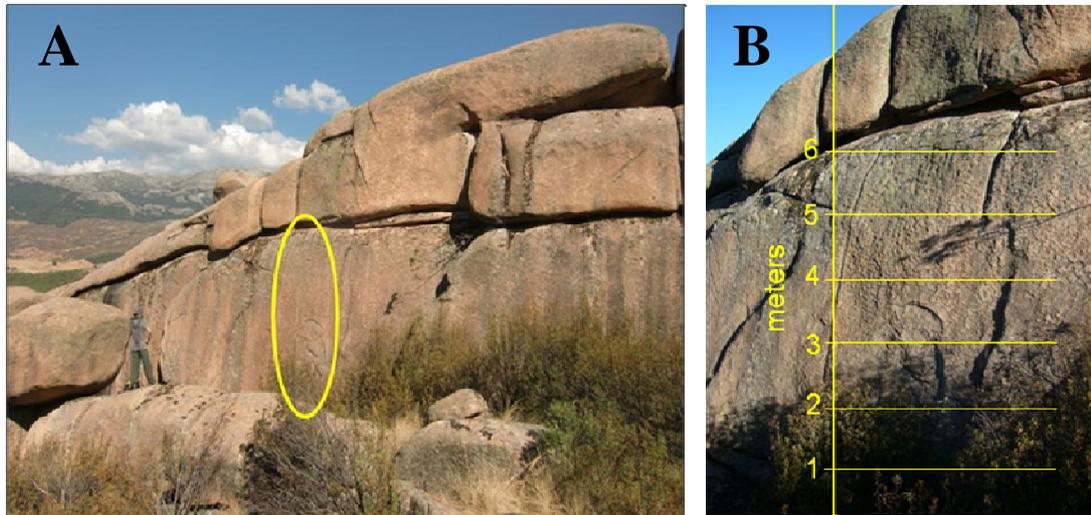


Figura 3.1. (a) Vista general del murito con indicación de la zona estudiada. (b) Detalle de la zona estudiada con los intervalos en los que se han realizado las medidas.

La superficie estudiada tiene inclinaciones que varían entre unos 50° S en la parte superior, y cerca de 90° S en la parte inferior, junto al suelo. Sobre la superficie de la pared se aprecia que en realidad se trata de un conjunto de fracturas paralelas con espaciado variable entre unos 5 y 50 cm. La banda de la superficie estudiada tiene continuidad desde el suelo hasta la parte más alta y se corresponde con un mismo plano de fractura. Se han descartado superficies de fractura o lascas de zonas laterales de la banda seleccionada, que puedan haber dejado expuesta la superficie rocosa por un periodo de tiempo mayor o menor, y por tanto con una velocidad de meteorización diferente. Por otra parte, sobre la banda seleccionada se ha identificado continuidad del endurecimiento estudiado. La pared se ha estudiado a partir de las siguientes mediciones y técnicas empleadas:

- Medida del tamaño y forma de los abultamientos a lo largo de toda la altura de la pared.
- Registro de la temperatura y humedad relativa de la pared con sensores data-loggers (tipo i-button) durante un periodo de un año.
- Mediciones de la dureza del granito con el martillo Schmidt en las zonas internas y externas de los abultamientos.

3.1. Morfometría y distribución

Se establecieron intervalos de 0,5 m en toda la altura de la pared que permitiera realizar las mediciones con una sistemática. Debido a la verticalidad de la pared, para realizar las mediciones se ha tenido que recurrir a técnicas de escalada descolgándose con cuerdas desde la parte superior del murito. En cada intervalo de 0,5 metros se realizaron al menos 5 medidas de las dimensiones de los abultamientos (irregularidades) de la roca sobre la banda seleccionada. Se midieron las longitudes de los ejes mayor y menor de cada abultamiento, altura con respecto al suelo, inclinación de la pared, y profundidad de cada abultamiento por meteorización. A partir de las medidas de los ejes, se definió un índice de forma como $(L+ l)/2$, siendo “L” el eje mayor y “l” el eje menor, medidos perpendicularmente entre sí.

