

La tierra de las mil canteras: caracterización geológica del área granítica de Cardenosa-Mingorría y alrededores de Ávila

Francisco Javier López-Moro
Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)

Miguel López-Plaza
Departamento de Geología, Universidad de Salamanca

José I. García de los Ríos Cobo
Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León, S.A. (SIEMCALSA)

RESUMEN. Se realiza un estudio cartográfico, geológico y sobre la evolución de las técnicas de cantería, llevado a cabo en cinco zonas graníticas de Ávila (Cardenosa, Mingorría, La Colilla, La Alamedilla del Berrocal y El Calvario). En todas ellas se ha constatado una alta concentración de canteras antiguas de los seis tipos graníticos que aparecen en los monumentos de la capital. Las canteras históricas consisten en pequeñas labores superficiales sobre el berrocal del zócalo granítico, sin que pasara la explotación del primer o segundo levante. Se ha observado una variación en el tamaño de las cuñeras utilizadas para el corte de la piedra, desde 30 cm, en las labores más antiguas del Castro de Las Cogotas, a unos 10 cm, fuera de esta zona. Además de la cercanía a la capital, se deducen los siguientes factores claves para justificar la utilización selectiva y variabilidad de algunas facies graníticas en los monumentos de Ávila: 1) abundancia de afloramientos; 2) relativa fácil extracción, propiciada tanto por el diaclasado, como por la frecuente orientación mineral; 3) coexistencia de subtipos graníticos a escala hectométrica o de afloramiento, y 4) contrastado cromatismo de los granitos alterados de La Colilla y El Calvario.

Palabras clave. Granito. Diaclasa. Cantera Histórica. Cuñera. Orientación Mineral.

INTRODUCCIÓN

Considerando el uso histórico de la piedra, en las capitales del SO de Castilla y León, como Zamora y Salamanca, hubo un suministro de múltiples tipos de piedra. Por un lado, la Cuenca del Duero aportaba un tipo de piedra blanda y de fácil elaboración, como la Arenisca de Villamayor, mientras que el Macizo Ibérico suministraba piedra dura, como granitos o vaugneritas. Además, había en juego una tercera formación geológica, que fue la de los granitos y conglomerados silicificados, como los de Sayago y Arapiles, respectivamente, que aportaban una piedra relativamente blanda, pero, en principio, más resistente que las areniscas de la Cuenca del Duero (López-Plaza et al., 2011 a y b; López-Moro et al., 2011). Por su ubicación, las ciudades de Zamora y Salamanca comparten o están próximas a diversas formaciones geológicas (Figura 1A): el Macizo Ibérico, la Cuenca del Duero y las zonas silicificadas de su interfase; es decir, son ciudades “geo-estratégicas” con aporte pétreo potencial de muy diversas características.

Cabe preguntarnos si Ávila también merece el calificativo de ciudad geo-estratégica. Por un lado, tiene a mano abundante material del Batolito del Sistema Central y, por otro lado, existe una zona de granito silicificado en los alrededores de la localidad de La Colilla, muy cercana a la ciudad (García Talegón, 1996; IGME, 2008; García-Talegón et al., 2016). Potencialmente, por tanto, puede recibir suministros pétreos diversos desde ambas formaciones geológicas.

Este carácter geo-estratégico de las tres capitales referidas de Castilla y León puede extenderse a Segovia por razones parecidas a las anteriores, pero contrasta enormemente con la ciudad no estratégica de Valladolid, cuya piedra utilizada casi en su totalidad fue la caliza miocénica de Campaspero y de otras localidades de la Cuenca del Duero, con una excepción muy significativa: la utilización sorprendente del granito de Cardeñosa en la Plaza Mayor durante el siglo xvi (Azofra Agustín y López-Plaza, 2021), lo que supuso un transporte de 135 km.

Ocurre que no siempre el aporte secular de piedra se produjo desde canteras cercanas, sino que el material granítico del Macizo Ibérico se extrajo desde lugares distantes a su destino, como fue el caso del granito de Los Santos, localidad situada a unos 50 km de Salamanca (López-Plaza et al., 2009). Casi siempre esta relativa larga distancia era una consecuencia de la demanda de piedra resistente. En ciudades o localidades de la Cuenca del Duero esta demanda era más bien una necesidad, sobre todo cuando las exigencias renacentistas implicaban nuevos conceptos de resistencia y durabilidad, como fue el caso de Valladolid.

Precisamente el reconocimiento de material granítico en los monumentos de la llanura terciaria

desde el borde del basamento hasta Valladolid suscitó una serie de interrogantes que fueron el germen del proyecto MONUGRANI (“El uso de la piedra granítica en el Patrimonio Monumental del área geo-estratégica suroccidental de Castilla y León”, con referencia PGC2018-098151-B-I00). Había que dar respuesta, en primer lugar, a la procedencia de la piedra granítica en un área desprovista de recursos pétreos. La historiografía preliminar y el reconocimiento del granito *de visu* en los monumentos condujo a proponer el área fuente de Cardeñosa. La elaboración de un mapa sobre la expansión del granito de Cardeñosa (*sensu lato*) (López-Plaza y Azofra Agustín, 2021) permitió evaluar el uso expansivo de este granito desde últimos del siglo xv hasta últimos del xix. Además, se distinguieron distintas facies graníticas que se habían utilizado de manera selectiva, reconociéndose una facies biotítica gruesa de tendencia porfídica (variedad “gris Cardeñosa”), utilizada como material granítico básico, junto a otras facies más selectas de tamaño de grano intermedio y fino (López-Plaza y Azofra, 2021).

Dada la diversidad granítica en los monumentos, tanto de la llanura terciaria, como de la propia ciudad de Ávila (Azofra Agustín et al., ponencia de la presente monografía) cabía suponer que las áreas de canteras de Cardeñosa contenían diversas facies graníticas. Era conveniente, por tanto, estudiar todas las facies graníticas implicadas en el área de Cardeñosa para corroborar la correspondencia de los tipos graníticos en cantera y monumento. Esta diversidad granítica venía, por otra parte, a confirmar el carácter geo-estratégico de la ciudad de Ávila, añadiendo opciones múltiples a la piedra blanda de La Colilla. Interesaba, por tanto, seleccionar y delimitar las áreas de cantería, cartografiando detalladamente en cada una de ellas los distintos tipos graníticos. Este objetivo cartográfico debería incluir una caracterización petrográfica y geoquímica de los tipos graníticos.

El segundo objetivo es eminentemente estructural. La diversidad textural de los tipos graníticos, esencialmente determinada por el tamaño de grano y las proporciones de las micas, hacía prever la aparición de distintas estructuras, tanto referidas a la escala como a su origen. Es especialmente importante para la cantería el estudio de las meso-estructuras, es decir, aquellas que son visibles a escala de afloramiento, distinguiendo las de origen magmático y sin-magmático (simultáneas con el magmatismo), como contactos intrusivos o diques, capas o “layers” y orientaciones preferentes de cristales, de aquellas otras sobreimpuestas, de origen tectónico o erosivo. El estudio del diaclasado (fracturas sin desplazamiento) es decisivo para determinar y prever la conformación del bloque extraíble ideal o blocometría, una determinación que en muchos casos ayuda a entender la adecuación de cada tipo granítico a los elementos arquitectónicos.

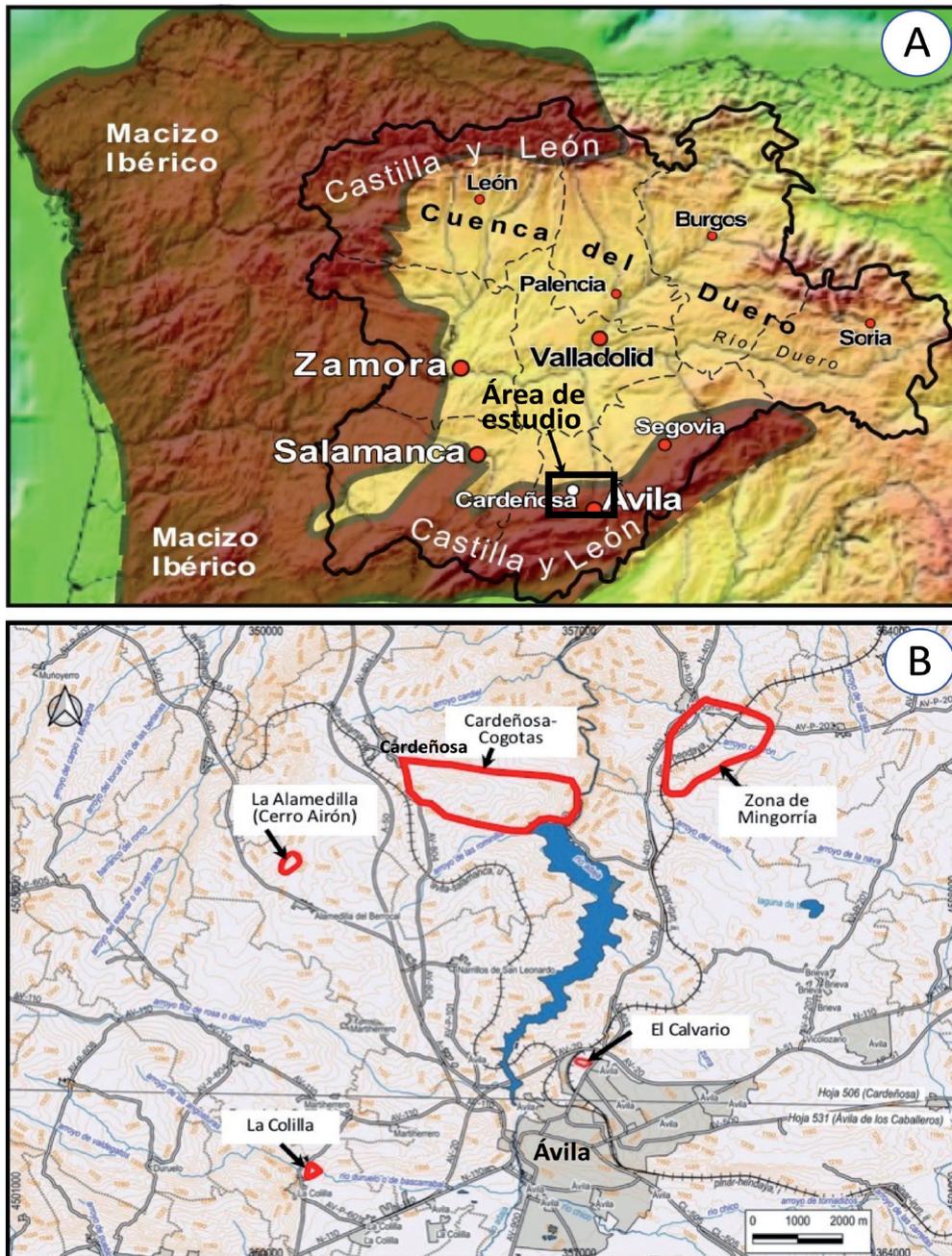


Figura 1. A) Ubicación geológica de las ciudades de Castilla y León. B) Mapa topográfico que incluye las zonas de estudio, curvas de nivel (en naranja), ríos, carreteras, vías férreas y los límites municipales (líneas punteadas grises). Base topográfica tomada de ©Junta de Castilla y León.

El tercer objetivo se centra en el estudio de las labores de cantería. Aunque la utilización de los granitos de Cardenosa se concentró especialmente desde finales del siglo XV hasta últimos del XIX, la presencia en el área de estudio de los castros vettones, como el de Las Cogotas, los restos romanos y la importante etapa constructiva medieval en la ciudad de Ávila, hace prever una posible evolución en el tiempo de las técnicas canteriles utilizadas.

Finalmente, dada la incidencia patrimonial del trabajo, junto a la escasez bibliográfica sobre el tema, había que establecer como cuarto objetivo unas herramientas divulgativas que fueran de utilidad para un desarrollo futuro, y que permitieran, por un lado, explicar algunos procesos del plutonismo varisco del área de Cardenosa-Ávila, y, por otro lado, conectar los aspectos geológicos de aplicación canteril con el uso de la piedra en los monumentos, sirviendo de puente entre la Geología y la Arquitectura e Historia del Arte.

Como antecedentes se ha contado, por un lado, con la información de los mapas geológicos 1:50.000 del IGME (1982, 2008), que aportan datos generales y una cartografía geológica general sobre las áreas de Cardeñosa y de Ávila. Por otro lado, se había realizado previamente un estudio para una empresa de explotación de granitos enfocado a la apertura de canteras de bloques dimensionados, aunque sin detallar el estudio petrológico (García de los Ríos, 1990).

ENCUADRE GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO

La zona de estudio está situada en el centro de la provincia de Ávila, en los términos municipales de Cardeñosa, Mingorría, Ávila y La Colilla (Figura 1B). La topografía es relativamente suave a excepción del extremo más oriental, donde el río Adaja, principal curso fluvial, discurre de S a N, bastante encajado; circunstancia que ha sido aprovechada para la construcción en la Edad Media de infinidad de molinos hidráulicos, así como de una presa construida en el siglo xx junto al risco de las Cogotas. La máxima cota de estos términos municipales se encuentra en el término de La Colilla (1.250 m) y las más bajas en el término de Mingorría, que pueden estar por debajo de los 900 m (Figura 1B).

Desde un punto de vista geológico, la zona de estudio se encuentra en el denominado Macizo Ibérico o Hespérico, que comprende fundamentalmente los terrenos del área paleozoica (Figuras 1A y 2), deformados durante la orogenia varisca, y los terrenos del Ediacárico, deformados previamente por la orogenia cadomiense, siendo la primera de mayor intensidad. La zona de estudio se adscribe al Dominio Occidental del Sistema Central, definido por Bellido et al. (1981), que se caracteriza por la presencia de series ordovícicas y preordovícicas, predominando estas últimas, con un grado metamórfico variable de alto a bajo, y una gran extensión de granitoides (Figura 2).

CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

Las cartografías geológicas disponibles de las zonas de estudio (Figura 2) diferencian dos facies graníticas en el área de Cardeñosa (granodiorita y granito aplítico) (IGME, 1982, 2008). Sin embargo, la documentación histórica (López Fernández, 2011) pone de relieve que, por ejemplo, la piedra granítica de Cardeñosa se ha usado en muchos monumentos de Ávila, apareciendo hasta cinco facies diferentes de granitos frescos, no solamente dos. Todo ello hace pensar que las cartografías previas no son del suficiente detalle para poder precisar la procedencia de la piedra de los monumentos de Ávila y alrededores, siendo necesario trabajar a una escala menor. Esta es una de las razones para cartografiar en detalle las zonas de Cardeñosa, Alamedilla del Berrocal y Mingorría (Figura 3), donde se ha constatado una importante actividad canteril, tanto moderna, como antigua en los granitos frescos.

La cartografía de la zona de Cardeñosa (Figura 3) evidencia la existencia de cinco facies graníticas que encontramos en los monumentos de Ávila: i) un granito medio-grueso \pm porfídico biotítico, ii) un granito medio biotítico de tendencia inequigranular, iii) un granito fino biotítico, iv) un granito fino noduloso, y v) un granito fino-medio de dos micas. Este mismo esquema de facies se ha encontrado en la Alamedilla del Berrocal (Figura 3), siendo muy similar en Mingorría (Figura 3), si bien en esta zona se ha localizado una facies de grano medio con un bandeo de biotita que no hemos localizado en otras áreas, aunque sí en algún monumento moderno de Ávila (Academia de Intendencia) (véase el capítulo sobre el uso del granito en la ciudad de Ávila por Azofra et al.). Algo similar ocurre con los granitos alterados tipo episienita, de los que no existe ninguna prueba cartográfica en las cartografías disponibles. Sin embargo, se deduce el uso de este tipo de rocas en algunos monumentos de Ávila (López Fernández, 2011; y capítulo de Azofra et al. en esta monografía).

De aquí, el interés de proponer en este trabajo las canteras históricas de El Calvario, próximas a la ciudad, como área fuente de la episienita utilizada, presentándose una cartografía de detalle (Figura 3).