3.2. Temperatura y humedad relativa

El registro de la temperatura y humedad relativa se realizó con sensores tipo i-button colocados a diferentes alturas. La finalidad ha sido estudiar variaciones de temperatura y humedad relativa a lo largo de toda la altura del Murito, y buscar relaciones entre ambos parámetros con el tamaño de la rugosidad y presencia de los endurecimientos. Se realizaron medidas con registro continuo durante un periodo de un año, entre el 15 de septiembre de 2012 y el 15 de septiembre de 2013. Se colocaron cuatro sensores (B1, B2, B3 y B4) sobre la pared del Murito (cara sur) y otro sensor (B5) en una pared situada justo en frente (cara norte) que permitiera establecer comparaciones. Los sensores B1 y B2 se colocaron en un agrietamiento poligonal que culmina la pared del murito; el B1 a una altura de 6,2 m sobre la placa del agrietamiento poligonal, y B2 a 6,1 m de altura, sobre la grieta. Los sensores B3 y B4 se colocaron a 4,2 m y a 2,30 m de altura respectivamente.

3.3. Martillo Schmidt

Se realizaron medidas de dureza con el martillo Schmidt a lo largo y ancho de toda la banda del Murito estudiada. En cada intervalo de 0,5 m se realizaron 5 medidas sobre las zonas exteriores de los abultamientos y otras 5 en las zonas interiores (valle). El índice de esclerometría o de rebote es adimensional y no tiene unidades. En general, las medidas de las zonas externas están realizadas sobre restos de superficies endurecidas y las interiores en zonas más meteorizadas en las que ha desaparecido el endurecimiento (Figura 3.2).

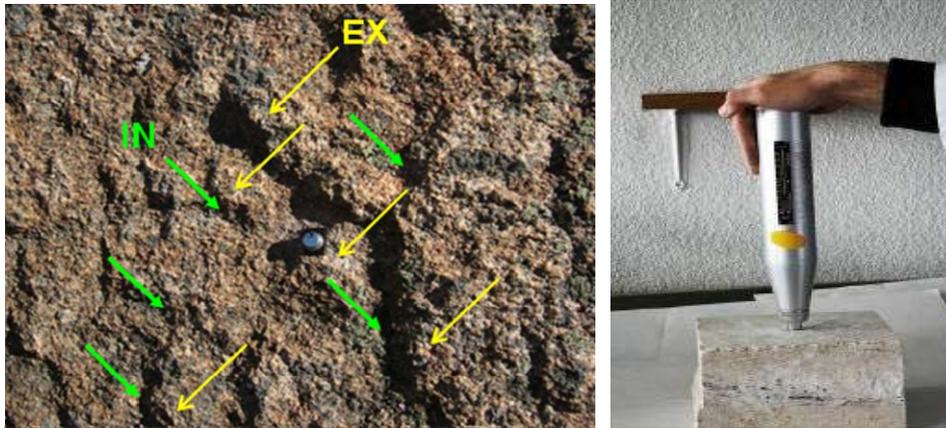


Figura 3.2. (a) Ejemplo de distribución de medidas de dureza en las partes exteriores con restos de superficies endurecidas (Ex) y en zonas de valle (In). (b) Martillo Schmidt.

4. Resultados y discusión

El Murito presenta tres zonas con características diferentes; una parte superior con agrietamientos poligonales, una zona de transición en la que los agrietamientos poligonales se hacen difusos, y una zona con irregularidades y abultamientos muy bien definida (Tabla 4.1). Los 2,5 metros inferiores se caracterizan por presentar una superficie plana sin agrietamientos poligonales ni apenas irregularidades de la superficie que resalte abultamientos significativos.