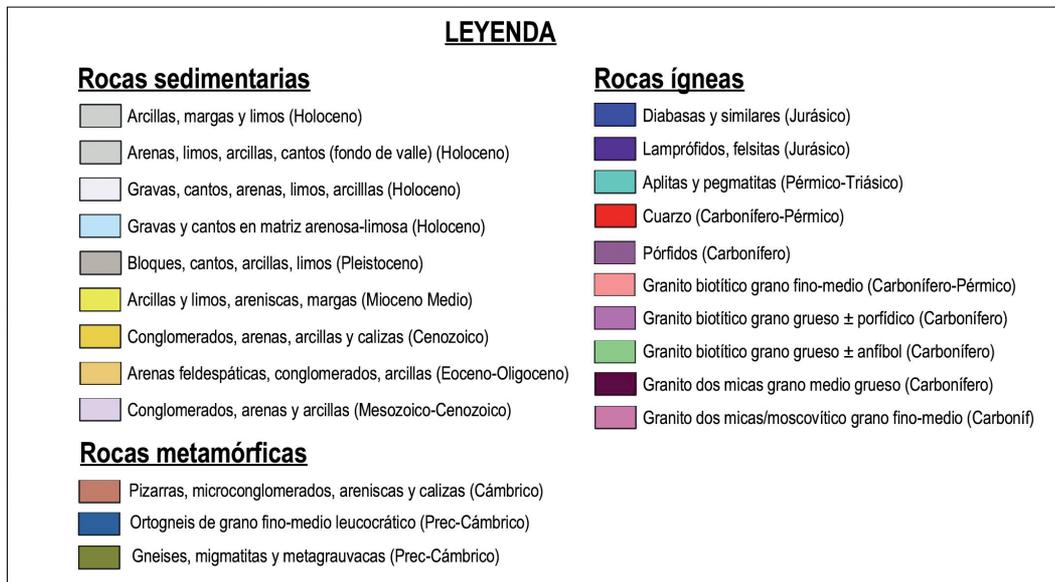
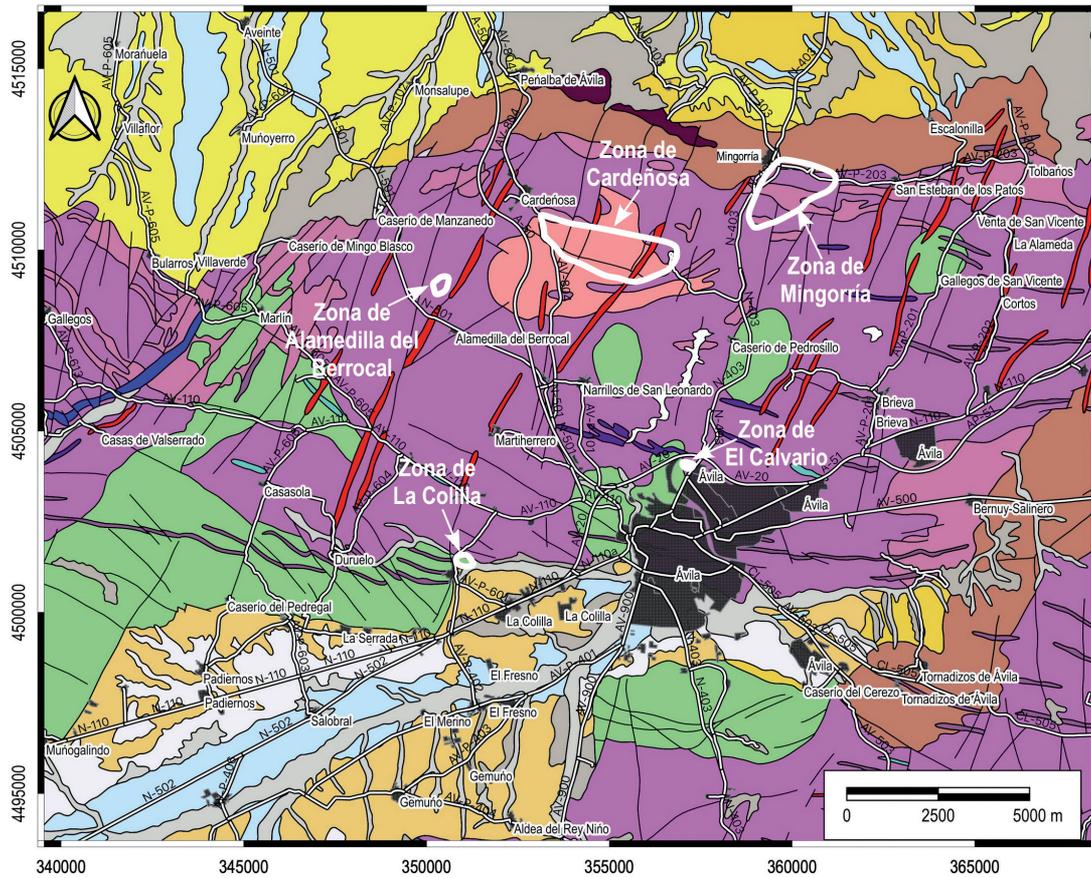


Figura 2. Mapa geológico con la localización de las zonas de estudio. La base geológica está tomada de ©Junta de Castilla y León, <https://datosabiertos.jcyl.es/web/jcyl/set/es/medio-ambiente/Geologico-cyl-tectonica/1284688160053>

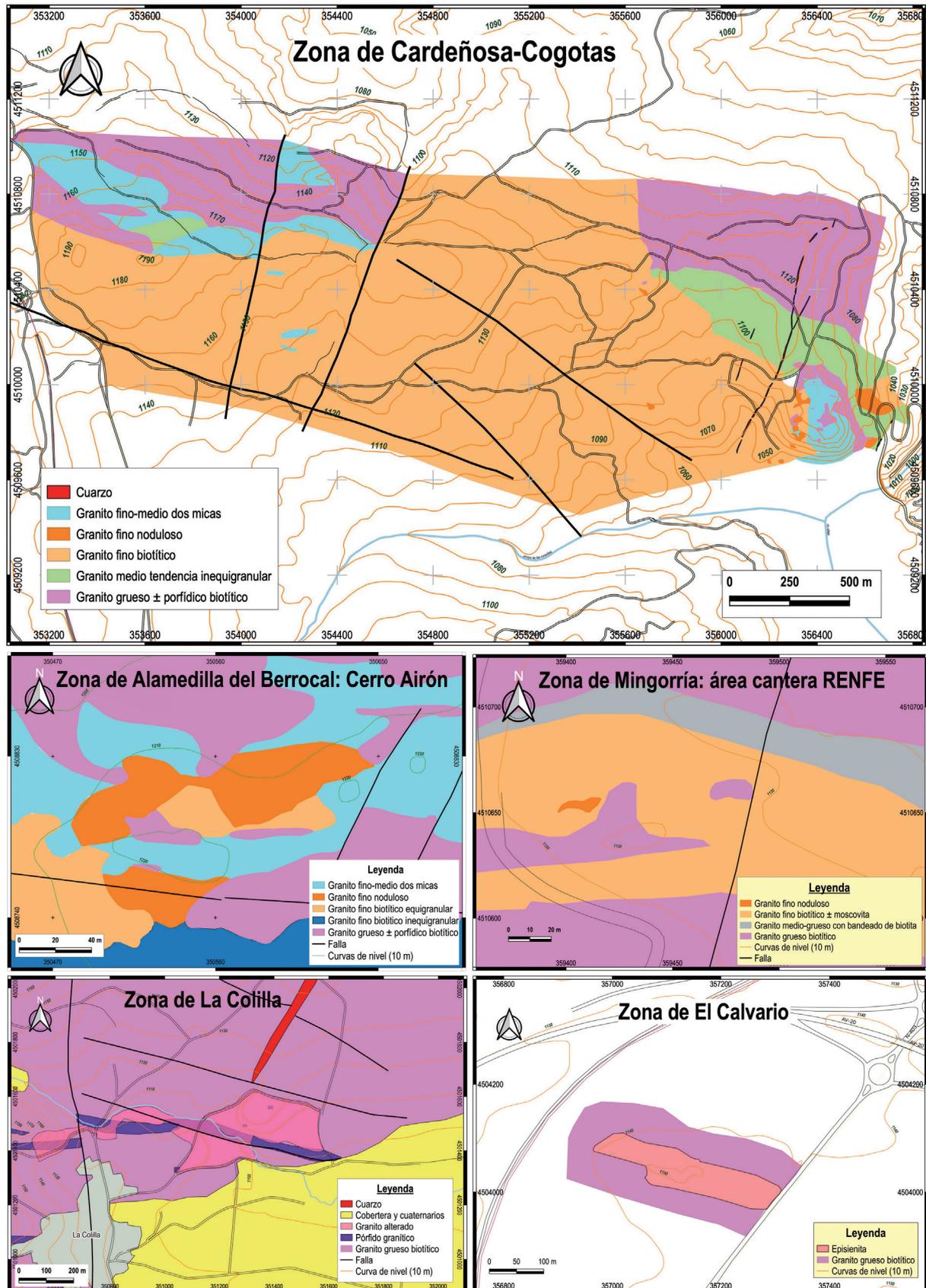


Figura 3. Cartografía geológica de detalle de las cinco zonas de estudio. Todas ellas son inéditas, a excepción de la zona de La Colilla, que se ha tomado de IGME (2008) y García Cortés (2019). Base topográfica tomada de ©Junta de Castilla y León.

PETROLOGÍA DE LOS GRANITOIDES FRESCOS Y ALTERADOS

Los granitoides frescos

El granito grueso (\pm porfídico) biotítico (Gris Cardenosa)

Se trata de un granito de color gris claro, aspecto granudo y tamaño de grano grueso-medio con tendencia seriada o porfídica (Figura 4a). Cuanto más grueso es el tamaño de grano más patente se hace un tono ligeramente azulado de este granito. Es una facies poco uniforme a escala de afloramiento, y presenta pequeños diques aplíticos y pegmatitas, bloques angulosos en zonas de "stopping", pegmatoides, enclaves (Figura 4a) y brechas magmáticas. Los enclaves son mayoritariamente microgranudos, y de composición de diorítica a granodiorítica, predominando los del tipo tonalítico. Son de forma elipsoidal aplana, color casi negro, en forma de masas uniformes, sin estructura interna, y con tamaños que van desde unos pocos centímetros (5-6) hasta 30 cm o más, siendo los más abundantes de un tamaño en torno a 8 cm.

Algunas texturas específicas son: perítica, en sineusis de plagioclasa (Figura 5A), mirmequítica y en atolón. Los minerales esenciales (>5% en volumen) de este granito son por orden de abundancia: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y biotita (Figura 6 y Tabla 1). Los minerales accesorios (< 5% en volumen) son clorita, moscovita, apatito, circón, ilmenita, allanita, cordierita y anfíbol. Estos dos últimos no siempre aparecen, dependiendo de las facies. Los minerales secundarios son clorita, titanita, saussurita, epidota, minerales del grupo de la arcilla y carbonatos.

El rango en la proporción de plagioclasa es 47,2-33,3 % (en vol.). Se presenta en cristales de hasta 7 mm, con un zonado composicional marcado, de An_{35} (andesina) en el núcleo a An_{23} (oligoclasa) en el borde. Es frecuente la existencia de núcleos y anillos reabsorbidos de contenido más cálcico, conformando una textura en atolón. Esta textura es especialmente evidente en la facies con anfíbol. La proporción de cuarzo es de 28,9 a 22,7 % (en vol.). Se presenta en cristales de hasta 1,5 cm y con signos de deformación dúctil-frágil. El feldespato potásico (21,6-11,7 % en vol.) es el tercer o cuarto mineral en abundancia, dependiendo de la facies. Puede haber cristales de hasta 1,2 cm repletos de inclusiones (Figura 5B). Es probablemente un feldespato estructuralmente ordenado y mayoritariamente del tipo microclina.

La biotita (17,5-15,2 % en vol.) puede ser la tercera o la cuarta fase mineral más abundante y puede haber cristales de hasta 2,8 mm. Con

frecuencia, aparece con múltiples inclusiones de apatito y circón. Presenta extinción ondulante y planos de clivaje combados por efecto deformativo. El anfíbol, si aparece, se presenta en forma de agregados, conformando lo que se denominan "clots", en asociación con biotita, y también en cristales prismáticos que pueden incluir biotita y plagioclasa. La moscovita es muy escasa (0,4 % en vol.) y en algunas muestras estudiadas no aparece.

La clorita (0,8 % en vol.) procede de la desestabilización de la biotita y puntualmente se encuentra asociada a plagioclasa cálcica alterada.

El granito medio biotítico de tendencia inequigranular

Es una facies parecida al granito grueso en cuanto a las características morfológicas, diaclasadado, y alteraciones, si bien el tamaño de los bolos es algo más pequeño. Las diferencias entre ambas facies se hacen más patentes en sus características relativas a la textura, composición, color, tamaño de grano y abundancia de gabarros (Figura 4b).

Así, su textura es ligeramente porfídica, con mesostasis de grano medio y color gris claro, es decir, sin el tono azulado del granito grueso. Además, los gabarros son mucho menos abundantes, lo que pudo haber favorecido su explotación. Cartográficamente, aparece asociado al granito grueso y al granito fino biotítico (Figura 3). El contacto con el granito grueso es siempre neto, y con frecuencia está asociado a pegmatitas, mientras que con el granito fino biotítico parece gradual.

Muestra las siguientes texturas específicas: perítica, mirmequítica, en sineusis y epitáctica (Figuras 5C y D). La textura inequigranular se manifiesta por los fenocristales de feldespato potásico que pueden llegar a varios centímetros. Los minerales esenciales por orden de abundancia son: cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico y biotita (Figura 6 y Tabla 1). Los minerales accesorios son: moscovita, clorita, cordierita, apatito, circón, ilmenita, titanita y monacita, pudiendo estar ausentes los dos últimos. Los minerales secundarios son clorita, rutilo, titanita, saussurita, minerales del grupo de la arcilla, pinnita y epidota.

La proporción de cuarzo es de 33,9 % a 32,8 % (en vol.). Se presenta en cristales anhedrales a subhedrales, de hasta 5,6 mm y con signos de deformación ductil-frágil. La plagioclasa (31,3-23,5 % en vol.) se presenta en cristales desde euhedrales a subhedrales, con un zonado composicional normal muy marcado (Figura 5C), desde An_{29} en el núcleo, claramente más rico en calcio que el borde, apareciendo cristales de algo más de 5 mm. El

feldespato potásico (28-20 % en vol.) se presenta en cristales desde anhedrales a subhedrales y raramente euhedrales, siendo estos últimos los de menor tamaño, que puede alcanzar 7,6 mm, y frecuentemente presentan zonación. La biotita (13,5-10,2 % en vol.) se presenta con frecuentes

inclusiones de apatito y circón creciendo en epitaxia (Figura 5D). La moscovita es un mineral accesorio (2,2-0,2 % en volumen) que puede aparecer en pequeños cristales asociada a biotita y plagioclasa, o bien, en grandes placas anhedrales o subhedrales de carácter poiquilítico.

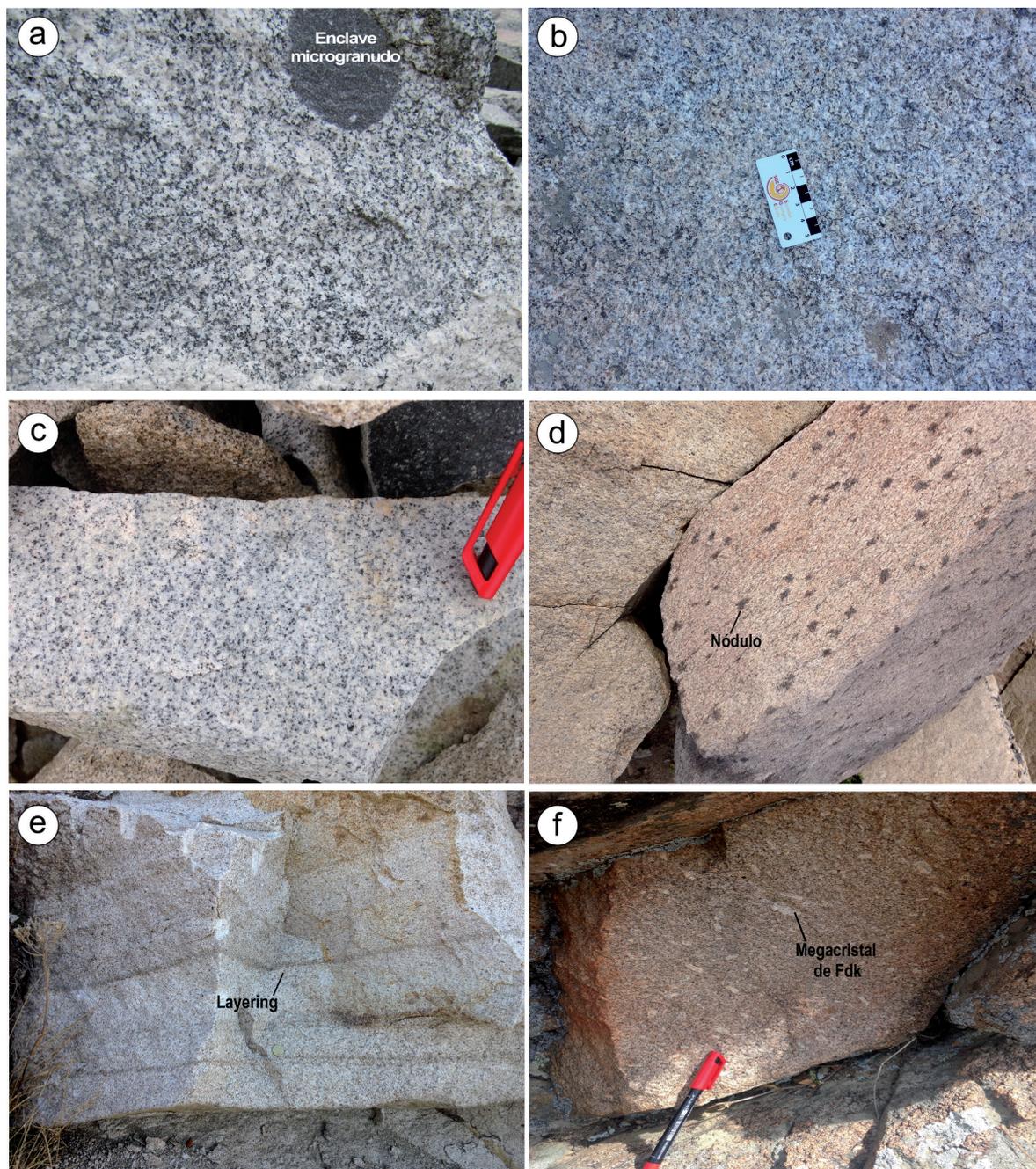


Figura 4. Aspecto mesoscópico de los granitos frescos de las zonas de estudio. A) Granito grueso \pm porfídico biotítico con un enclave microgranudo tonalítico (Mingorría). B) Granito medio inequigranular biotítico (Cogotas). C) Granito fino biotítico (Cogotas). D) Granito fino noduloso (Cogotas). E) Granito medio de dos micas con un bandeado (“layering”) rico en moscovita (Cardeñosa). F) Pórfido granítico de la parte central del dique (La Colilla).