La zona más elevada, situada entre 6 y 6,5 m de altura desde el suelo, se caracteriza por presentar agrietamientos poligonales (AP) de tipo cuadrangular muy bien definidos (Figura 4.1). Las orientaciones de los bordes de los agrietamientos guardan relación con las orientaciones de las fracturas en la zona (García-Rodríguez et al., 2013), es decir, bordes laterales formados a favor de fracturas verticales de dirección norte-sur, y bordes superiores e inferiores asociados a planos de fracturas horizontales. Se trata de la zona con menor inclinación, siendo la media del tramo de 52° . Las placas de los agrietamientos representan superficies endurecidas muy bien conservadas. La dureza media de las placas de los agrietamientos medida con el martillo Schmidt tiene un valor de 40, ofreciendo los valores máximos registrados de toda la pared. Se trata por tanto de la zona en la que el endurecimiento superficial está mejor desarrollado y menos meteorizado. La incisión de la grietas oscila entre 1 y 2,5 cm de profundidad.

La franja de la pared comprendida entre 5 y 6 m es una zona de transición entre los agrietamientos poligonales de la parte superior y las rugosidades de la zona inferior. La inclinación media del tramo es de 73°. Los abultamientos entre 5,5 y 6 m, ofrecen valores medios de dureza en las zonas exteriores e interiores muy similares, de unos 27 y 25 respectivamente, indicando la práctica desaparición de la superficie endurecida en ese tramo, es decir, se trata del tramo más meteorizado de todo el muro. En particular, la pérdida del endurecimiento en este tramo parece atribuirse principalmente al efecto de la escorrentía superficial canalizada desde los bordes laterales de los agrietamientos de la parte superior, que deja formas alargadas en el sentido de la pendiente. Inmediatamente por debajo, entre 5 y 5,5 m, se empiezan a reconocer irregularidades que forman abultamientos aislados, en los que se registra un aumento de la dureza debido a la persistencia de la superficie endurecida.

Altura tramo (m) y nº de medidas (N)	Inclinación (°)	Media eje Máximo (mm)	Media eje mínimo (mm)	Promedio factor de forma del tramo (L+l/2)	Formas Rango prof. (mm)
6 -6,5 m N = 9	52°S	443	217	330	Agrietamiento poligonal (AP) En Grieta 10-25
5,5-6 m N = 11	71°S	103	71	87	Tránsito AP/Rugosidad 2 - 10
5 - 5,5 m N = 7	75°S	94	50	72	Muy difusas 2 - 4
4,5 - 5 m N = 9	77°S	94	42	68	Bien definidas 4 - 6
4 - 4,5 m N = 9	82°S	121	78	99	Muy bien definidas 4 - 6
3,5 - 4 m N = 10	84°S	62	39	51	Muy bien definidas 4 - 6
3 -3,5 m N = 10	84°S	62	37	49	Mal definidas 2 - 5
2,5 -3 m N = 10	84°S	47	29	38	Muy mal definidas 2 - 3
2 - 2,5 m N = 8	86°S	64	41	52	Muy mal definidas 2 -3
0 - 2,5 m	88°S	-	-	-	No reconocibles 2 - 3

Tabla 4.1. Dimensiones de los abultamientos de las irregularidades de la pared.



Figura 4.1. Irregularidades en el Murito (tramo 5 a 6 m) y detalle de agrietamientos poligonales.

La zona con abultamientos más pronunciados se localiza entre unos 3,5 y 5 m de altura, con profundidades de los abultamientos de 4 a 6 mm (Figura 4.2a).