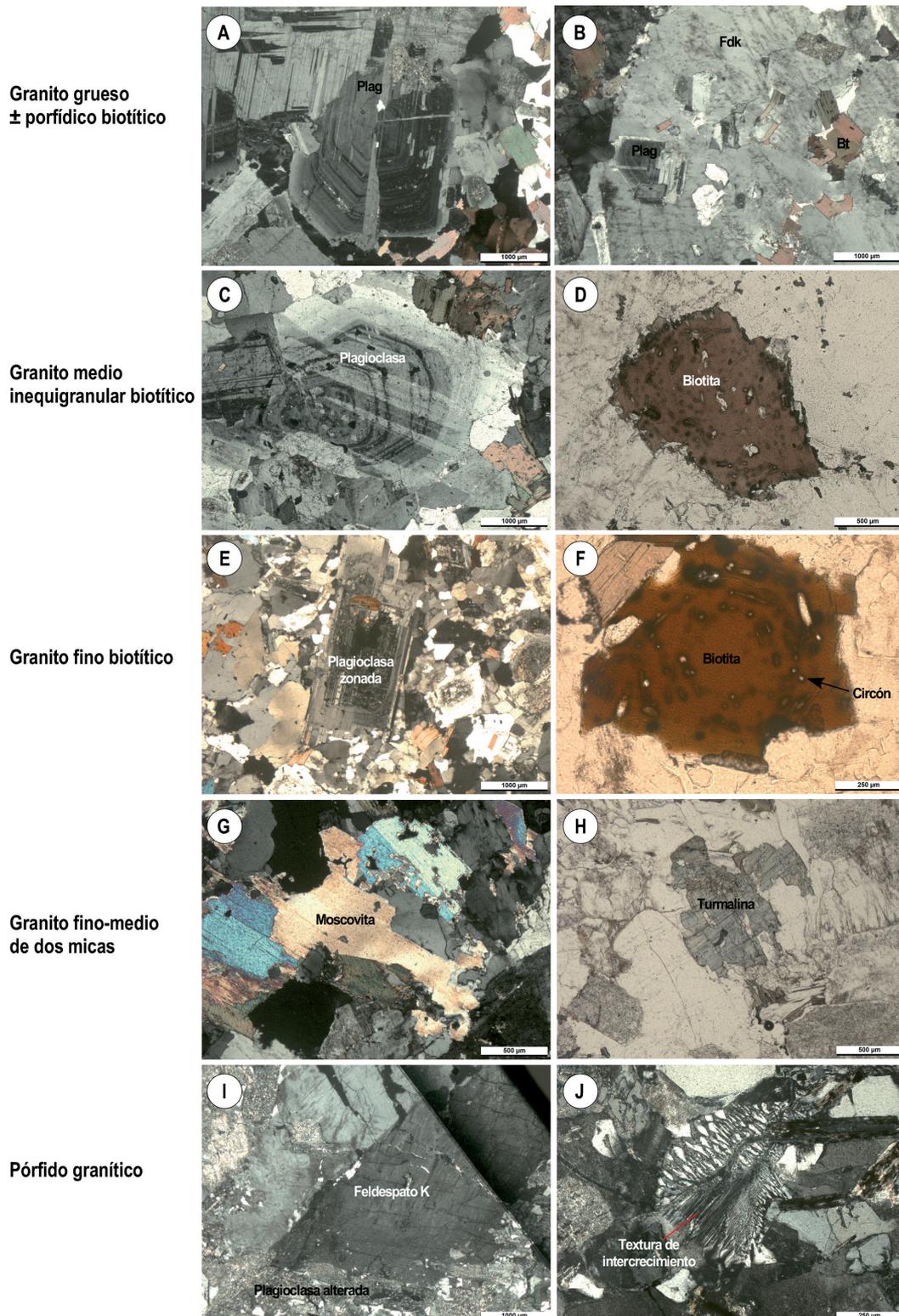


Figura 5. Petrografía de las rocas graníticas frescas. A y B) Plagioclasa zonada en sineusis (A) y megacrystal de feldespato potásico con múltiples inclusiones de plagioclasa y biotita (B) en el granito grueso \pm porfídico biotítico. Nícoles cruzados. C y D) Plagioclasa zonada (C) y cristal de biotita con microinclusiones (D) en el granito medio (de tendencia inequigranular) biotítico. Nícoles cruzados y sin cruzar, respectivamente. E y F) Cristal de plagioclasa zonada (E) y microinclusiones de circón creciendo en epitaxia en un cristal de biotita subidiomorfa (F). Nícoles cruzados y sin cruzar, respectivamente. G y H) Mica moscovita (G) y turmalina (H) en el granito fino-medio de dos micas. Nícoles cruzados y sin cruzar, respectivamente. I y J) Fenocrystal de feldespato potásico con escasas pertitas (I) y textura de intercrecimiento del tipo granofídica (J) en el pórfido granítico. Nícoles cruzados en ambos casos.

Tabla 1. Proporciones modales minerales de los granitos frescos y parámetros clasificatorios estimados a partir de computos modales.

Litología	<i>Granito fino biotítico</i>			<i>Gr. Nod.</i>	<i>Granito de dos micas</i>			<i>Granito medio inequ.</i>			<i>Granito grueso</i>		
	Prom	Max	Min		Prom	Max	Min	Prom	Max	Min	Prom	Max	Min
Plagioclasa (% vol.)	37,55	40,50	34,30	34,97	34,27	38,96	31,00	27,40	31,30	23,50	40,25	47,20	33,30
Feldespato potásico	27,25	29,90	23,40	22,88	21,13	24,70	18,38	23,95	28,00	19,90	16,65	21,60	11,70
Biotita	4,40	5,70	3,20	3,10	1,82	4,50	0,30	11,85	13,50	10,20	16,35	17,50	15,20
Cuarzo	28,83	32,50	26,10	35,66	34,27	38,60	29,47	33,35	33,90	32,80	25,80	28,90	22,70
Moscovita	1,15	1,90	0,30	2,20	6,64	7,89	5,20	1,20	2,20	0,20	0,20	0,40	0,00
Apatito	0,23	0,30	0,20	0,40	0,18	0,40	0,00	0,25	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00
Circón	0,08	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,30	0,00	0,10	0,10	0,10
Clorita	0,43	0,90	0,00	0,50	0,46	1,40	0,00	1,50	2,30	0,70	0,40	0,80	0,00
Allanita	0,05	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,00
Leucoxeno	0,05	0,20	0,00	0,30	0,04	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Turmalina	0,00	0,00	0,00	0,00	0,68	1,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cordierita	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	1,90	0,00	0,35	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Parámetros clasificatorios													
Q (cuarzo % en vol.)	28,83	32,50	26,10	35,66	34,27	38,60	29,47	33,35	33,90	32,80	25,80	28,90	22,70
A (Feldespato alcalino % en vol.)	27,25	29,90	23,40	22,88	21,13	24,70	18,38	23,95	28,00	19,90	16,65	21,60	11,70
P (Plagioclasa + escapolitas % en vol.)	37,55	40,50	34,30	34,97	34,27	38,96	31,00	27,40	31,30	23,50	40,25	47,20	33,30
M (Minerales máficos, % en vol.)	6,38	7,50	5,40	6,49	10,33	16,48	7,50	15,30	16,00	14,60	17,30	18,40	16,20
M' (M-(moscovita, apatito, carbonatos))	5,00	6,00	4,00	3,90	3,52	8,49	1,50	13,85	14,20	13,50	17,10	18,40	15,80
Diagrama QAP													
Q	30,79	34,72	27,83	38,14	38,25	42,60	32,81	39,37	39,70	39,05	31,15	34,49	27,82
A	29,09	31,61	25,30	24,47	23,54	26,70	21,98	28,24	32,79	23,69	20,06	25,78	14,34
P	40,12	43,78	36,65	37,39	38,21	43,38	34,22	32,39	37,26	27,52	48,79	57,84	39,74

Gr. Nod.: granito noduloso; Granito medio inequ.: granito medio inequigranular; Prom: valor promedio; Max: valor máximo; Min: valor mínimo.

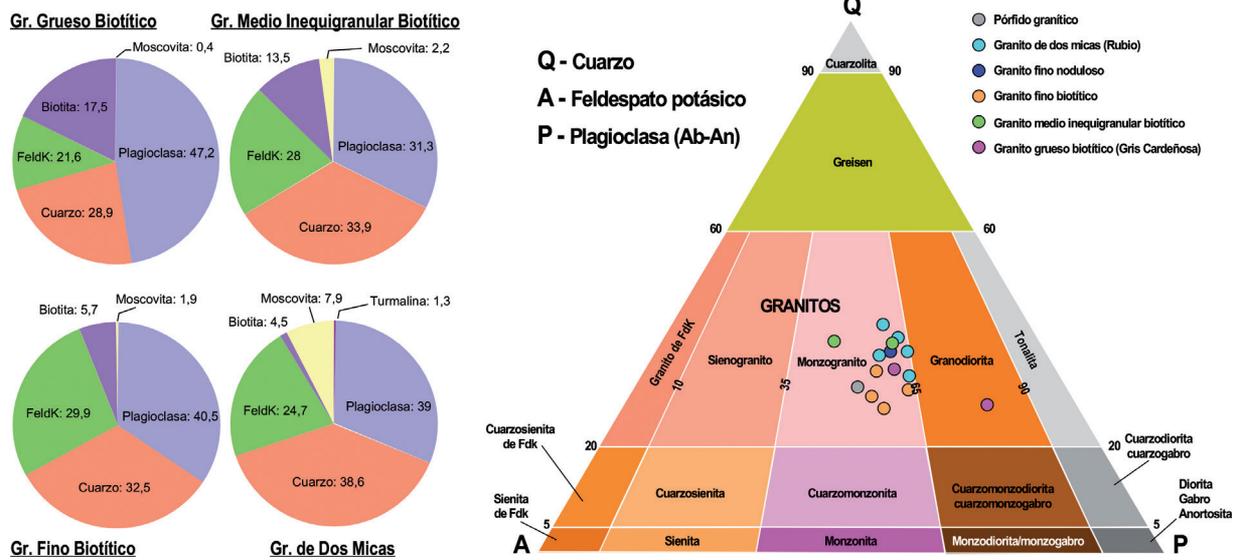


Figura 6. Proporciones minerales de los granitos frescos (diagramas circulares reflejando el valor máximo) y su clasificación modal en el triángulo QAP.

El granito fino biotítico

Se trata de un granito de grano fino, de color grisáceo, cuando está fresco, y ocre, cuando se presenta meteorizado (Figura 4c). Se presenta siempre muy fracturado, con espaciados entre las diaclasas del orden de varios decímetros, lo que unido a su tamaño de grano fino origina una morfología escalonada en graderío de bloques paralelepípedicos de pequeñas dimensiones. Al igual que ocurre con otras facies graníticas del área, dentro del dominio del granito biotítico de grano fino existen diques del granito de dos micas, que representan muy probablemente la facies última en emplazarse. A tenor de distintas características mesoscópicas y relaciones espaciales se deduce que el granito monzonítico grueso es anterior al biotítico de grano fino. Entre ellas cabe mencionar: i) diques del granito biotítico de grano fino en el monzonítico grueso, desarrollando el primero un bandeo de biotita de flujo, ii) algún enclave del granito monzonítico grueso, y iii) en la presencia de procesos de “stoping”, con bloques angulosos del granito monzonítico grueso, envueltos por granito fino biotítico. Es de reseñar su gran homogeneidad textural a pequeña y gran escala.

Petrográficamente, es una roca equigranular, de grano fino, pertítica, en sineusis, en ocasiones epitáctica y mirmequítica. Los minerales esenciales son por orden de abundancia: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y en algunas ocasiones biotita (Figura 6 y Tabla 1). Los minerales

accesorios son: biotita, moscovita, apatito, circón, ilmenita, monacita, rutilo, ± cordierita, ± allanita, ± fluorita y ± titanita. Los minerales secundarios son clorita, pinnita, mica blanca, epidota/clinozoisita, saussurita, rutilo, carbonatos, minerales del grupo de la arcilla. La plagioclasa (34,3-40,5% en vol.) se presenta en cristales con un zonado composicional marcado (Figura 5E), a veces en agregados de cristales fuertemente zonados, conformando una textura en sineusis. El cuarzo (26,1-32,5 % en vol.) es anhedral a subhedral, de hasta 2 mm y con signos de deformación dúctil-frágil. El feldespato potásico (23,4-28,9 % en vol.) es casi exclusivamente del tipo microclina. La biotita (4,0-5,7 % en vol.) se dispone generalmente en cristales subhedrales, en torno a 1 mm y por tanto de tamaño menor que los minerales félsicos. La biotita se presenta con frecuencia repleta de inclusiones de circón, apatito y otros minerales radiactivos, a veces en epitaxia (Figura 5F). La moscovita es escasa (0,3-1,9 % en vol.). Puede aparecer escasa cordierita, la cual siempre está completamente alterada a clorita y pinnita.

El granito fino noduloso

Su apariencia es similar a la del granito fino biotítico y consideramos al granito fino noduloso como una subfacies del fino biotítico. El punto diferencial exclusivo del noduloso lo constituyen unos agregados milimétricos, que pueden llegar hasta 2 cm, más o menos circulares, de minerales

ferromagnesianos (Figura 4d). Estos agregados pueden llegar a ser abundantes en ciertas zonas, e.g. Cerro de Las Cogotas y Cerro Airón, donde alcanzan un contenido de hasta el 9,6% en volumen. Los nódulos pueden estar orientados sinmagmáticamente y con frecuencia manifiestan una tendencia a un alineamiento nortado (Figura 4d). Es muy característica en esta facies granítica la existencia de cavidades mirolíticas ricas en turmalina a distintos niveles, estructuras que son típicas de condiciones someras de emplazamiento, lo que favoreció la exsolución de la fase volátil representada por la turmalina. Las relaciones estructurales indican que se trata de una facies claramente anterior al granito fino-medio de dos micas, ya que este último desarrolla capas marginales o “layers” de flujo cuando se encaja en el granito noduloso.

Al microscopio, muestra una textura inequigranular, predominantemente de grano fino, nodulosa, pertítica y mirmequítica. Los minerales esenciales son por orden de abundancia: cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico (Tabla 1). Los minerales accesorios son biotita, cordierita pinnitizada, moscovita, apatito, circón y posible monacita. Los minerales secundarios son clorita, pinnita, ilmenita y saussurita. Es una facies que no presenta evidencias de cataclasis. Los nódulos fémcicos centimétricos se componen de clorita, cordierita pinnitizada, cuarzo y en menor proporción de feldespatos. La mesostasis está constituida por cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, mica blanca y productos de alteración de la biotita.

El cuarzo (36 % en vol.) presenta signos de deformación dúctil-frágil. La plagioclasa (35 % en vol.) se encuentra en cristales desde euhedrales a subhedrales, con un zonado composicional marcado, con un núcleo de oligoclasa (An_{20}) y bordes de albita (An_0). El feldespato potásico (23 % en vol.) es casi exclusivamente del tipo microclina, al presentar la macla del enrejado. La biotita (3,1 % en vol.) se manifiesta generalmente en cristales subhedrales, con abundantes inclusiones de circón, apatito y otros minerales radiactivos. La moscovita (1,9 % en vol.) es un mineral tardío en la secuencia de cristalización. La cordierita aparece completamente alterada a clorita y pinnita.

El granito fino-medio de dos micas

Intruye en el resto de las facies graníticas, con contactos netos y dirección predominante próxima a E-O; si bien, la mayoría de las veces los cuerpos intrusivos se presentan en láminas con un buzamiento entre 25 y 30°. Su berrocal consiste en bolos pequeños de formas tendentes a

paralelepípedicas, como consecuencia del marcado diaclasado y del tamaño de grano fino-medio. Su aspecto externo es el de un granito leucocrático (Figura 4e), de tono amarillento (por lo que se le conoce como “Rubio”), a consecuencia de la homogénea alteración superficial que penetra al menos 2 m y que oxida en parte los minerales fémcicos a la vez que altera los feldespatos, especialmente el feldespato potásico. De unas zonas a otras y a escala de algunas decenas de metros la facies presenta variaciones en el tamaño de grano y en su proporción de micas, siendo variable también la aparición de pequeños enclaves y bandeados o schlierens. El bandeo suele estar presente en zonas paralelas a los contactos (“marginal flow layering”) (Figura 4e). Los enclaves son escasos, de reducidas dimensiones y composicionalmente se componen de abundante biotita o agregados con cuarzo, plagioclasa, cordierita y biotita. En ocasiones presentan cavidades mirolíticas, constituidas por grandes cristales de feldespato potásico y/o cuarzo. Estas estructuras indican condiciones de emplazamiento bastante someras. Parece el último granito en la secuencia de cristalización, aunque no muy distanciado en el tiempo del noduloso, ya que a veces presentan criterios de una cierta simultaneidad.

Petrográficamente, es una roca con textura equigranular, hipidiomórfica, de grano medio a fino. Los minerales esenciales son por orden de abundancia: plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y moscovita (Figura 6 y Tabla 1). Los minerales accesorios son biotita, turmalina, apatito, cordierita, circón y titanita. Los minerales secundarios son clorita, mica blanca, epidota, rutilo y opacos. La plagioclasa se encuentra en un porcentaje entre el 39% y el 31% en volumen y su contenido en la molécula de anortita (i.e., Ca) está en torno al 10% (i.e., variedad albita). Los cristales pueden llegar a los 3,6 mm. El cuarzo tiene una abundancia entre el 38,6% y el 29,5% en volumen, es intersticial y se presenta en cristales de hasta 4 mm y con signos de deformación dúctil-frágil. El feldespato potásico (24,7-21% en volumen) se presenta en cristales con la macla de la microclina, lo que indica que son feldespatos tipo microclina y que su estado de ordenamiento es máximo. En cuanto a las micas dioctaédricas ricas en Al, se encuentra la especie tipo moscovita (Figura 5G), mineral esencial que es más abundante que la mica tipo biotita. Su abundancia está entre el 7,5% y el 5,6% en volumen y puede llegar a un tamaño de 2 mm. Se trata de una roca con pocos minerales ferromagnesianos. Los más relevantes son la biotita y la turmalina. La biotita (1,2-0,3% en vol.), se encuentra en cristales en torno a 1 mm, que pueden llegar a 2 mm; frecuentemente han sido

transformados parcialmente a otro filosilicato, en concreto, a clorita. La turmalina (1,3-1,2% en volumen) se encuentra en cristales de subhedrales a anhedrales (Figura 5H) de hasta 1,2 mm, pero también en fracturas del feldespato potásico. Generalmente aparece en cristales aislados (Figura 3.2e), y a veces asociados a cordierita totalmente transformada, nucleándose la turmalina sobrepuesta y sin una orientación predeterminada. El apatito es un accesorio que puede llegar a cristales de cerca de 500 micras con multitud de microinclusiones.

El pórfido granítico

En el área de La Colilla, estos cuerpos afloran en forma de diques de 1 a 30 m de espesor y de dirección mayoritariamente E-O, buzando entre 70° y 80° al N. La roca presenta una textura porfídica, con una matriz grisácea sobre la que destacan fenocristales de feldespato (Figura 4f), cuarzo y biotita. Hacia los bordes del dique se observan claramente los bordes enfriados ("chilled margins") afaníticos de unos 20 cm de espesor. Estos bordes tienen una proporción de fenocristales mucho menor que en las partes centrales, predominando los de cuarzo, en los que a veces se marca una foliación de flujo.

La textura es holocristalina, fanerítica (o frecuentemente afanítica en los bordes), inequigranular, porfídica, de grano medio, granofírica, pertítica, mirmequítica y en abanico (por la moscovita).

Como componentes esenciales contiene minerales del grupo de la arcilla-sericita, cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, clorita y moscovita. Como minerales accesorios contiene biotita, cordierita, leucoxeno, apatito, circón y hematites; siendo los secundarios minerales del grupo de la arcilla-sericita, clorita, moscovita y leucoxeno.