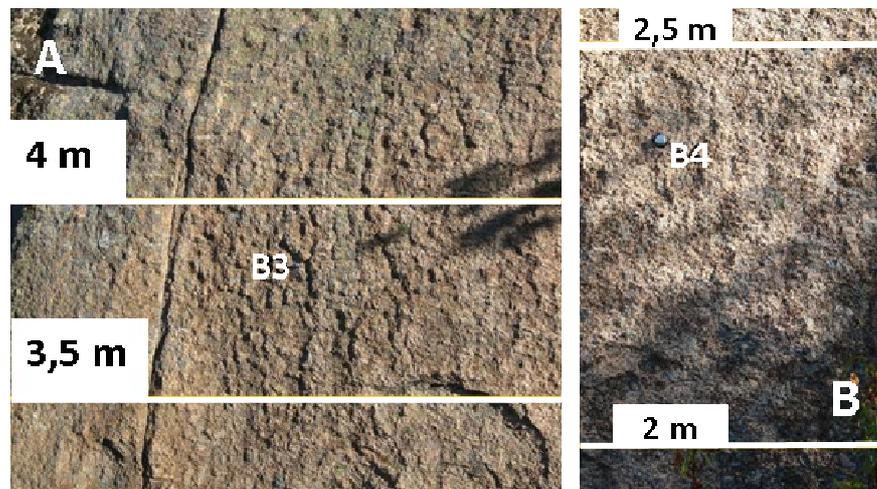


Figura 4.2. (a) Rugosidad en el Murito entre 3,5 y 4,5 m de altura. (b) Detalle del tramo de 2 a 2,5 m.

La inclinación del tramo (3,5 – 5m) varía de 77° en la parte superior, a 84° en la inferior. Se caracteriza por formas con endurecimientos presentes sobre la parte exterior, con valores medios que oscilan entre 31 y 44 (Tabla 4.2). Los valores de dureza en las zonas interiores, en las que ha desaparecido el endurecimiento, la dureza oscila entre

unos 23 y 29. La incisión que forma las irregularidades se realiza fundamentalmente a favor líneas verticales por escorrentía superficial del agua. Esta direccionalidad con ejes máximos de gran tamaño se pone de manifiesto por un elevado factor de forma de 99 (tramo entre 4 y 4,5 m).

Entre los metros 0 y 3,5 existe una superficie endurecida con una incisión de 2 o 3 mm, inferior a la de los tramos superiores donde la presencia de abultamientos es muy escasa (Figura 4.2b). En este tramo la superficie endurecida tiene mayor continuidad espacial y los abultamiento generados por meteorización de la roca son menos frecuentes.

Altura tramo (m) / N° de medidas	Inclinación de la pared en (°) (orientación sur)	Media de medidas zona exterior	Media de medidas zona interior	Diferencia Exterior-Interior
6 - 6,5 m / 5	52°	40	30,8	9,2
5,5 - 6 m / 5	71°	27,4	25,2	2,2
5 - 5,5 m / 5	75°	36,6	29	7,6
4,5 - 5 m / 5	77°	38,2	23,6	14,6
4 - 4,5 m / 5	82°	37,6	29	8,6
3,5 - 4 m / 5	84°	44	25,6	18,4
3 - 3,5 m / 5	84°	31,2	25,4	15,8
2,5 - 3 m / 5	84°	38,4	25,8	12,6
2 - 2,5 m / 4	88°	27,5	26	1,5
1,5 - 2 m / 5	88°	36	25,7	10,3
0 -1,5 m / 4	88°	28,2	23,8	4,4
Media	79,4	35,0	26,4	9,6

Tabla 4.2. Medidas con martillo Schmidt en el Murito.

El registro de temperaturas en la pared durante todo un año indica oscilaciones térmicas diarias, en días despejados, de entre unos 20°C y 35°C con temperaturas comprendidas en la banda de unos 0°C y 52°C dependiendo la época del año. El estudio de las variaciones de temperatura con la altura, considerando por ejemplo los meses de enero y junio, señala que en parte superior del muro se alcanzan unos 5° C más (para ambos periodos), que en la parte inferior. No se consideran los datos del B5, que está situado en una pared de orientación norte distinta de la estudiada.

En la Tabla 4.3 se presenta un resumen de las temperaturas registradas en los periodos 22 de noviembre al 21 de diciembre de 2012 y del 30 de mayo al 28 de junio

de 2013. Se han seleccionado estos periodos de tiempo que incluyen los días más cortos y más largos del año. Además, se han seleccionado días seguidos sin precipitaciones con objeto de dar fiabilidad a la interpretación de los datos de temperatura por insolación. En las Figuras 4.3 y 4.4 se muestran la temperatura y humedad para un periodo corto de tiempo, representativo de los meses seleccionados.