El cuarzo se presenta en una proporción entre el 27 y 30 % en volumen, en cristales de anhedrales a subhedrales, de hasta 3,6 mm y con bordes de corrosión bien definidos, que evidencian el carácter subvolcánico de la roca original. El cuarzo también se encuentra intercrecido con el feldespato potásico, conformando la textura granofírica, que es bastante común (Figura 5J). La abundancia de plagioclasa (31-10 % en volumen) varía dependiendo del grado de alteración. Suele presentarse en cristales desde euhedrales a subhedrales y muy transformada a minerales del grupo de la arcilla, sericita y posiblemente clorita. Se presenta con el maclado de la albita. Puede haber cristales de hasta 3,2 mm. El feldespato potásico (29-8% en volumen) también varía su proporción en función del grado de alteración. Los bordes en muchas ocasiones presentan la textura

granofírica (Figura 5J). Los fenocristales (Figura 5I), que alcanzan un tamaño de hasta 1 cm, presentan pertitas escasamente desarrolladas, quizás por el enfriamiento rápido. La asociación biotita-clorita (6-7% en vol.) aparece en cristales entre 680 y 240 micras, incluidos en cuarzo o feldespato potásico. La moscovita (5-6 % en vol.) se encuentra en agregados, en forma de abanico y en pequeños cristales como producto de alteración de la plagioclasa. La cordierita (0,9-1,7 % en vol.) se presenta siempre transformada a clorita en forma de agregados que pseudomorfizan al cristal primario. El apatito (0,1-0,2 % en vol.) aparece en cristales prismáticos y formas subredondeadas.

Clasificación petrográfica de los granitoides frescos

Los contajes de puntos realizados en las muestras de granitos frescos permiten precisar que se trata de rocas mayoritariamente leucocráticas, ya que su índice de color (M') suele ser menor del 35% (Tabla 1). Obviamente, la ausencia de feldespato y la presencia de cuarzo indica que son rocas saturadas en cuarzo. El grupo litológico con mayor índice de color (M') es el granito grueso biotítico (frecuencia de 17%), seguido del granito medio inequigranular biotítico (frecuencia de 14%), pórfido granítico (16%), fino biotítico (5%), fino noduloso (4%) y el granito de dos micas ("rubio") (3%) (Tabla 1).

Los contenidos en plagioclasa son similares en todos los tipos graníticos (Tabla 1), mostrando el granito grueso biotítico el máximo valor (47,2%) y el granito medio inequigranular biotítico con el menor (31,3%). En cuanto al cuarzo, el granito grueso biotítico es el que presenta los contenidos más bajos (valor máximo de 28,9%), mientras que el granito de dos micas los mayores (valor máximo de 38,6%). El feldespato potásico muestra la mayor abundancia en el granito fino biotítico y el pórfido granítico, mientras que el granito grueso biotítico es el de menor proporción modal, con un valor máximo de 21,6%. Esta última facies granítica es la que contiene los mayores valores en biotita (17,5%), seguido del granito medio inequigranular biotítico (13,5%), granito fino biotítico (5,7%) y valores por debajo del 5% en el granito fino noduloso y en el granito de dos micas. El caso contrario ocurre con la mica moscovita, con el máximo valor en el granito de dos micas (7,9%) y el menor contenido en el granito grueso "gris Cardenosa" (valor máximo de 0,4%) (Figura 6).

Cabe significar que solamente se ha detectado turmalina en el granito de dos micas, pero con contenidos siempre inferiores al 1,5% (Figura 6),

aparte de la turmalina accidental de las cavidades miarolíticas del fino biotítico noduloso.

Los contenidos en cuarzo, feldespato alcalino y plagioclasa proyectados en el diagrama triangular QAP de Streckeisen (Figura 6) ponen de manifiesto que la mayoría de los granitos del área Cardenosa-Mingorría-Ávila son monzogranitos, excepto una muestra del granito grueso biotítico tomada en Mingorría, que se proyecta en el campo de las granodioritas.

Los granitos alterados

Los granitos silicificados

Básicamente, el proceso de silicificación implica una transformación de la roca granítica a

minerales arcillosos y ópalo. El granito (o granodiorita) grueso biotítico del área de La Colilla, al igual que los pórfidos asociados, han experimentado este proceso de alteración (García-Talegón et al., 2016). Atendiendo a su color, hay tres subtipos de granitos silicificados: ocre (Figuras 7a y c), blanco y rojo; estos dos últimos combinados son conocidos como roca sangrante (Figura 7b). El subtipo ocre es el menos alterado y se presenta en las zonas profundas del perfil de alteración (García-Talegón et al., 2016). En este subtipo la textura del protolito se mantiene, reconociéndose a veces la textura residual del pórfido granítico.

En el proceso de silicificación que da lugar al subtipo ocre se transforman los minerales más susceptibles de ser alterados, como las micas y feldespatos, y se neoforman illita/esmectita y oxi-hidróxidos de hierro (goethita) (Figura 8).

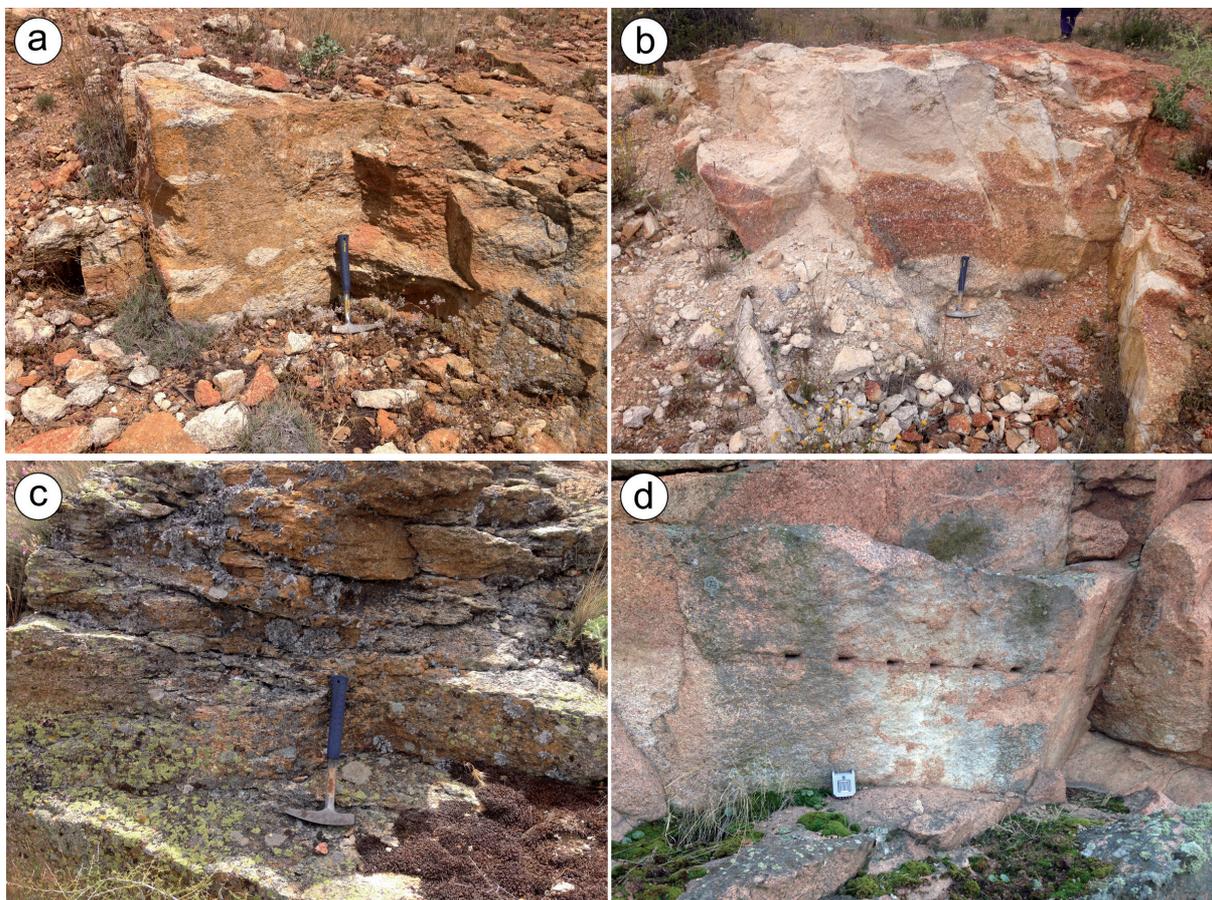


Figura 7. Aspecto mesoscópico de las rocas graníticas alteradas. a) Granito ocre silicificado de La Colilla. b) Granito silicificado con abundantes oxi-hidróxidos de hierro conocido como Piedra Sangrante de La Colilla. c) Abundante fisuración superficial en el granito ocre del paraje La Cantera, en La Colilla. d) Episenita de El Calvario, con una hilera subhorizontal de cuñeras para dar el levante.

En los granitos blancos y rojos el proceso de alteración fue sustancialmente más intenso y se localizan en las partes altas del perfil de alteración. Es muy típico en estos dos subtipos el desarrollo de procesos de caolinización, la formación de ópalo CT y una redistribución de óxidos de hierro en condiciones hidromórficas, que se concentran en el granito rojo (García-Talegón et al., 2016) (Figura 8). Los granitos silicificados son rocas de tamaño de grano fino-medio, y en ocasiones se observan estructuras bandeadas con un mayor grado de alteración y deformación. También se ha constatado la existencia de filones de cuarzo de espesor milimétrico, que por un proceso de erosión diferencial producen un modelado de la roca característico en forma

de acanaladuras, totalmente desvinculadas de un proceso extractivo de la piedra. La fisuración es otra característica de estas rocas alteradas, especialmente en las partes topográficamente elevadas (Figura 7c), donde presumiblemente el proceso de alteración fue más importante y produjo una mayor transformación del material granítico. Los planos de diaclasa en estas rocas son a veces poco visibles, quizás por los procesos de alteración, que de alguna manera sellan estos planos, y también por procesos de recristalización dinámica asociados a fracturas, que propician una pérdida de las estructuras primarias, una disminución del tamaño de grano y una importante circulación de fluidos que rellenan oquedades.

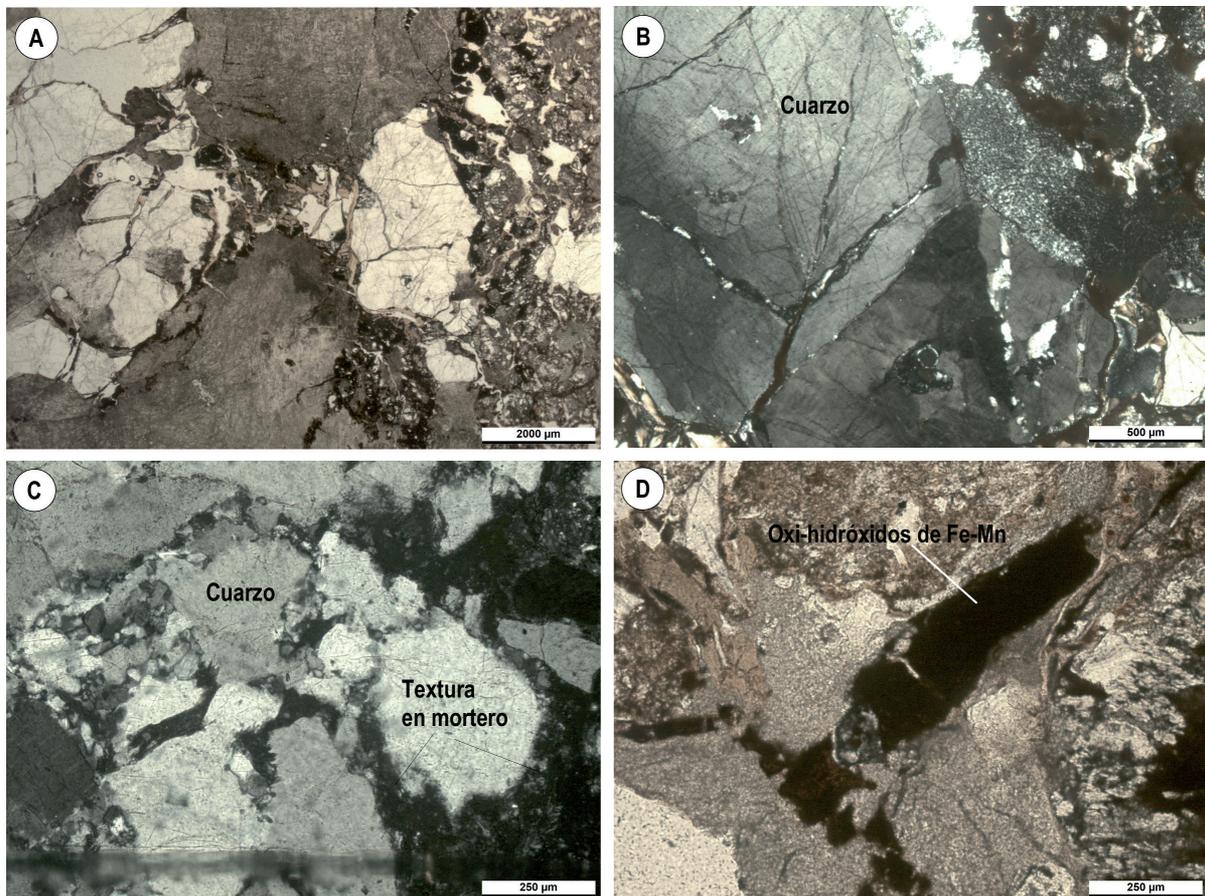


Figura 8. Petrografía de los granitos silicificados de La Colilla. A) Aspecto general, con cuarzo con fracturas rellenas de cutanes de material arcilloso, y grandes pseudomorfos de feldespatos, actualmente caolinizados (masa gris oscura). Nícoles sin cruzar. B) Cuarzo intensamente fracturado y con extinción ondulante. Nícoles cruzados. C) Cuarzo recristalizado dinámicamente, desarrollando una textura en mortero. Nícoles cruzados. D) Detalle de los oxi-hidróxidos de Fe. Nícoles sin cruzar.

Petrográficamente, son rocas con una textura inequigranular, de grano medio, cataclástica y en mortero (Figuras 7a, b y c). Como minerales esenciales se encuentran la sílice microcristalina o amorfa, minerales del grupo de la arcilla, cuarzo y oxi-hidróxidos de hierro (Figura 8D). Como minerales accesorios presenta mica blanca y feldespato potásico. Al microscopio petrográfico se constata un intenso proceso deformativo en condiciones frágiles, con el desarrollo de porfidoclastos de cuarzo fracturados y desplazados (Figura 8A y B), así como de texturas en mortero en clastos de cuarzo, y recristalizaciones de este mineral en condiciones dinámicas (Figura 8B y C). Esta cataclasis, sin duda, ha favorecido la percolación de fluidos que han hecho alterar las micas primarias, de las que apenas quedan restos, y a la masa feldespática, de la que se conservan mayoritariamente sus productos de alteración: arcillas o arcillas-sílice microcristalina (Figura 8A). Cuando la cataclasis es mayor el proceso de alteración es más importante. Las abundantes fracturas han sido rellenadas por material arcilloso, sílice microcristalina y oxi-hidróxidos de Fe. No obstante, en ocasiones no existe relleno, por lo que hay que suponer que ha habido una pérdida de materia en estas rocas, lo que se traduce en una mayor porosidad que la de los granitoides originales. El cuarzo (14,3-12,2 % en vol.) es el único mineral del granito original que ha aguantado el proceso de alteración. Por su parte, la asociación arcilla-sílice microcristalina (55-42 % en vol.) es mayoritaria en estas rocas. En unas muestras es más abundante la sílice microcristalina que la fracción arcillosa y en otras, al contrario. La arcilla sin sílice microcristalina se encuentra en los cutanes (29,8-23,1 % en vol.; Fig. 8A) y en alguna masa bastante limpia que parece pseudomorfizar a algún feldespato (Figura 8A). Los oxi-hidróxidos de Fe pueden ser abundantes (11,7-6,1 % en vol.) y rellenan grietas, huecos y forman parte también de la masa de sílice microcristalina-arcilla. La plagioclasa ha desaparecido por completo. Alguna mica blanca se observa como producto de alteración, no como cristal primario. En cuanto al feldespato potásico, la proporción que ha resistido el proceso de alteración es nula o muy pequeña, y está en torno al 2% en volumen en el mejor de los casos. Pueden quedar minúsculos restos de biotita cloritizada.

Episienitas

En el área de El Calvario se observa una roca rojiza-rosácea (Figura 7d) formada también por un proceso de alteración muy importante, pero desvinculado genéticamente del de los granitos silicificados de La Colilla. En el caso de El

Calvario la roca transformada se conoce con el nombre de episienita. La episienitización consiste en la transformación metasomática de un protolito, generalmente granítico, a través del cual han circulado fluidos que llegan a descalcificar la plagioclasa y disolver el cuarzo, dando lugar a una roca muy oquerosa. En el caso de El Calvario, el protolito es el granito que bordea a la episienita, i.e. la granodiorita-granito grueso biotítico, siendo necesaria una entrada de fluidos relacionada con los procesos de deformación. Es aceptado que para producirse la lixiviación del cuarzo original de un granito por fluidos es necesario que estos alcancen las condiciones de presión y temperatura propias del campo de solubilidad retrógrada de la sílice. Esta idea ha sido confirmada mediante estudios microtermométricos en episienitas cercanas a las de El Calvario, donde la fase fluida asociada a la albitización, que acompaña a la lixiviación de cuarzo, estuvo a una presión muy baja (50-60 MPa), es decir condiciones hidrostáticas o cuasi-hidrostáticas, y un rango de temperatura de 300-400°C (López-Moro et al., 2013), es decir, condiciones típicas del campo de solubilidad retrógrada de la sílice. Estos resultados ponen también de manifiesto que la temperatura de la fase fluida para formar las episienitas es sustancialmente mayor que la que se puede alcanzar en un manto de alteración como el que originó los granitos silicificados de La Colilla. Asimismo, la edad que se estima para la formación de las episienitas está en el rango de 275-304 Ma (Carbonífero-Pérmico; Caballero et al., 1993; López-Moro et al., 2013; López-Moro et al., 2019), mientras que el proceso de silicificación de La Colilla se adscribe al Mesozoico (García-Talegón et al., 2016).

Las episienitas de El Calvario tienden a ocupar la parte superior del cerro y el granito fresco los flancos (Figura 3). Al igual que sucede en otras episienitas, e.g. en La Peña (Salamanca), la episienita de El Calvario origina un relieve positivo, a pesar de la fuerte alteración y haber liberado un mineral de fuerte dureza y resistencia mecánica como el cuarzo. Los procesos posteriores de silicificación y la existencia de pegmatitas en la parte alta a modo de coraza ha sido propuesto como causa para explicar la generación de estos relieves (López Moro y López Plaza, 2005), lo que podría ser también aplicable a la episienita de El Calvario.

Las rocas episienitas de El Calvario presentan tonalidades rojizas a rosáceas, dependiendo del grado de transformación de la roca. Es más rojiza cuando mayor es la cantidad de óxidos de hierro (hematites), que generalmente en las episienitas aparecen en forma de microinclusiones dentro del feldespato potásico (López-Moro et al., 2013).