Datos temperatura (°C) periodo 22 noviembre – 21 diciembre 2012					
	B1	B2	B3	B4	B5
<i>Minima</i>	0,6	0,6	1,1	0,6	-0,4
<i>Máxima</i>	30,7	35,7	34,2	30,6	21,6
<i>Media</i>	8,7	9,4	7,6	8,4	5,5
<i>Rango</i>	30,1	35,1	33,1	30	22
Datos temperatura (°C) periodo 30 de mayo – 28 junio 2013					
	B1	B2	B3	B4	B5
<i>Minima</i>	5,1	5,6	5,1	5,1	4,6
<i>Máxima</i>	53,6	51,6	53	51	51,6
<i>Media</i>	21	20,8	20,6	20	18,7
<i>Rango</i>	48,5	46	47,9	45,9	47

Tabla 4.3. Resumen de datos de temperatura en el Murito.

En la zona de agrietamientos poligonales durante el mes de diciembre (Figura 4.3) se ha observado una diferencia de temperatura diaria entre la superficie de la placa (B1) y zona de grieta (B2) de hasta 6°C, con valores mayores en B2, donde la pared es más vertical. En este mismo periodo la humedad (Figura 4.3) es ligeramente mayor sobre la placa que sobre la grieta, y esta situación se mantiene durante todo el día. Los valores de humedad relativa cero registrados en B2 y B3 corresponden a los momentos de máxima insolación en las zonas de mayor verticalidad, donde la radiación solar incide más perpendicularmente a la pared.

En junio (Figura 4.4), que los rayos solares inciden más verticales, la diferencia de temperatura entre la superficie de la placa (B1) y la grieta (B2) tienden a igualarse aunque los máximos se alcanzan sobre la placa (B1). La humedad (Figura 4.4) tiene valores similares sobre la placa y grieta hasta media mañana, que es mayor en la grieta por efecto de la sombra que crea.

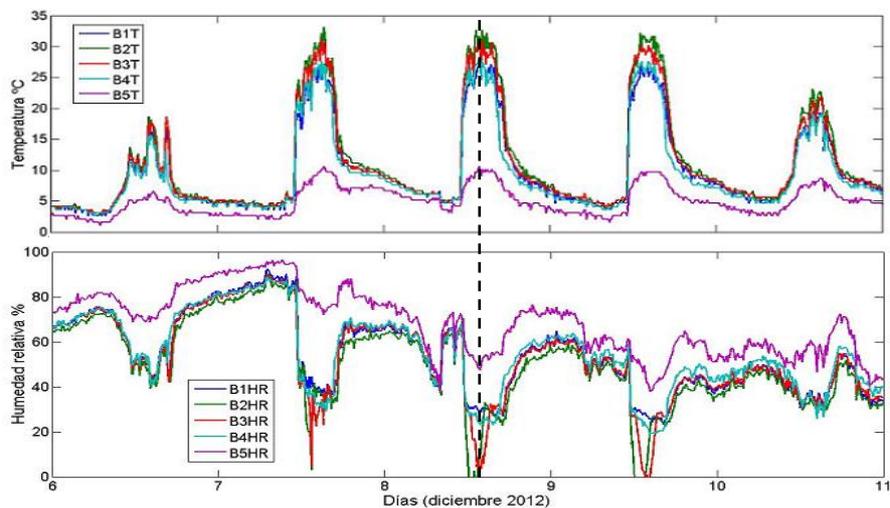


Figura 4.3. Registro de temperaturas (°C) y humedad relativa (%), tomada por cinco sensores en el Murito entre los días 6 y 11 de diciembre de 2012. Días 7, 8 y 9 sin nubes. La línea de puntos vertical resalta el paralelismo de los ciclos de temperatura y humedad.