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LOS GRANITOIDES FRESCOS

Se han realizado 13 análisis químicos completos de elementos mayores, menores y trazas, correspondientes a 4 muestras de granitos finos biotíticos; 1 de granito fino de dos micas leucocrático; 4 de granitos finos/medios de dos micas; 1 de granito fino biotítico de tendencia inequigranular y 3 de granitos gruesos (\pm porfídicos) biotíticos. Los resultados se presentan en la Tabla 2. Los análisis fueron realizados en los laboratorios ACTLABS de Canadá. Los elementos mayores y menores se analizaron por espectroscopia de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES), mientras que los elementos trazas y tierras raras por espectrometría de masas con fuente de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS).

A partir de los elementos mayores y menores analizados se constata que todos los granitos son peraluminicos, con un índice ACNK ($\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ en proporciones moleculares) > 1 . El grupo de los granitos finos/medios de dos micas es el que tiene mayores valores de peraluminismo (ACNK: 1,17-1,22) debido a la mayor abundancia de micas, especialmente de moscovita. En el otro extremo están los granitos biotíticos equigranulares e inequigranulares, cuyos índices bajan hasta ACNK=1,07 y 1,00, respectivamente.

Los resultados sobre elementos mayores y menores permiten una aproximación a la contrastación con la clasificación modal obtenida previamente. Para ello utilizamos el diagrama milicatiónico A-B

de Debon y Le Fort (1988) (Figura 9A), que utiliza el parámetro A ($\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + 2\text{CaO})$), como índice de peraluminismo (parecido al índice ACNK) y el parámetro B ($\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ti}$), como índice de contenido en minerales máficos, es decir de biotita, por ser prácticamente el único máfico de los granitos de Cardenosa-Ávila (Tabla 2). El diagrama A-B es un diagrama químico-mineralógico donde es posible representar algunos de los minerales de incidencia en la clasificación modal. Así, la composición proyectada de la moscovita y de la biotita permite predecir las proporciones aproximadas de ambas micas en función de los valores de A y B, es decir de los análisis químicos de elementos mayores. Se constata que los granitos finos/medios de dos micas son los de valores más altos en el parámetro A, igual que ocurría con el índice ACNK, y además son los más leucocráticos o de menor contenido en minerales máficos (parámetro B), ya que la moscovita apenas tiene Fe y Mg, especialmente el granito fino más leucocrático MIN3. Por esto, los granitos de dos micas se proyectan coherentemente en el campo I de moscovita $>$ biotita. En una posición intermedia (campo II) se ubican los granitos equigranulares finos biotíticos, con biotita $>$ moscovita; o cerca de moscovita = biotita. En el otro extremo aparecen los granitos inequigranulares, con biotita $>$ moscovita, a la vez que registran el mayor contenido en el parámetro B, siendo las muestras MIN2 y MIN4 las de mayor valor por su alto contenido en biotita modal ($>15\%$). Además, la muestra MIN4 tiene un valor de B próximo a 0, lo que indica que casi es metaluminosa y podría tener algún cristal de anfíbol residual, como se ha verificado petrográficamente.

Tabla 2. Análisis químicos de los granitos no alterados del área Cardenosa-Mingorría-Ávila. Datos obtenidos a partir del proyecto de investigación de la USAL (18KAG8/463AC01, 2013).

Muestra	X1	X2	AL2	AL3	MIN3	MIN1	V1	W1	AL4	AL1	Y1	MIN2	MIN4
Tipo	Finos biotíticos				Fino leucocr.	Finos/medios de dos micas				Fino inequig.	Gruesos (\pm porf.) biot.		
SiO ₂	73,18	73,88	74,56	73,4	73,53	73,48	73,83	74,15	74,26	71,52	72,42	69,16	68,16
TiO ₂	0,13	0,13	0,11	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,06	0,21	0,27	0,46	0,57
Al ₂ O ₃	13,62	13,61	13,78	13,26	14,36	14,33	14,82	14,66	14,24	13,94	14,72	15,06	15,65
Fe ₂ O ₃ (T)	1,45	1,5	1,27	1,21	0,68	1,02	0,99	0,9	0,88	1,75	2,04	3,07	3,75
MnO	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,05	0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06
MgO	0,25	0,27	0,2	0,19	0,25	0,26	0,2	0,21	0,17	0,51	0,70	1,4	1,48
CaO	1,11	1,09	0,88	0,84	0,62	0,63	0,55	0,65	0,59	1,22	1,69	2,19	3,18
Na ₂ O	3,09	3,07	3,16	3,21	3,64	3,55	3,68	3,71	3,67	3,14	3,46	3,07	3,39
K ₂ O	5,17	5,18	5,1	4,94	5,16	4,85	4,70	4,72	4,56	4,71	4,47	4,49	3,92
P ₂ O ₅	0,06	0,07	0,13	0,11	0,35	0,36	0,35	0,35	0,33	0,21	0,21	0,16	0,18
LOI	0,53	0,71	0,94	0,95	0,63	0,69	1,07	0,85	1,02	0,8	0,6	0,55	0,53
Total	98,63	99,54	100,2	98,26	99,35	99,31	100,3	100,3	99,82	98,06	100,6	99,67	100,9

Muestra	X1	X2	AL2	AL3	MIN3	MIN1	V1	W1	AL4	AL1	Y1	MIN2	MIN4
Tipo	Finos biotíticos				Fino leucocr.	Finos/medios de dos micas				Fino inequig.	Gruesos (\pm porf.) biot.		
ACNK	1,07	1,08	1,12	1,09	1,13	1,17	1,22	1,18	1,18	1,12	1,08	1,08	1,00
Parám. A	18,1	19,1	28,7	21,7	32,6	41,1	52,6	44,5	43,0	28,6	21,9	22,9	1,0
Parám. B	26,0	27,1	22,2	21,2	16,0	20,5	18,4	17,5	16,1	37,3	46,4	79,1	91,0
Sc	5	5	4	4	3	3	2	2	3	5	6	8	11
Be	5	4	4	5	15	11	54	52	20	5	7	4	3
V	11	10	9	10	8	9	6	6	6	18	24	39	52
Co	80	105	94	106	128	101	83	96	120	86	85	68	66
Ga	20	20	19	18	18	19	20	20	20	20	21	19	20
Ge	2,1	2,2	2,3	2,2	2,3	2,5	2,6	2,5	3,1	2	2,3	1,8	1,8
As	11	7	8	18	< 5	9	7	8	< 5	< 5	< 5	< 5	13
Rb	260	250	254	249	204	200	261	279	273	217	209	169	147
Sr	66	64	53	51	55	52	61	61	42	81	113	165	179
Y	38,9	39,2	32,2	34,2	9,7	10,1	9,5	8,9	7,7	17,1	18,4	19,3	25
Zr	113	109	93	92	48	48	27	28	27	101	102	152	208
Nb	15,5	16,4	15,7	12,5	10,6	11,1	8,9	9,6	11,0	15,8	11,0	11,3	11,7
Sn	9	7	15	15	6	7	22	21	25	13	10	6	5
Cs	13,2	10,7	19,4	15,1	12,9	14,2	24,8	22,5	21,7	17,1	15,9	9,3	9,9
Ba	362	344	296	291	306	301	223	207	159	363	372	570	561
La	40,5	38	31,6	34,3	8,05	8,57	6,01	5,4	4,82	20,6	17,9	21,5	24,9
Ce	83,4	79,7	64,8	70	16,9	18	12,1	11,2	9,9	42,2	36,2	45,5	51,7
Pr	9,86	9,46	7,9	8,39	2,09	2,18	1,47	1,4	1,21	5,08	4,43	5,82	6,41
Nd	35,7	35,2	28,5	30,4	7,71	7,89	5,62	4,78	4,26	19,1	16,4	22,5	25,6
Sm	7,60	7,78	5,80	6,62	2,09	2,25	1,34	1,39	1,07	4,18	3,66	5,19	5,78
Eu	0,500	0,473	0,332	0,376	0,313	0,304	0,353	0,300	0,180	0,449	0,588	0,861	0,903
Gd	6,79	6,70	5,19	5,89	1,96	2,17	1,55	1,30	1,10	3,48	3,33	4,30	5,26
Tb	1,17	1,25	0,93	1,04	0,38	0,39	0,3	0,28	0,23	0,58	0,59	0,74	0,9
Dy	6,78	7,33	5,59	6,35	2,19	2,22	1,72	1,69	1,31	3,05	3,44	4,16	5,12
Ho	1,25	1,42	1,09	1,24	0,33	0,35	0,35	0,31	0,24	0,55	0,67	0,77	0,97
Er	3,54	4,04	3,09	3,5	0,8	0,79	0,83	0,77	0,7	1,61	1,77	2	2,59
Tm	0,63	0,667	0,526	0,561	0,12	0,133	0,167	0,121	0,133	0,253	0,282	0,267	0,423
Yb	3,81	4,25	3,27	3,52	0,79	0,85	0,86	0,81	0,84	1,59	1,86	1,67	2,59
Lu	0,517	0,595	0,453	0,514	0,097	0,101	0,125	0,115	0,106	0,214	0,25	0,21	0,342
Hf	3,8	3,7	3,2	3,0	1,6	1,7	0,9	1,0	1,0	3,0	3,0	4,0	4,9
Ta	3,21	3,77	3,44	3,59	3,9	3,17	3,86	4,02	4,62	3	2,53	1,51	2,03
Tl	1,47	1,54	1,39	1,51	1,01	0,9	1,54	1,54	1,48	1,16	1,2	1,03	0,79
Pb	31	35	29	30	44	44	30	30	25	34	26	21	20
Th	29,3	29,4	23,3	24,8	3,89	4,3	2,89	2,77	2,73	12,1	9,09	12,9	11,6

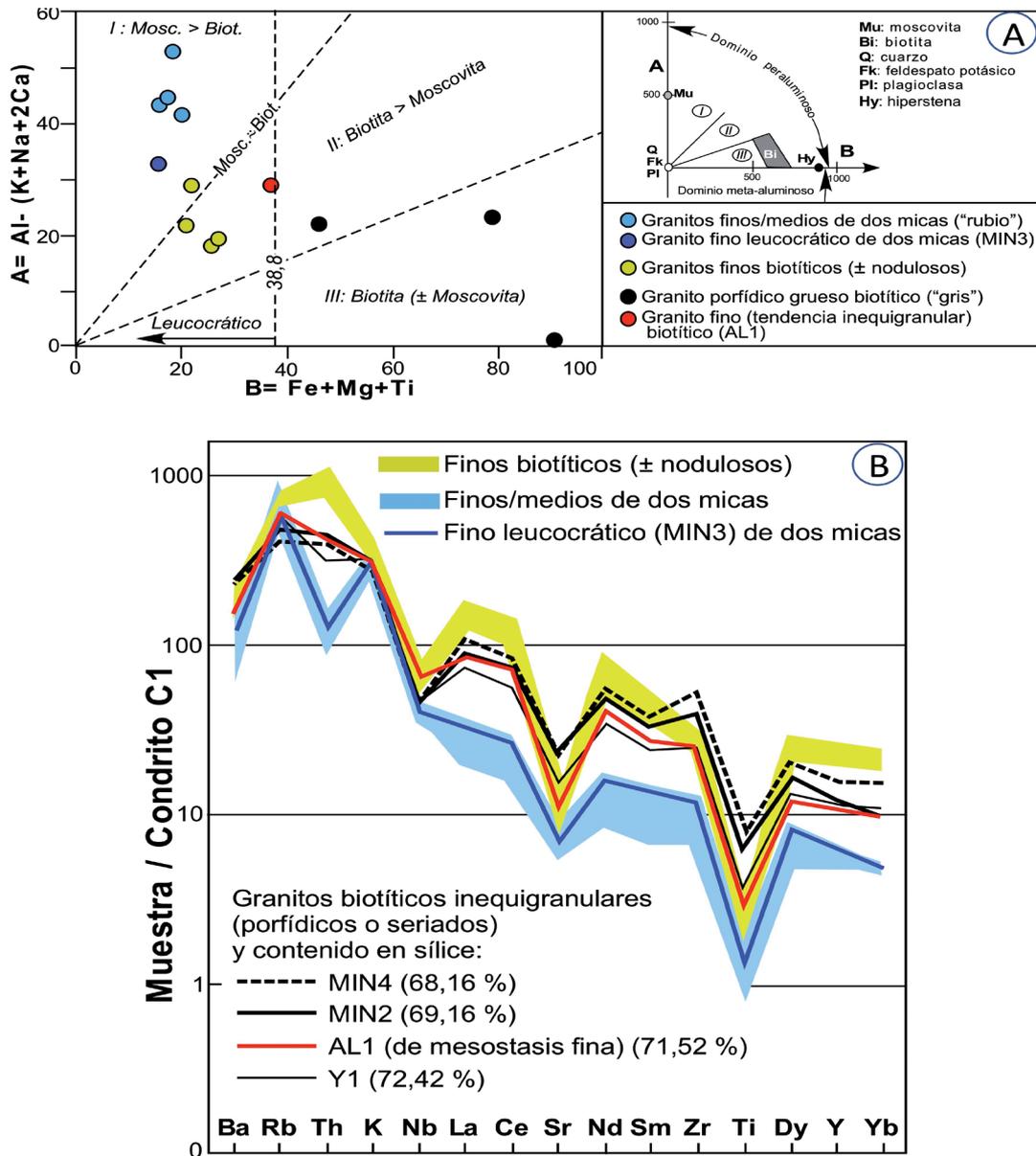


Figura 9. Representaciones en diagramas geoquímicos para los granitoides no alterados. A) Mediante los elementos mayores: a la izquierda, representación en el diagrama químico mineralógico A-B de Debon y Lefort (1988) de los granitos no alterados del área de Cardenosa-Mingorria; a la derecha, representación de diversos minerales en el mismo diagrama. B) Representación de los elementos traza en el diagrama de normalización al condrito. Valores de C1: según Sun y McDonough (1989); K y Rb, según Dias y Leterrier (1994).

En líneas generales, hay, pues, concordancia con las composiciones modales, aunque las leves discrepancias con las químico-mineralógicas pueden ser imputadas a la representatividad de las muestras petrográficas, especialmente si éstas son de tamaño de grano grueso.

Los elementos trazas permiten discriminar *grosso modo* los distintos tipos graníticos, si atendemos a los contenidos en los elementos trazas estructurales, es decir, los que entran en la red cristalina de los minerales esenciales. Así, el Sr, que entra mayoritariamente en la plagioclasa,

discrimina positivamente a los granitos biotíticos inequigranulares (Sr: 81-179 ppm), especialmente evidente para la muestra MIN4, a la vez con mayor contenido en CaO, por la presencia de la plagioclasa cálcica (Tabla 2). Los otros elementos estructurales como el Rb y el Ba muestran mayor variabilidad porque entran en diversos minerales que hacen contrarrestar los contenidos. El vanadio discrimina perfectamente a todos los granitos biotíticos inequigranulares, por su mayor contenido en biotita, con valores de V superiores a 18 ppm (Tabla 2).

La mayor parte de los elementos trazas y tierras raras están hospedados en la red cristalina de los diminutos minerales accesorios, como circón, apatito, monacita, etc. Por esto es difícil evaluar su variabilidad por criterios petrográficos y se utilizan diagramas geoquímicos de normalización. Estos diagramas consisten en estandarizar los valores de cada muestra dividiéndolos por una referencia estándar, como puede ser un meteorito reconocido y estudiado, el caso del condrito C1 (Figura 9B). Todos los granitos estudiados tienen un patrón bastante similar, con valores más altos de los elementos más ligeros, que son los que están a la izquierda del diagrama, e inversamente, tienen menores contenidos en los elementos más pesados, situados a la derecha, como las tierras raras pesadas representadas por el Yb. Otro rasgo común a todos los tipos son los picos negativos de Sr, Nb y Ti, que son, además, característicos de las rocas corticales y, por supuesto, de los magmas graníticos derivados. Pero en el mismo diagrama de normalización se evidencian diferencias claras que permiten discriminar perfectamente los distintos grupos graníticos.

Así, los granitos finos biotíticos muestran, en general, los mayores contenidos en elementos trazas y tierras raras, siendo los correspondientes a los granitos de dos micas los de menor contenido, mientras que en una posición intermedia se ubican los granitos biotíticos inequigranulares. Esta discriminación está especialmente marcada por los contenidos en Th y tierras raras ligeras (La y Ce), pero no por Zr. Esta observación nos lleva a sugerir el probable control combinado de allanita y/o monacita y/o apatito como accesorios, pero no de circón. La determinación petrográfica de estos minerales en términos cuantitativos es difícil; sin embargo, sí se han determinado proporciones relativamente elevadas de apatito (hasta 0,4 %), precisamente en los granitos biotíticos equigranulares, en coherencia con su patrón de contenidos mayores en Th y tierras raras. Inversamente, el pico positivo en Zr de los granitos inequigranulares porfídicos sugiere el control ejercido por el circón incluido en la biotita para explicar, además, el relativo alto contenido en tierras raras pesadas (Dy e Yb), además de Y.

En el contexto de la piedra es importante hacer una última reflexión: dado que los picos o relaciones inter-elementales son fácilmente asociables a un determinado tipo granítico, como los del área de Cardeñoso, se infiere que la comparación de los patrones de los elementos traza con los de la roca de los monumentos representa una herramienta potencialmente viable para establecer la procedencia del material granítico.

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE LOS GRANITOIDES

Diaclasas

Desde un punto de vista canteril, las estructuras que más condicionan la extracción de una roca granítica son las diaclasas o planos de rotura sin desplazamiento. El tamaño y la forma del bloque extraíble van a depender de las diaclasas. Existen diversos tipos de familias de diaclasas: en planos subverticales y perpendiculares entre sí, que son las más comunes, las subhorizontales o levantes y las que conforman planos de cierto buzamiento y de mucha menor abundancia, conocidas por los canteros como "pelos". Con el fin de caracterizar las diaclasas y, por tanto, para estimar el tamaño del bloque extraíble se ha determinado la dirección, buzamiento, espaciado y continuidad de los planos de diaclasa de los litotipos graníticos considerados en este estudio. El granito grueso (\pm porfídico) biotítico es el menos diaclasado y suele tener un sistema de diaclasas verticales o subverticales de direcciones N-89°-E y N-96°-E (sistema 1) y sus conjugadas N-S y N-15°-E (sistema 2) (Figura 10). Los espaciados de sus diaclasas varían bastante, oscilando el sistema 1 entre los 0,5 y los 3 m, mientras que en el segundo sistema son mayores, con un distanciamiento entre 1 y 8 m (Figura 10).