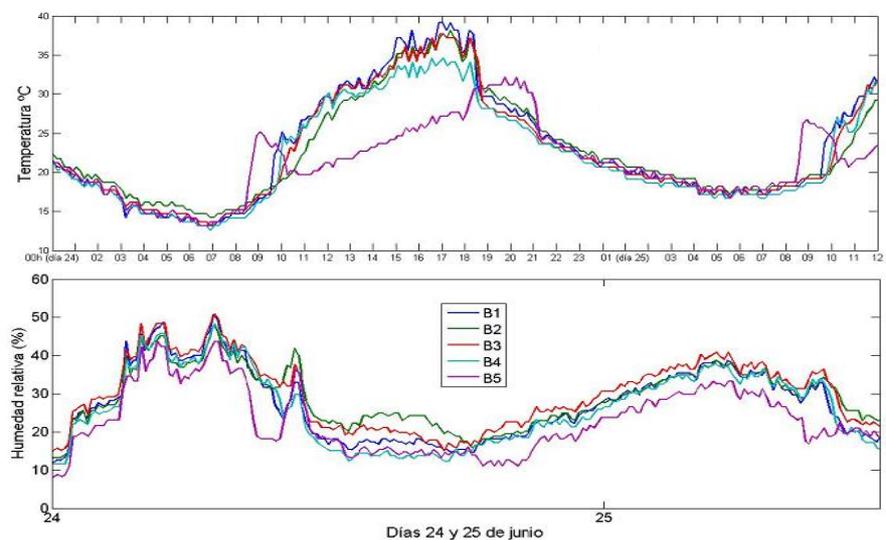


Figura 4.4. Registro de temperaturas y humedad relativa, tomada por cinco sensores en el Murito los días 24 y 25 de junio de 2013.

De un análisis conjunto de las variaciones de temperatura en toda la pared del Murito, dejando aparte los datos del B1 que se localizan sobre una superficie de menor inclinación, se observa que la temperatura registrada durante el mes de enero aumenta con la altura de la pared. En junio las temperaturas tienden a igualarse, aunque los máximos se alcanzan en las zonas más altas y los mínimos en las de menor altura.

Los datos de temperatura en la pared salvando la particularidad de los agrietamientos poligonales de la parte superior, indican que a mayor oscilación de temperatura (zonas altas) mayor rugosidad y pérdida de encostramiento. Respecto a la humedad relativa en el mes de enero y en días no lluviosos, los valores más altos se registran en la parte inferior y los menores en la superior, lo cual guarda relación y es consistente con la insolación recibida. Durante el mes de junio, los mayores valores de humedad, y que se mantienen durante más tiempo, se localizan en el B3, situado entre 4 y 4,5 m de altura, zona en la que las rugosidades están mejor desarrolladas. No obstante los datos de humedad que se presentan en este trabajo debe considerarse únicamente como datos adicionales a falta de un estudio y análisis más exhaustivo, en el que se tengan en cuenta los días de lluvia y se estudie el proceso de escorrentía sobre la pared y la permanencia de humedad en cada tramo.

5. Conclusiones

La pared rocosa del El Murito muestra una costra parcialmente destruida pero con una cierta organización en el progreso de la alteración. En el tramo inferior la costra está bien conservada, es bastante continua y con escaso nivel de agrietamiento. En el tramo superior la costra muestra un agrietamiento poligonal típico, indicador de procesos de migración de solutos y de cierto progreso de la alteración. En el tramo medio-alto, por debajo de los agrietamientos poligonales, la costra está totalmente destruida. Por último, en el tramo medio-bajo la alteración ha destruido la costra casi en su totalidad, dejando algunos restos en la “cumbre” de pequeños resaltes (algo así como mesas o cerros testigos).

El factor de forma ha proporcionado cierta información sobre el tamaño de las rugosidades, en particular, en el caso del tramo medio-bajo, los resaltes con costra tienen una geometría elongada, con eje paralelo a la pendiente. El valor máximo del factor de forma corresponde a los agrietamientos poligonales, que debe tratarse como un caso particular al estar condicionados por la red de fracturación incipiente que ha favorecido su formación.

El estudio de la dureza muestra una clara correlación con el grado de conservación de la costra; el valor medio de dureza sobre ella es 35, y 26 en las zonas alteradas.

En cuanto a los factores ambientales, hay una buena correlación negativa entre los valores de temperatura y humedad relativa en la superficie de la roca. Esta correlación es muy parecida en los valores de invierno y verano (ambos, sin nubes). Por último, los valores máximos de humedad en verano, que se registran en las grietas poligonales de la parte superior, seguidos de los de la parte media-alta. Estas zonas muestran así unas condiciones más favorables para el progreso de la alteración, algo así como un mecanismo de retroalimentación positiva, en el que el inicio de la alteración favorece su subsecuente progreso. En todo caso, este es un trabajo preliminar. Las buenas correlaciones y la aparente lógica de los resultados, nos llevan a preparar una campaña de medidas para el próximo año hidrológico.

6. Agradecimientos

Al programa PICATA postdoctoral y a la Red de Ciencia y Tecnología en Patrimonio del CEI-Moncloa. Al programa GEOMATERIALES (S2009/MAT-1629), al grupo de Investigación UCM nº 921349 Alteración y conservación del patrimonio pétreo.

7. Bibliografía

- BRADLEY, W.C; HUTTON, J.T.; TWIDALE, C.R. (1978). "Role of salts in development of granitic tafoni, south Australia". *Journal of Geology*, 86, 647-654.
- BRANAGAN, D.F. (1983). *Tesselated pavements*. In: Aspects of Australian sandstone landscapes (R.W. Young and G.C. Nanson eds.). Australiana and New Zealand Geomorphology Group Special Publication nº 1, Wollongong, pp. 11-20.
- BRANDMEIER, M.; KUHLEMANN, J.; KRUMREI, I.; KAPPLER, A.; KUBIK P.W. (2011). "New challengers for tafoni research. A new approach to understand processes and weathering rates". *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 839-852.
- CAMPBELL, E.M.; TWIDALE CR. (1995). "Lithologic and climatic convergence in granite morphology". *Cadernos Laboratorio Xelóxico de Laxe* 20:381- 403.
- CENTENO JD. (1988). "*Morfología granítica de un sector del Guadarrama Occidental*". Editorial Complutense. Colección Tesis Doctorales nº262/88. Madrid.
- CONCA, J.L. (1985). "*Differential weathering effects and mechanisms*". Dissertation Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, 251 pp.
- DE PRADO, C. 1864 (1975). "*Descripción física y geológica de la provincia de Madrid*". Publicaciones especiales Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 325 p.
- DORN, R.I. (1998). "*Rock coatings*". *Developments in Earth Surface Processes* 6. Elsevier, 417 pp.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, M.; CENTENO, J.D.; ALVAREZ DE BUERGO, M. (2012). *Weathering landforms exposure and erosion phases in Pedriza de Manzanares (Spanish Central Range)*. Geophysical Research Abstracts. Vol. 14, EGU2012-6279-1, 2012. EGU General Assembly 2012.
- GARCÍA-RODRÍGUEZ, M.; ALVAREZ DE BUERGO, M.; FORT GONZÁLEZ, R.; GÓMEZ-HERAS, M.; CENTENO J.D. (2013). *Thermal and structural controls on polygonal cracking in granite of La Pedriza de Manzanares (Madrid)*. 8th IAG International Conference on Geomorphology, Paris, 2013.
- GARNER, H.F. (1974). *The origin of landscapes, a synthesis of geomorphology*. Oxford University Press, New York, 734 pp.
- GÓMEZ-HERAS, M; SMITH, B.J.; FORT R. (2006). "Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: Implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue". *Geomorphology* 78 (3-4): 236-249.