La persistencia de la mayoría de las discontinuidades es alta y no se ve el final, perdiéndose algunas esporádicamente a 1,5 m. Estos granitos también presentan un diaclasado subhorizontal que se presume de varios metros, aumentando en profundidad. En general, este tipo granítico permite la obtención de bloques de tamaño comercial, pero no de excesivas dimensiones (Figura 10).

El granito fino biotítico manifiesta un diaclasado característico de planos subverticales, con un juego de direcciones N-95°-E y su conjugado N-12°-E (Figura 10), es decir muy similar al del granito grueso (\pm porfídico) biotítico. De este juego, una de las dos direcciones suele predominar respecto de la otra en términos de persistencia y densidad, dependiendo del dominio. Así, dentro del dominio estudiado de la zona centro-este predomina la N-95°-E y en la zona oeste la N-12°-E. Especialmente abundantes son también los sistemas al NNE (Figura 10), como N-36°-E y N-25°-E, que no llegan a ser subverticales, sino con un fuerte buzamiento hacia el norte. Con respecto a las diaclasas subhorizontales propias de la descompresión no se tienen datos, si bien en superficie los espaciados son de tamaño decimétrico. En este granito los bloques extraíbles serían de menos de 1 m³ (Figura 10).

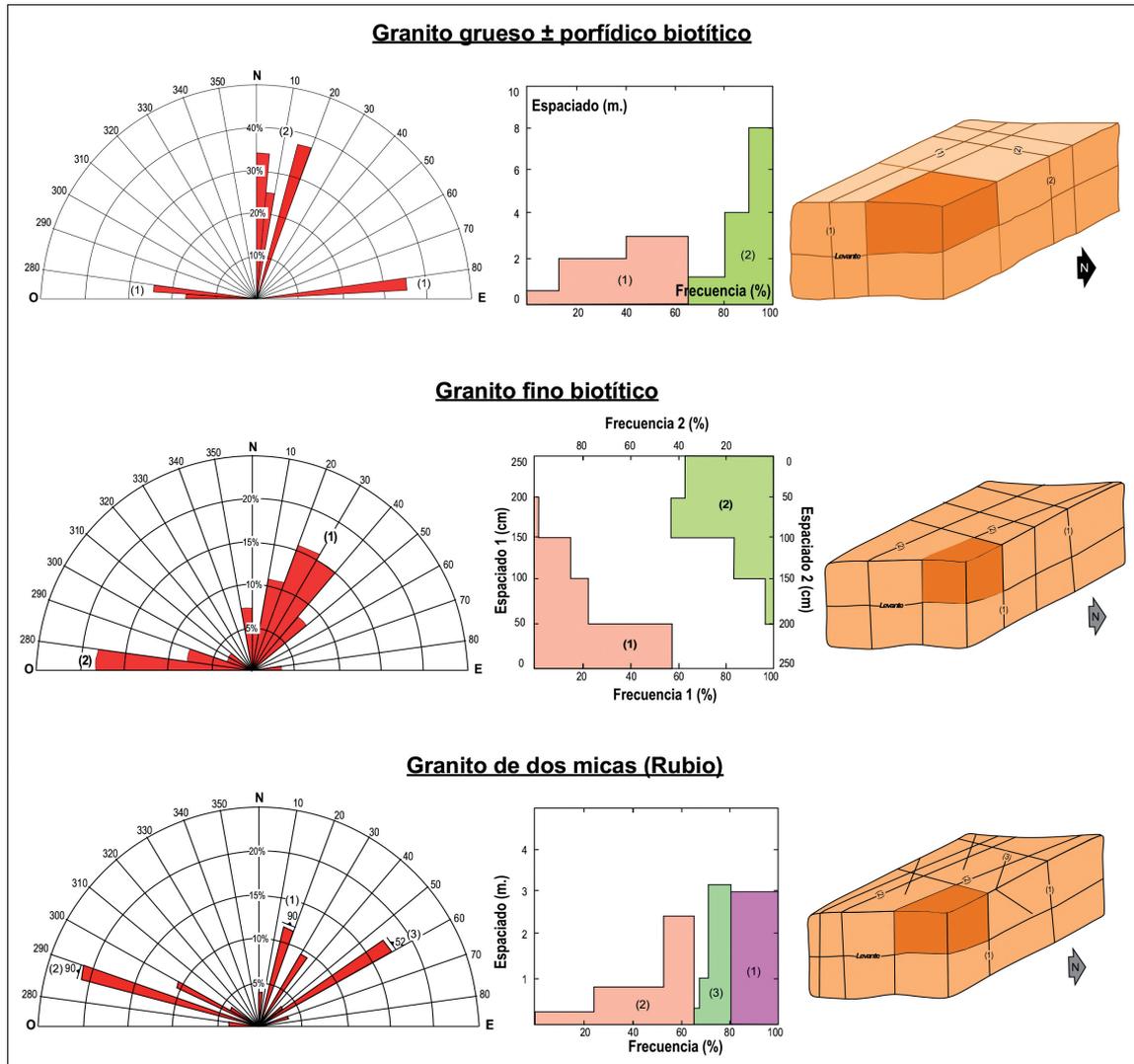


Figura 10. Orientación y frecuencia de los planos de diaclasa, representados en diagramas de rosas; frecuencia del espaciado de las distintas familias de planos de diaclasa (histogramas) y forma y tamaño del bloque extraíble de los granitos gruesos (\pm porfídicos) biotíticos, finos biotíticos y de dos micas.

El granito de dos micas presenta un juego principal de planos subverticales con direcciones próximas a N-20°-E (1) y N-110°-E (2) (Figura 10). Además, existen otros planos menos abundantes de dirección N-51°-E y buzando 55° hacia el NW (3), aunque también los hay de dirección N-120°-E y buzando al SW (Figura 10). Los espaciados de los diaclasados subverticales varían mucho, con un distanciamiento desde cerca de los 3 m en el sistema N-20°-E, cerca también de los 3 m en el sistema N-110°-E y entre 0,5 y 3,5 m, aunque predominando los valores altos, para el sistema N-51°-E (Figura 10). En cuanto a las persistencias también varían mucho según los casos. En los sistemas subverticales no suele verse su terminación. Por el contrario, el sistema no subvertical manifiesta persistencia mucho más reducida, son los típicos “pelos” de escasas dimensiones, pero de

malas consecuencias por sus inclinaciones y su difícil predicción. Los bloques extraíbles serían de pequeñas dimensiones, y la mayoría de los bloques estarían en torno a 1 m³ (Figura 10).

Fábrica

Los granitos gruesos (\pm porfídicos) biotíticos y el medio biotítico de tendencia inequigranular son los que presentan una mayor orientación mineral y mayor cataclasis. Ambos litotipos presentan una fábrica planar vertical o subvertical, definida sobre todo por las biotitas, cuya dirección está próxima a la N-10°-E, variando desde N-25°-E hasta la N-10°-W. Esta orientación indica que la deformación regional ya estaría actuando cuando comenzó a consolidarse la roca al afectar a los minerales

que primero cristalizan. La intensidad de la deformación en los tipos inequigranulares (\pm porfídicos) varía de unas zonas a otras, pero es más intensa en la zona cercana al Castro de las Cogotas. Además, de esta orientación mineral, en estos dos tipos graníticos se aprecia una cataclasis, puesta en evidencia por microfisuras en el cuarzo y en menor medida en los feldespatos. Esta cataclasis es siempre subhorizontal. Esta microfracturación estaría ligada a los esfuerzos de tensión-distensión verticales de los estadios finales de la intrusión granítica con la roca ya consolidada, o bien en relación con la descarga erosiva.

Por lo que respecta al granito fino biotítico, presenta una débil cataclasis subhorizontal y una orientación mineral definida por las biotitas. Se trata de una fábrica planar que a veces está menos marcada que otras. En ocasiones presenta una cierta orientación, a veces encontrada sobre todo en la zona de contactos, por lo que estaría influida por ellos.

Por último, el granito fino-medio de dos micas es el granito menos deformado y es prácticamente isotrópico. Tan solo se observan anisotropías planares donde se han concentrado las micas (especialmente la moscovita) en lo que podrían ser "layers" de techo debidos exclusivamente a procesos de flujo del magma. Esta anisotropía se ve muy bien en el paraje de Las Conejeras, en el cerro de las Cogotas, al norte del cerro de las Cogotas y en el cerro Airón.

"LAS MIL CANTERAS": BASES PARA SU PROTECCIÓN PATRIMONIAL

Las canteras antiguas de las que se extrajo piedra para los monumentos de una ciudad patrimonio de la humanidad, como es Ávila, constituyen elementos patrimoniales que hay que proteger. Esto ha ocurrido ya con las canteras de granito ocre y piedra sangrante de La Colilla, pero no con las rocas graníticas sin alterar. Las razones para esta falta de interés por las canteras de la piedra "fresca" hay que buscarlas muy probablemente en el desconocimiento de la ubicación de estas, la falta de cartografías de detalle que reflejen las facies graníticas que encontramos en los monumentos, y por qué no decirlo, por ser rocas muy abundantes en las proximidades de Ávila, y no una roca exclusiva como son los granitos silicificados extraídos de las canteras protegidas de la localidad de La Colilla. Por lo tanto, es necesaria una catalogación y un estudio pormenorizado de las canteras de zonas con profusión de canteras de rocas graníticas frescas, como son Cardeñosa, Alamedilla del Berrocal y Mingorría, como representantes de granitos frescos, a la que habría que añadir la zona de El Calvario, como fiel exponente de roca episenítica.

La extracción del granito

Los granitos de Cardeñosa han sido aprovechados para la construcción monumental tras su corte en pequeños frentes extractivos, que en ocasiones podían llegar a conformar auténticas canteras, mediante las técnicas tradicionales, el único sistema posible en épocas preindustriales. La cantería artesanal del granito, y en general de las rocas duras, consiste en obtener bloques más o menos prismáticos, mediante planos abiertos en las tres direcciones espaciales. Esos planos o ya existen o deben efectuarse a través del método de corte denominado en V, que se describe a continuación.

Los granitos son rocas duras, compactas, de densidades de 2,63-2,71 g/cm³, resistencias a la compresión de 120-161 MPa y escasa absorción de agua (0,16-0,32 %), (García de los Ríos y Báez, 2001). Desde un punto de vista mecánico, básico para el cantero, estas rocas presentan buenas cualidades, aunque conviene aclarar que esas cualidades pueden disminuir sensiblemente cuando se trata de rocas superficiales que presenten cierto grado de alteración. En la cantería tradicional, se solían explotar rocas superficiales (las únicas accesibles), en bastantes ocasiones con un ligero grado de alteración.

Las resistencias mecánicas también pueden verse afectadas por el tamaño de los minerales y, sobre todo, por su disposición. Un granito con una orientación mineral muy marcada (muy anisótropo) ofrecerá menor resistencia a su corte por esa dirección, especialmente si conforma un plano. Las rocas graníticas, además, como ya hemos visto, suelen presentar otro plano de debilidad horizontal o subhorizontal, marcado por una ligera microfracturación mineral, que propicia la aparición de diaclasas ("levantes") (Figura 11E). Esas debilidades potenciales, junto con los planos de discontinuidad ya existentes, serán aprovechados por el cantero para obtener una pieza de roca con el menor esfuerzo y mayores posibilidades de éxito. El tamaño de la pieza va a condicionar el reparto de los esfuerzos y de las tensiones, a lo largo de esa pieza. Tampoco será lo mismo tratar de cortar una piedra de escaso volumen, como puede ser un bolo granítico, que extraer una pieza de un gran macizo rocoso masivo y poco diaclasado.

En esas épocas preindustriales tan solo se podían extraer las rocas plutónicas en su parte más superficial no masiva: el berrocal y masas asociadas. Había que localizar bolos o piezas mayores sueltas, o suficientemente fisuradas, accesibles a los métodos de arranque disponibles. Por esto se ha denominado al material granítico piedra berroqueña, al hacerse referencia a la procedencia de la piedra, de un berrueco o bolo granítico (Figura 12F). Bolos que servían para la talla de los toros y verracos ibéricos de ciertas culturas antiguas, como la de Las Cogotas, de Cardeñosa.

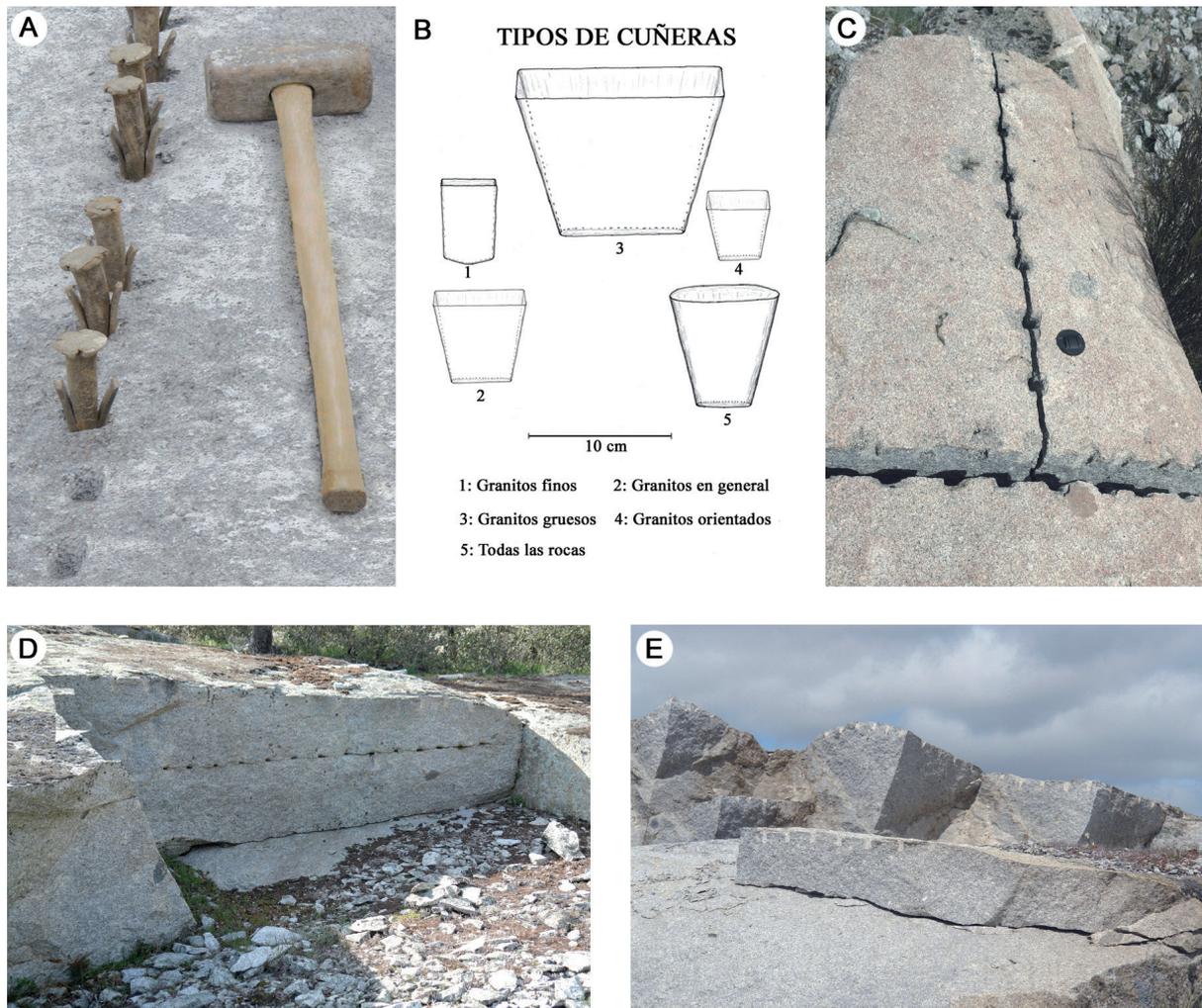


Figura 11. A) Las cuñas, con sus pletinas, y la maza; B) las cuñeras históricas; C) corte a la “mano buena” (“norte”) y a la “mano mala” (cuñeras más juntas); D) corte de “levante”; y E) aprovechamiento del levante natural.

Con los métodos tradicionales de corte del granito y la disponibilidad de tan solo herramientas manuales se podía acceder exclusivamente a las piezas de roca emplazadas hasta el primer levante, generalmente placas de distinto grosor, además de los mencionados bolos.

En estas rocas el corte o procedimiento para desgajar un trozo de roca se produce por rotura, a la que se llega, tras no poco esfuerzo, aprovechando las posibles debilidades que nos ofrece el granito. Se emplea el procedimiento del corte en V, con el empleo de cuñas y la maza de hierro o mallo (Figura 11A).

En primer lugar, se debe observar la roca en sus tres dimensiones y ver qué plano de corte es más favorable. El trabajo se inicia marcando una línea de corte, a ser posible aprovechando alguna ligera lineación mineral (la “mano buena”, la “hebra”, que aquí en Cardenosa se denomina el “norte”, por seguir esa dirección aproximada). El corte transversal a la orientación mineral o a la contra,

según el “tronce” o “mano mala”, siempre ha sido más comprometido, requiriéndose más trabajo, mayor número cuñas (Figura 11C).

También es fundamental aprovechar la microfracturación subhorizontal (ley o andar del levante), precisamente para dar el corte horizontal o “levante” en el caso de no existir ya de forma natural (Figura 11D). Por esto parece que se preferían las rocas menos isotropas, con algún tipo de orientación mineral o fábrica marcada, y por tanto más fáciles de cortar.

En la dirección elegida se procedía a alinear las cuñas de corte. En primer lugar, se efectuaba una ranura no muy profunda con el puntero y la maceta. Con estas mismas herramientas u otras similares, se procedía posteriormente a completar las cuñeras o cajas. Son unos agujeros profundos y alargados en los que se introducen las cuñas. Su tamaño y separación dependen de la dificultad del corte (Figura 11B). Cuanto más isotropea sea la roca (escasa o nula orientación mineral preferente)

y mayor el volumen a cortar, las cuñeras estarán más próximas entre sí y su tamaño será mayor.

En rocas con cierta dificultad de corte se observan cuñeras para los cortes primarios de bocas más o menos elípticas o rectangulares, alargadas y de unos 8 cm de longitud por 2,5 cm de ancho. Su profundidad es de unos 8 cm, mientras que la sección en el fondo disminuye hasta 4 cm por 0,5 cm de anchura. Así pues, la forma general de la cuñera es más o menos troncopiramidal.

Estas cuñeras aparecen en las líneas de corte cada 13 cm o más juntas. En los cortes de mayores dimensiones (piezas de hasta 4 m de longitud por más de 1 m de profundidad) en este tipo de rocas se pueden ver cuñeras aún más grandes, de 15x5 cm de boca (rectangular), 9x0,8 cm de fondo y 11 cm de profundidad. Estas cuñeras aparecen alineadas y separadas 26 cm. Sin embargo, en otros cortes de menor longitud, o máxima dificultad de corte, pueden llegar a estar muy próximas.