- GÓMEZ-HERAS, M.; SMITH, B.J.; FORT, R. (2008). "Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal response and its potential for the generation of thermoclasty". *Environmental Geology* 56 (3-4): 547-560.
- GOUDIE (2006). "The Schmidt Hammer in geomorphological research". *Progress in Physical Geography* 30: 703.
- HALL, K.; ANDRÉ, M.F. (2003). "Rock thermal data at the grain scale: applicability to granular disintegration in cold environments". *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 823-836.
- HOBBS, W.H. (1919). "Earth features and their meaning. An introduction to geology for the students and the general reader". MacMillan, New York.
- ISHIMARU, S.; YOSHIKAWA, K. (2000). "The weathering of granodiorite porphyry in the Thiel Mountains, inland Antarctica". *Geografiska Annaler*, 82A, 45-57.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA IGME. (1988). *Atlas geocientífico del medio natural de la Comunidad de Madrid*. IGME.
- MATSUKURA; TANAKA. (2000). "Effect of rock hardness and moisture content on tafoni weathering in the granite of Mount Doeg-Sung, Korea". *Geografiska Annaler*. Series A, Physical Geography, 82, 59-67.
- MERRILL, G.P. (1906). "A treatise on rocks, rock weathering, and soils". MacMillan, New York, 400 pp.
- MOTTERSHEAD, D. N.; Pye, K. (1994). "Tafoni on coast slopes, South Devon, U.K". *Earth Surface Processes and Landforms*, 19:543-563.
- MUSTOE, G.E. (1892). "The origin of honeycomb weathering". *Geological Society of America Bulletin* 93(2): 108-115.
- PEDRAZA J.; SANZ, M.A.; MARTÍN, A. (1989). *Formas graníticas de la Pedriza*. Agencia de Medio Ambiente. Comunidad de Madrid. 205 pp.
- PÉREZ-SOBA, C.; VILLASECA, C. (2010). "Petrogenesis of highly fractionated I-type peraluminous granites: La Pedriza pluton (Spanish Central System)". *Geologica Acta* 8: 131-149.
- RICE, A. (1976). "Insolation warmed over". *Geology* 4: 61-62.
- ROBINSON, D.A.; WILLIAMS, R.B.G. (1987). "Surface crusting of sandstones in southern England and northern France". In: *International Geomorphology 1986 Part II* (V.Gardiner, ed.). Wiley & sons, London, pp. 623-635.
- ROBINSON, D.A.; WILLIAMS, R.B.G. (1992). "Sandstone weathering in the High Atlas, Morocco". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36: 413-429.

- ROBINSON, D.A.; WILLIAMS, R.B.G. (1989). "Polygonal cracking of sandstone at Fontainebleu, France". *Zeitschrift für Geomorphologie* 33: 59-72.
- SCHULKE, H. (1973). "Schildkrotenmuster und andere Polygonalstrukturen auf Felsoberflächen". *Zeitschrift für Geomorphologie* 17: 474-488.
- SMITH, B. J. (1977). "Rock temperature measurements from the northwest Sahara and their implications for rock weathering". *Catena* 4 (1-2): 41-63.
- SOSMAN, R. B. (1916). "Types of prismatic structure in igneous rocks". *Journal of Geology* 24: 215-234.
- TWIDALE, C.R. (1982). "*Granite landforms*". Elsevier, Amsterdam.
- WATSON, A.; PYE, K. (1985). "Pseudokarstic micro-relief and other weathering features on the Mswati Granite (Swaziland)". *Zeitschrift für Geomorphologie*, 29:285-300.
- WILHELMY, H. (1964). "Cavernous rock surfaces in semi-arid and arid climates". *Pakistan Geographical Review*, 19(2):8-13.
- VAN AUTERNBOER, T. (1964). "*The geomorphology and glacial geology of Sor Rondane, dronning maud land*". In: Antarctic geology (Adie, R., ed.). Amsterdam: North Holland, 81-103.
- VIDAL ROMANÍ, J.R.; TWIDALE CR. (2010). "Structural or climatic control in granite landforms? The development of sheet structure, foliation, boudinage, and related features". *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 35:189-208.
- VILES, H.A.; GOUDIE, A.S. (2004). "Biofilms and case hardening on sandstones from Al-Quwayra, Jordan". *Earth Surface Processes and landforms* 29, 1473-1485.
- YOUNG, ARM. (1987). "Salt as an agent in the development of cavernous weathering". *Geology* 15(10): 962-966.