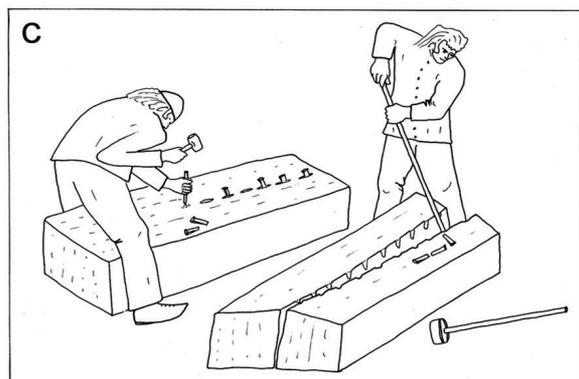
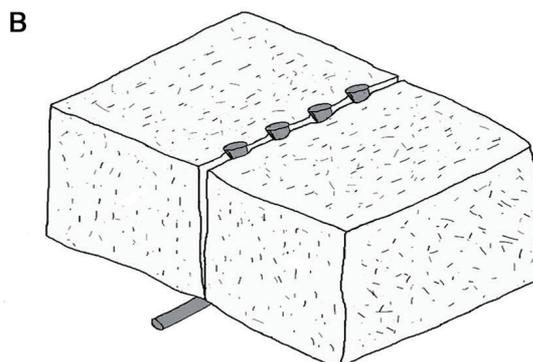


Figura 12. A) El corte del bloque primario; B) el desdoble; C) esquema del proceso de corte; D) piezas cortadas; E) zona de canteras; y F) el berrocal original, al NE de Cardeñosa, en zona menos explotada.

Las grandes cajas podrían ir destinadas a la introducción de cuñas de madera, que al empararse

en agua e hincharse ejercían la presión necesaria para hendir la roca. Por este método, el esfuerzo

se transmite linealmente y se reparte muy uniformemente, al actuar de forma sincronizada (más que con cuñas metálicas). Este método, utilizado en la antigüedad, era más lento y requería cuñas mayores. Normalmente se procedía a dar cortes de gran desarrollo, aunque de poco esfuerzo, en los que era muy difícil ejercer una presión homogénea y sincronizada mediante cuñas metálicas



golpeadas con varias mazas a la vez. Algunos de estos cortes se pueden ver en bolos del castro de Las Cogotas (Figura 13A), cuyos canteros, del periodo Cogotas II, podrían estar especializados en la confección de berracos y molinos, a juzgar por las numerosas herramientas de trabajo fino encontradas (Rodríguez-Hernández, 2012).



Figura 13. A la izquierda, grandes cuñas muy antiguas, y a la derecha, herramientas de cantería. Todo del castro de Las Cogotas.

Sin embargo, las cuñas más pequeñas se utilizaban para los cortes en granitos más o menos orientados (la mayoría) o para los de las piezas menores y desdobles; sus huellas se observan con profusión en canteras más modernas. Se trata de agujeros aplanados, de sección prácticamente rectangular, con bocas a veces estrechas, de 4-6x1,5-2 cm, de 6-9 cm de profundidad y fondo de 3-3,5x0,5-0,8 cm. En ocasiones esas secciones son casi cuadradas, cuando hay que colocar las pletinas y cuñas más gruesas. Se ven agujeros cada 8-15 cm de línea de corte, dependiendo de la orientación de la roca. Para los levantes en este tipo de granitos, cuando fuera preciso este corte, la cuñas pueden ser algo mayores y emplazarse más espaciadas (20-25 cm).

Las cuñas, con el golpeo de la maza, actúan proporcionando una fuerza a través de sus costados, hacia la pared de la cuñera, en dirección perpendicular a la línea de fractura. Se provoca la rotura de los bloques por tracción. No es el filo de la cuña lo que propicia el corte. Al contrario, cuando la cuña da en el fondo de la cuñera rebota y el proceso no avanza. Por tanto, estas deben ser lo suficientemente profundas para que no ocurra. Las cuñas de hierro o acero suelen ir acompañadas de dos pletinas de chapa rectangular alargadas y planas, pero con un extremo algo doblado (también denominadas chapas o callos, cuando se trata de trozos de herraduras reaprovechadas). Estas pletinas evitan la rotura de los bordes y ayudan al deslizamiento por el agujero, transmitiendo homogéneamente la

tensión a medida que se produce el golpeo con la maza (Figura 11A). Este golpeo debe ser sistemática y homogéneamente repartido por igual en todas las cuñas del corte. Es un proceso delicado, cuidadoso. El sonido que acompaña debe ser agudo, al vibrar la cuña; si fuera más bronco, más sordo, es que la cuña ha tocado fondo. Si el proceso se lleva a cabo de forma brusca, con fuerza desigual, la pieza de roca puede romperse.

Inicialmente, se procede a efectuar un primer corte (primario) que permite obtener una pieza de grandes dimensiones, que posteriormente se subdivide en otro u otros menores (Figura 12A). Lo normal es el corte llamado desdoble, por la mitad (Figura 12B).

Las piezas cortadas, generalmente de forma prismática con base cuadrada o rectangular, eran escuadradas, someramente desbastadas y trasladadas a la obra, donde se procedía a su retrabajado final (Figuras 12C y 12D).

Las rocas graníticas solían destinarse a numerosos usos, además de sillares y otros elementos arquitectónicos. Buscando su especial dureza se han destinado a adoquines, solados, columnas, dinteles y demás piezas con mayor requerimiento de resistencia mecánica.

Es de destacar, así mismo, los huecos producidos en ocasiones por antiguas barrenas hincadas a golpe de maza en las canteras de granitoides menos duros y menos isotrópicos. Se trataba de introducir una barrena a golpe de maza al tiempo que se iba girando manualmente. Un operario sujetaba

la barrena, una especie de cincel largo, y otro u otros dos golpeaban con el mazo de forma alterna. Con posterioridad se cargaba con pólvora y se hacía explotar. Son trabajos que llevaba a cabo el barrenero. No obstante, en Cardeñosa se observan escasas huellas de barrenos antiguos, más utilizados en épocas recientes.

La profesión de cantero ha debido estar muy arraigada en Cardeñosa durante largos periodos de tiempo, cuando la demanda de estos materiales lo propiciaba, desde muy antiguo. Tal es así que la continuada extracción de los granitos del área comprendida entre la localidad de Cardeñosa y el castro de Las Cogotas ha conllevado la paulatina desaparición del primitivo berrocal y la aparición de un paisaje distinto, más aplanado y salpicado de numerosos pequeños huecos, testigos de esa actividad, en buena parte con muchos años de antigüedad (Figura 12E).

En otro orden de cosas, los contrastes cromáticos entre dos rocas muy diferentes ha sido un aspecto perseguido en no pocas ocasiones. A un monótono granito gris se le busca otro oscuro o de gran colorido, como los granitos silicificados de La Colilla, (“Ocre” y “Rojo Sangrante”).

Evolución de las técnicas de extracción

La catalogación realizada ha permitido observar la evolución en las técnicas de cantería desde probablemente épocas prerromanas hasta la actualidad. En todas las zonas consideradas encontramos actualmente multitud de pequeñas labores canteriles superficiales, así como explotaciones profundas de mayores dimensiones si existen afloramientos adecuados de roca granítica. Las pequeñas labores superficiales en muchas ocasiones presentan planos de corte cubiertos con abundante materia vegetal, restos de cuñeras de un tamaño máximo de 15 cm en su dimensión mayor, tanto en planos de corte en la vertical como en la horizontal (Figuras 14c y d); son labores que llegan a la profundidad del primer o segundo levante natural, o bien, fueron realizadas en bolos graníticos que permiten extraer con facilidad la roca. Estas características dejan a las claras un tipo de explotación tradicional antigua para este tipo de labores y son consideradas aquí labores antiguas que pudieron surtir de piedra natural a los monumentos de Ávila y de la llanura, especialmente durante el boom constructivo del siglo xvi y primeras décadas del xvii. Por el contrario, en las explotaciones abandonadas con frentes más profundos se hace patente ya el uso de barrenos para usar explosivos, existiendo una gran cantidad de estériles de pequeño tamaño, tanto fuera como en el propio hueco de explotación,

que no hemos visto en las explotaciones antiguas; y, por último, los planos de corte del granito no tienen materia vegetal o es muy escasa (Figura 14e). Este tipo de explotaciones son consideradas aquí recientes y corresponden mayoritariamente a labores del siglo pasado. Por último, en las canteras activas actualmente de la zona (Figura 14f), el grado de mecanización es alto y el corte se realiza con hilo de diamante.

Finalmente, en los alrededores del Castro de las Cogotas se han localizado en el granito fino biotítico labores escalonadas en las que el fuerte lajeado del granito ha permitido extraer muy fácilmente bloques con forma de prisma rómbico, tan solo con el uso de palancas (Figura 14b). Ya que las murallas del Castro de Cogotas están hechas de este tipo de sillares, sospechamos que estas estructuras escalonadas podrían ser atribuibles a los canteros vettones. De igual manera, en la zona del Castro de Cogotas hemos observado cuñeras de 30 cm en su dimensión mayor en un bolo de forma alomada del granito grueso ± porfídico biotítico (Figura 14a). Las inusitadas dimensiones de estas cuñeras (no vistas en ninguna otra cantera de la zona), la forma alomada del bloque, y el hallazgo de verracos en este castro con este mismo tipo litológico nos hace pensar que el bloque de grandes cuñeras quiso ser aprovechado para la obtención de una pieza que posteriormente sería trabajada para esculpir un verraco. Las grandes dimensiones de estas cuñeras y la escasez de hierro en la época de los vettones nos hace pensar en la posibilidad del uso de cuñas de madera para el corte, como ya se ha apuntado.

Distribución de las canteras históricas

La catalogación realizada pone de manifiesto que a gran escala la distribución de canteras antiguas y modernas es bastante pareja y por lo general comparten espacios (Figura 15). Este hecho también es posible constatarlo a pequeña escala, a escala de cantera, ya que muchas canteras modernas presentan en su parte superficial trazas de cantería tradicional, evidenciando una reutilización de las canteras a lo largo de la historia. En la distribución de canteras también es posible constatar canteras antiguas en prácticamente todas las facies graníticas, lo que está en línea con el uso de todas estas facies graníticas en los monumentos de Ávila y de las localidades de la llanura. Además, el uso tardío y puntual del granito de dos micas (“rubio”) parece indicar, como se constata por la documentación histórica y el reconocimiento *in situ* (Azofra et al., en esta monografía; Azofra y López-Plaza, 2021), que la mayor parte de la piedra



Figura 14. Evolución de las técnicas de corte en las zonas de estudio. a) Cuñeras de 30 cm en el granito grueso \pm porfídico biotítico en el Castro de las Cogotas, posiblemente para utilizar cuñas de madera. b) Labor superficial escalonada de la cual se extrajeron fácilmente bloques por el buen lajeado del granito fino biotítico. Estos bloques fueron utilizados en la muralla del castro de Las Cogotas. c) Cuñeras de unos 15 cm en un bloque cortado antiguo, de granito grueso \pm porfídico biotítico en Mingorría. d) Bloques antiguos de granito grueso \pm porfídico biotítico cortados con cuñas de unos 10 cm en Cardeñosa. e) Pequeño frente sin cobertera vegetal, marcas de barrenos y abundante material estéril de pequeñas dimensiones, aspectos típicos en las labores modernas de Mingorría y Cardeñosa. f) Cantera actualmente activa de granito grueso \pm porfídico biotítico donde el corte se hace con hilo de diamante (Cogotas).

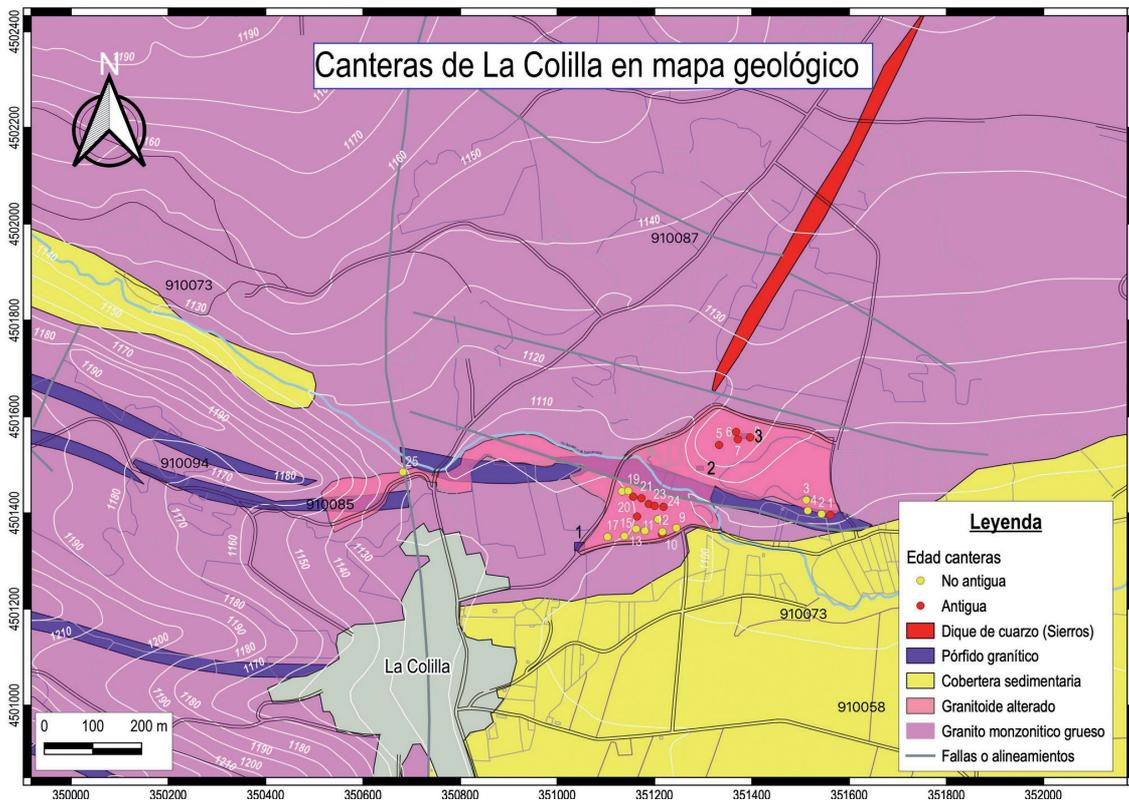
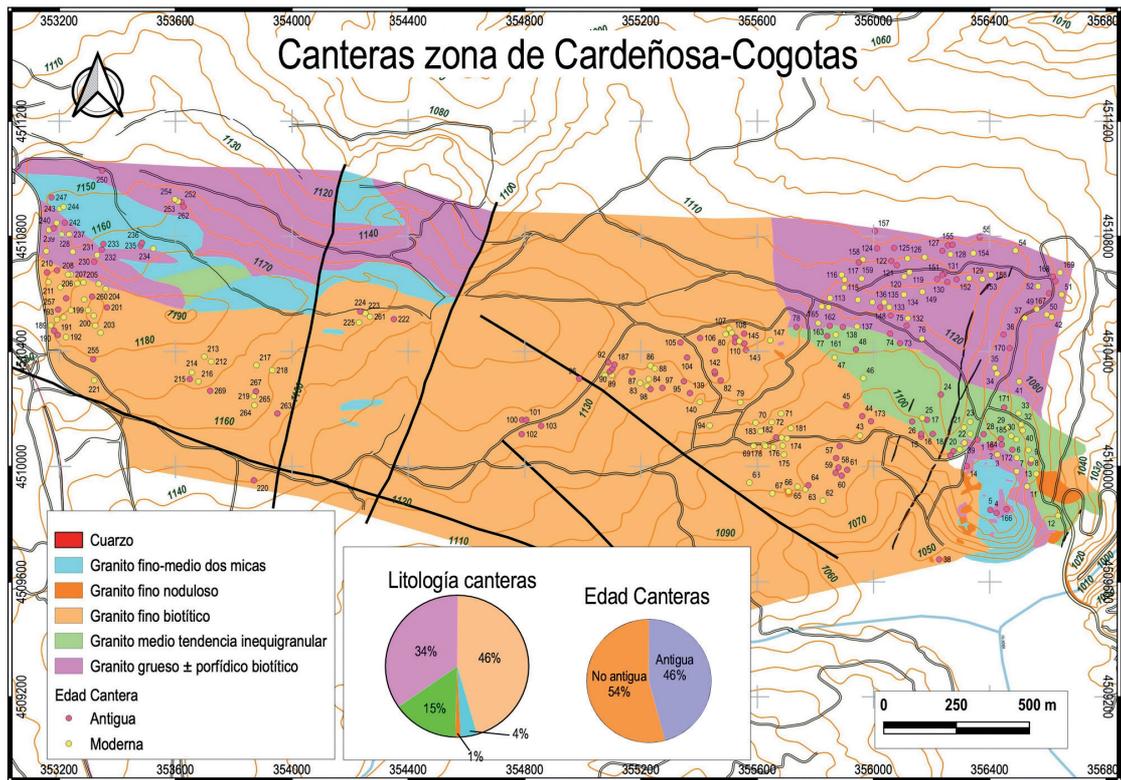


Figura 15. Distribución de las canteras antiguas y modernas de la zona de granitos frescos de Cardeñosa-Cogotas (arriba) y de granitos silicificados de La Colilla (abajo). En la zona de Cardeñosa-Cogotas se añaden diagramas circulares con el porcentaje de canteras antiguas y no antiguas, así como con el porcentaje de canteras de cada tipo de granito (colores iguales a los de la leyenda).

utilizada procede de zonas donde el granito de dos micas no aparece o es escaso, como ocurre en Cardeñosa y los alrededores de la ciudad de Ávila.

La distribución de canteras antiguas también parece estar condicionada por la existencia de vías de comunicación para el transporte de piedra, material muy pesado y difícil de transportar en una zona de berrocal granítico. Así, en la zona de Cardeñosa, la existencia de caminos que comunicaban esta localidad con molinos hidráulicos medievales, ermitas antiguas, casas señoriales

y fuentes de agua potable facilitaron la apertura de canteras antiguas próximas a estos caminos seculares (Figura 16).

Por otra parte, en zonas donde no hay vestigios de cantería antigua y sí de moderna, como ocurre en el paraje denominado Boyal en Cardeñosa, hay atajos que comunican la zona de estas canteras con los caminos seculares, evidenciando que la cantería moderna ha modificado de alguna manera la red de caminos, aspecto que no parece evidente que haya ocurrido en los tiempos que se explotaron las canteras antiguas.

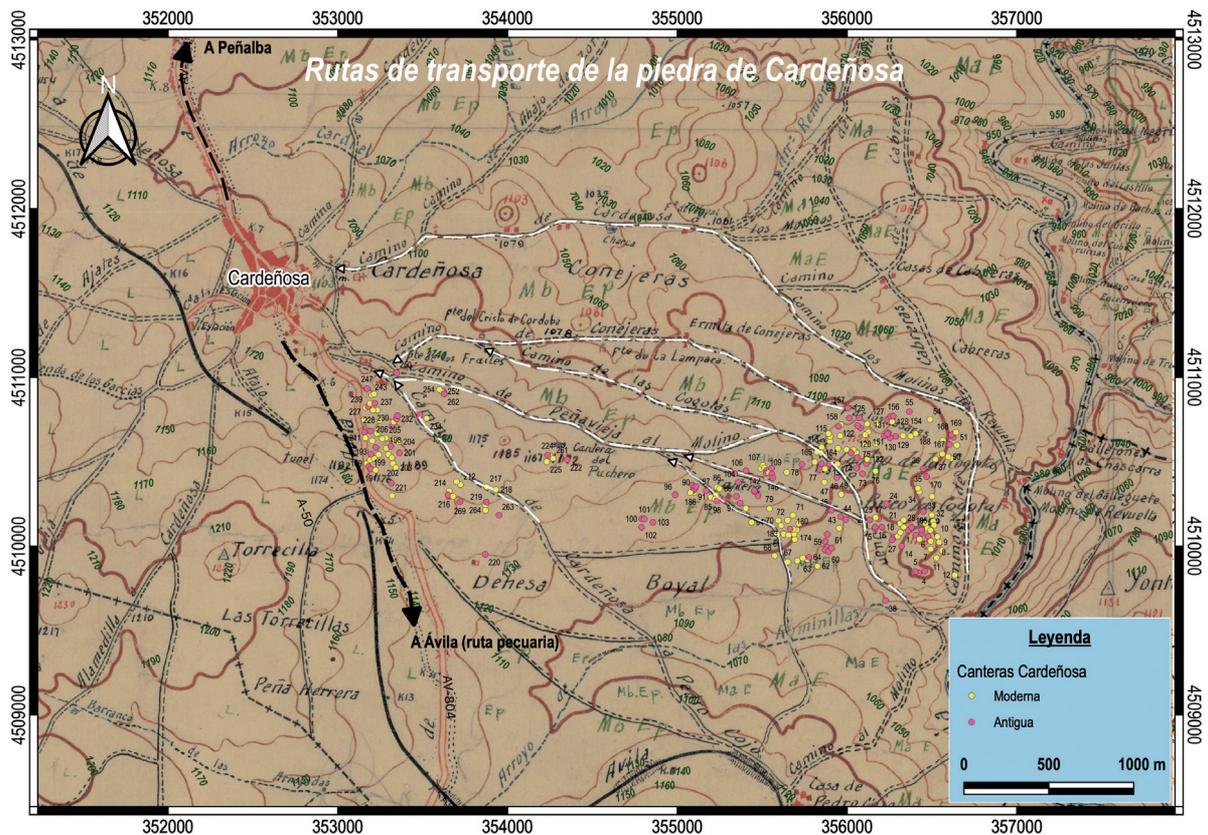


Figura 16. Posibles caminos por los que se pudo transportar la piedra desde las canteras hasta Cardeñosa, y desde allí hacia Ávila (al sur) o hacia Peñalba (hacia el norte). La base topográfica está tomada de las minutas de principios del siglo xx del Instituto Geográfico Nacional. Se incluye también la distribución de canteras antiguas y modernas.

DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

A tenor de lo expuesto es fácil sostener que las cinco zonas consideradas en este trabajo presentan un alto interés geológico y canteril que conviene dar a conocer tanto al público en general como a un público más especializado. Existen, sin embargo, dos zonas con un mayor potencial, como son Cardeñosa y La Colilla, a las que aquí nos referiremos especialmente.

La zona de Cardeñosa-Cogotas, en especial la parte de Cogotas es la más apropiada para que

el turista pueda hacer un viaje al pasado y ver la evolución de las técnicas de corte de la piedra, desde los vettones hasta la actualidad, ya que existen multitud de labores canteriles de todas las edades. Además, la zona nos da pie a ir más allá y ponernos en la mente de los maestros canteros vettones, que a nuestro juicio tuvieron mucho que ver con la ubicación del Castro de Cogotas. En efecto, este castro se ubica en una zona elevada y fácil de defender, pero también este enclave presenta unos afloramientos de piedra granítica con unas características idóneas

para su extracción, lo que sin duda es un factor muy a tener en cuenta a la hora de construir una estructura fortificada de piedra. En esta zona es donde el granito grueso \pm porfídico biotítico manifiesta una mayor orientación mineral, es decir, es la zona donde el corte de esta piedra resulta más fácil. La ubicación de cuñeras gigantes en la dirección N-S nos hace pensar que los vettones ya conocían esta característica estructural del granito. Además, se encuentran abundantísimos afloramientos de granito fino biotítico, de fácil laminamiento y de extracción excepcionalmente buena, favorecido por la escarpada topografía. Estas dos circunstancias, fácil extracción en el fino y orientación mineral en el grueso, facilitaron respectivamente la construcción de la muralla del Castro de Cogotas mediante piezas aplanadas del fino dispuestas a hueso, y la fabricación de verracos y molinos mediante el granito grueso, de espaciados mayores en las diaclasas, que permitieron extraer bloques más grandes sin necesidad de ser paralelepípedos.

Además, la zona de Cardeñosa-Cogotas presenta aspectos geológicos muy singulares, como es el reconocimiento en el granito de cavidades miarolíticas, fenómenos de emplazamiento magmático por “stoping”, contactos entre diversas facies graníticas con capas marginales de flujo, así como diques sin-plutónicos, aspectos que resultan de interés para geólogos o estudiosos de los procesos magmáticos.

La zona de La Colilla presenta la singularidad de contener una roca muy específica usada con profusión en la ciudad de Ávila, como es el caso de los granitos silicificados. Existen multitud de pequeñas canteras en la zona que permiten reconocer en perfecto estado el granito ocre y la piedra sangrante y observar las técnicas extractivas de esta piedra alterada. Además, el aficionado a la geología puede reconocer la evolución del perfil de alteración mesozoica, desde la zona topográficamente más elevada (roca sangrante) a la más profunda (granito ocre) menos alterada.

Para que el turista y el público más especializado conozca todos estos aspectos se han elaborado paneles explicativos, trípticos y una página web (<https://sites.google.com/usal.es/canteras-historicasavila/inicio>) donde se pueden consultar y visitar distintos itinerarios geo-turísticos, no solamente de Cogotas y La Colilla, sino del resto de las zonas consideradas en este estudio. No cabe duda de que la divulgación de toda esta información ayudará a proteger los elementos patrimoniales como son las canteras históricas y los lugares de interés geológico.

CONCLUSIONES

Sobre la geología

Se ha elaborado una cartografía detallada de las distintas áreas de canteras en la zona de Cardeñosa-La Alamedilla del Berrocal-Ávila.

Se han distinguido los siguientes tipos graníticos no alterados:

- Granitos equigranulares medios de dos micas (variedad “Rubio”)
- Granitos equigranulares finos biotíticos (\pm nodulosos)
- Granitos medios y finos de tendencia inequigranular (\pm porfídicos)
- Granitos porfídicos biotíticos (variedad “gris Cardeñosa”)

Se ha establecido su secuencia de intrusión magmática: 1) granitos gruesos, 2) granitos medios inequigranulares, 3) granitos finos (equigranulares) biotíticos y finos nodulosos y 4) granitos de dos micas.

Todos ellos se han caracterizado petrográficamente y geoquímicamente.

Sobre la procedencia de la piedra

La caracterización litológico-petrográficamente de los tipos graníticos es, *a priori*, un primer paso para la comparación con los tipos de los monumentos, lo que a su vez representa una técnica básica y sencilla para proponer la procedencia de la piedra del área de Cardeñosa-Ávila.

La presencia de la misma asociación de tipos graníticos en los afloramientos naturales y en los monumentos constituye un criterio muy consistente para la determinación de la procedencia de Cardeñosa-La Alamedilla.

El tratamiento geoquímico de datos puede representar una técnica muy válida para confirmar la procedencia de la piedra por los elementos traza, ya que los granitos de Cardeñosa-La Alamedilla-Mingorría presentan patrones de normalización al condrito de alta especificidad, lo que representa una herramienta potencial para la comparación con los de la roca en monumento.

Sobre las estructuras graníticas y la cantería

Diaclasas y blocometría

Las direcciones de diaclasas son similares en todos los tipos graníticos, pero su espaciado es diferente según las familias y los tipos graníticos, lo que conduce a una blocometría diferente: los bloques ideales de granitos gruesos y medios son

de tamaño métrico, mientras que los de los granitos finos son decimétricos.

Anisotropía en los granitos y relación con las labores de cantería

Los primeros granitos en emplazarse (granitos gruesos) tienen una fábrica de tendencia generalizada próxima a N-S que favoreció el corte según la “mano buena” y la obtención de piezas para su uso extensivo en los monumentos. Los granitos más tardíos de dos micas carecen de orientación mineral visible, lo que seguramente dificultó su corte y su uso en los monumentos.

Evolución en las labores de cantería de la zona

Las labores más antiguas son superficiales, explotándose hasta el primer y segundo levante natural, que configuraban los bolos graníticos, mientras que las más modernas muestran huellas de barrenos en la vertical y la horizontal, siendo claramente de más profundidad.

Existe una frecuente superposición de explotaciones modernas sobre las históricas, las cuales son con frecuencia reutilizadas o ampliadas.

Se constata una evolución en el material de corte: desde antiguas cuñas muy grandes (de unos 30 cm), seguramente de madera, hasta cuñas metálicas más pequeñas (de unos 10 cm).

Sobre la divulgación de los resultados

Las cinco zonas estudiadas de abundantes canteras presentan un alto potencial de implicaciones patrimoniales, bien para el Patrimonio Geológico o para el Monumental. Se presenta una propuesta en cada una de ellas para realizar itinerarios geoturísticos, siendo de especial interés las de Cogotas y La Colilla. Simplificadamente, estas dos zonas representan claros ejemplos de zonas de extracción de granito fresco y alterado, respectivamente, con una cantería que ha evolucionado desde la Edad del Hierro en Cogotas, la Edad Media esencialmente en La Colilla, hasta el Siglo de Oro y la actualidad en los alrededores de Cogotas. Los paneles explicativos, trípticos y páginas web elaborados pretenden ser herramientas adecuadas para divulgar los aspectos canteriles y geológicos más destacados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible por una ayuda a la investigación de la Institución Gran Duque de Alba (“Valorización de las canteras históricas de

granito utilizadas para la ciudad de Ávila y provincia: propuesta geoturística y didáctica”) concedida a uno de los autores (F. J. López Moro). Los análisis químicos se obtuvieron, y han sido cedidos para esta publicación, a partir del proyecto de investigación de la Universidad de Salamanca, con referencia 18KAG8/463AC01, 2013 (Miembros del equipo: Miguel López-Plaza, Jacinta García-Talegón, Adolfo C. Íñigo, Eduardo Azofra, Isabel López Fernández y Santiago Vicente Tavera).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZOFRA AGUSTÍN, Eduardo y LÓPEZ-PLAZA, Miguel. “Cambios derivados por el uso del granito de las canteras históricas de Cardeñosa y Mingorría (Ávila) en el paisaje monumental del Centro-Sur de Castilla y León desde el medievo hasta el siglo XVIII”. *Congreso Internacional Nodos del Conocimiento, Universidad, innovación e investigación ante el horizonte 2030*. Resumen, 2021, p. 1121.
- BELLIDO, Félix; CAPOTE, Ramón; CASQUET, César; FUSTER, José María; NAVIDAD, Marina; PEINADO, Mercedes y VILLASECA, Carlos. “Caracteres generales del cinturón hercínico en el sector oriental del Sistema Central Español”. *Cuadernos Geológicos Ibéricos*. 1981, 7, pp. 15-51.
- CABALLERO, José María; CASQUET, César; GALINDO, Carmen; GONZÁLEZ-CASADO, José Manuel; PANKHURST, Robert y TORNOS, Fernando. “Geocronología por el método Rb-Sr de las episenitas de la Sierra de Guadarrama”. *Geogaceta*, 1993, 13, pp. 16-18.
- DEBON, François. y LE FORT, Patrick. “A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications”. *Bulletin de Minéralogie*, 1988, 111, pp. 493-510.
- DIAS, Graciete y LETERRIER, Jacques. “The genesis of felsic-mafic plutonic associations: a Sr and Nd isotopic study of the Hercynian Braga Granitoids Massif (Northern Portugal)”. *Lithos*, 1994, 32, pp. 207- 223.
- GARCÍA CORTÉS, Ángel. “CI085. Silicificaciones y alteraciones del granito en La Colilla”. *Fichas de Lugares de Interés Geológico del IGME* [en línea], <http://info.igme.es/ielig/LIGInfo.aspx?codigo=CI085> [24 septiembre 2022].
- GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio. “Investigación de la concesión San José Artesano nº 817 para establecer las posibilidades de extracción de granito”. SIEMCALSA, Valladolid, 1990.
- GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio y BÁEZ MEZQUITA, Juan Manuel. *La piedra en Castilla y León*. Junta de Castilla y León, 2ª Edición, 2001.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta. *Paleoalteraciones y alteraciones actuales de rocas silíceas: implicaciones*

- en el paisaje y su comportamiento como materiales de construcción*. Tesis Doctoral, Universidad de Salamanca. 1996.
- GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta; VICENTE TAVERA, Santiago; ÍÑIGO, Adolfo Carlos y MOLINA BALLESTEROS, Eloy. "Silicified Granites (Bleeding Stone and Ochre Granite) as Global Heritage Stones Resources from Avila (Central of Spain)". *Geoscience Canada*, 2016, 43, pp. 53-62.
- IGME. "Memoria y Mapa Geológico 1:50000, Hoja 506, Cardeñosa". Madrid, 1982.
- IGME. "Memoria y Mapa Geológico 1:50000, Hoja 531, Ávila de los Caballeros". Madrid, 2008.
- LÓPEZ FERNÁNDEZ, María Isabel. *La arquitectura del siglo XVI en Ávila: La casa de Bracamonte y el patrimonio abulense*. Tesis Doctoral Universidad de Salamanca, 2011.
- LÓPEZ MORO, Francisco Javier, LÓPEZ PLAZA, Miguel. "El monte-isla de La Peña (Salamanca): control litológico y estructural". XXI Reunión Ibérica sobre Patrimonio Geológico en la Región Transfronteriza del Douro. Freixo de Espada à Cinta (Portugal). Interreg IIIA Douro-Douro Sec. XXI, Iberian Meeting about Geological Heritage in the border region of the Douro, 2005, pp. 38-42.
- LÓPEZ-MORO, Francisco Javier; LÓPEZ-PLAZA, Miguel; VASALLO TORANZO, Luis; AZOFRA AGUSTÍN, Eduardo y GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio (eds.). *De los plutones a los monumentos. Un recorrido temático por la piedra del este de Sayago (Zamora): El granito silicificado de Peñausende y la vaugnerita de Arcillo*. Diputación de Zamora, Fundación Florián de Ocampo, 2011.
- LÓPEZ-MORO, Francisco Javier, MORO BENITO, M. Candelas, TIMÓN SÁNCHEZ, Susana M., CEMBRANOS, María Luisa, CÓZAR, Juan. "Constraints regarding gold deposition in episyenites: the Permian episyenites associated with the Villalcampo Shear Zone, central western Spain". *International Journal of Earth Sciences*, 2013, 102, pp. 721-744.
- LÓPEZ-MORO, Francisco Javier; ROMER, Rolf L.; RHEDE, Dieter; FERNÁNDEZ, Agustina; TIMÓN SÁNCHEZ, Susana M. y MORO BENITO, M. Candelas. "Early uranium mobilization in late Variscan strike-slip shear zones affecting leucogranites of central western Spain". *Journal of Iberian Geology*, 2019, 45, pp. 223-243.
- LÓPEZ-PLAZA, Miguel. y AZOFRA AGUSTÍN, Eduardo. "Expansión histórica del Granito de Cardeñosa (Ávila) y tipos de paramento en el Centro-Sur de Castilla y León: relación con las formaciones geológicas". X Congreso de España, *Geotemas*, 2021, pp. 908-911.
- LÓPEZ-PLAZA, Miguel; GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio; LÓPEZ-MORO, Francisco Javier; GONZÁLEZ SÁNCHEZ, María; ÍÑIGO, Adolfo Carlos.; VICENTE TAVERA, Santiago y JIMÉNEZ FUENTES, Emiliano. "La utilización del granito de Los Santos en la ciudad de Salamanca". *Studia Geologica Salmanticensis*, 2009, 45, pp. 7-40.
- LÓPEZ-PLAZA, Miguel; GARCÍA-TALEGÓN, Jacinta; LÓPEZ-MORO, Francisco Javier; GONZÁLEZ SÁNCHEZ, María e ÍÑIGO, Adolfo Carlos. *Geología 2011, un recorrido geológico por Salamanca*. Madrid. Sociedad Geológica de España. 2011 a.
- LÓPEZ-PLAZA, Miguel; LÓPEZ MORO, Francisco Javier; GARCÍA DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio; GARCÍA TALEGÓN, Jacinta y MOLINA BALLESTEROS, Eloy. "Los granitos silicificados del este de Sayago (Zamora)". En LÓPEZ MORO, Francisco Javier; LÓPEZ PLAZA, Miguel; VASALLO TORANZO, Luis; AZOFRA AGUSTÍN, Eduardo y GARCÍA-DE LOS RÍOS COBO, José Ignacio (eds.). *De los plutones a los monumentos: un recorrido temático por la piedra del este de Sayago (Zamora): el granito silicificado de Peñausende y la vaugnerita de Arcillo*. Diputación de Zamora, Fundación Florián de Ocampo, Cuadernos de Investigación, 2011 b, 36, pp. 13-27.
- RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Jesús. "Los procesos técnicos de la cantería durante la segunda Edad del Hierro en el occidente de la Meseta". *Zephyrus*, 2012, LXX, pp. 113-130.
- SUN, Shig-Sheng y MCDONOUGH, William F. "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts. Implications for mantle compositions and processes". En SAUNDERS Andrew D. y NORRIS Michael J (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42, pp. 313-345.