EDAD $^{207}Pb/^{206}Pb$ EN CRISTAL ÚNICO DE CIRCÓN DE LAS ROCAS MÁFICAS Y ULTRAMÁFICAS DEL SECTOR DE GREDOS, BATOLITO DE ÁVILA (SISTEMA CENTRAL ESPAÑOL)

P. Montero[1], F. Bea[1] y T. Zinger[2]

[1]*Departamento de Mineralogía y Petrología, Facultad de Ciencias, Campus Fuentenueva, Universidad de Granada, 18002 Granada. pmontero@ugr.es*

[2]*Institute of Precambrian Geology and Geochronology (RAS), Makarova Emb. 2, 199034 S. Petersburgo, Rusia*

Resumen: Se han datado por el método $^{207}Pb/^{206}Pb$ en cristal único de circón seis cuerpos de rocas máficas y ultramáficas aflorantes en el Sector de Gredos del Batolito de Ávila . Los cuerpos datados son San Martín del Pimpollar, El Arenal, Prado de las Pozas y San Esteban del Valle, en la parte central del batolito, y Becedillas y Sta María del Berrocal en la parte norte. Las edades obtenidas son las siguientes: San Martín del Pimpollar 319 ± 3 Ma, El Arenal 312 ± 2 Ma, Prado de las Pozas 312 ± 5 Ma, San Esteban del Valle 310 ± 3 Ma, Santa María del Berrocal 312 ± 2 Ma y Becedillas 313 ± 3 Ma. Con la excepción de San Martín, ligeramente más antiguo, el resto tiene exactamente la misma edad de 312 Ma. Estas edades son coetáneas o ligeramente más jóvenes que los granitos en que se encuentran encajadas, cuyas edades de circón oscilan entre 311 y 313 Ma. Puesto que la anatexia cortical, datada por el mismo método en Peña Negra (Montero *et al.*, 2004) comenzó hace 355 Ma y tuvo su máximo hace 332 Ma, las edades netamente más jóvenes de las rocas máficas indican que no jugaron un papel esencial en el calentamiento de la corteza de la Zona Centro-Ibérica durante la orogenia Varisca.

Palabras clave: circón, Geocronología, roca máfica, sector de Gredos, Batolito de Ávila, Sistema Central español.

Abstract: Using the single-zircon stepwise evaporation $^{207}Pb/^{206}Pb$ method we have dated six small bodies of mafic and ultramafic rocks from the Gredos Sector of the Avila Batholith. These bodies are: San Martín del Pimpollar, El Arenal, Prado de las Pozas and San Esteban del Valle in the central part of the batholith, and Becedillas and Santa María del Berrocal in the northern part. They yielded the following ages: San Martín del Pimpollar 319 ± 3 Ma, El Arenal 312 ± 2 Ma, Prado de las Pozas 312 ± 5 Ma, San Esteban del Valle 310 ± 3 Ma, Santa María del Berrocal 312 ± 2 Ma and Becedillas 313 ± 3 Ma. Excepting San Martín, slightly older, the rest of mafic bodies yielded exactly the same age of 312 Ma, and are coeval or slightly younger than the granites hosting them, 311-313 Ma. Since crustal anatexis, dated with the same method, began at 355 Ma and peaked at 332 Ma (Montero *et al.*, 2004) we concluded that the mafic magmas played not an essential role to heat until anatexis the crust of Iberia Central Zone during the Variscan orogeny.

Key words: zircon, Geochronology, mafic rock, Gredos Sector, Ávila Batholith, Spanish Central System.

Montero, P., Bea, F. y Zinguer, T. (2004): Edad $^{207}Pb/^{206}Pb$ en cristal único de circón de las rocas máficas y ultramáficas del sector de Gredos, Batolito de Ávila (Sistema Central español). *Revista de la Sociedad Geológica de España,* 17 (3-4): 157-167

El sector de la Sierra de Gredos representa la parte occidental del batolito de Ávila (Bea, 1985) y está compuesto por plutones de granitos y granodioritas fuertemente peralumínicos y grandes complejos anatécticos situados preferentemente a lo largo de la zona axial del batolito. Existen además numerosos cuerpos de pequeño tamaño formados por rocas máficas y ultramáficas, desde cuarzodioritas a cortlanditas, dispersos en los granitoides y las migmatitas (Fig. 1). Estos cuerpos son más abundantes hacia el borde norte del batolito, donde forman alineaciones paralelas a las direcciones Variscas (Bea *et al*., 1999; Franco González y García de Figuerola, 1986).

Las rocas máficas y ultramáficas son volumétricamente muy poco importantes con respecto a la enorme masa de granitoides que conforman el resto del batolito, pero muy significativas por su posible conexión, sujeta a controversia, con la génesis de dichos granitoides. Tradicionalmente las rocas máficas han sido consideradas precursores de los granitoides puesto que sus relaciones de campo con los granitos frecuentemente indican que son anteriores a éstos. Existen, además, dataciones Rb/Sr que parecían confirmar este hecho; así, Pereira *et al.* (1992) asignaron una edad de 416 ± 21 Ma al complejo básico de Prado de las Pozas y Bea *et al*. (1999) una edad de 340 ± 18 Ma a las rocas máficas de Puente del Congosto.

Sin embargo, las relaciones de campo no son concluyentes; las zonas de mezcla entre rocas máficas y granitoides que se observan en algunos afloramientos sugieren que hubo muy poco contraste de viscosidad entre ambos magmas, lo que indicaría que fueron coetáneos. Además, la presencia de minerales de origen claramente cortical como monacita, torita, etc... preservados como inclusiones en olivino y piroxenos de las rocas máficas (Bea *et al*., 1999), indica que estos magmas experimentaron una notable contaminación con materiales corticales y, por tanto, hay que considerar la posibilidad de que las isocronas mencionadas consistan, en realidad, en líneas de mezcla entre un material mantélico con relaciones bajas de Rb/Sr y $^{87}Sr/^{86}Sr$ y un material cortical con relaciones altas de Rb/Sr y $^{87}Sr/^{86}Sr$.

Por esta razón, se realizó una campaña de datación sistemática de los cuerpos máficos mediante el método $^{207}Pb/^{206}Pb$ en cristal único de circón (Kober, 1986; Kober, 1987) —menos proclive a error en caso de posibles mezclas que el método de datación Rb/Sr y capaz de dar edades de cristalización muy precisas (p.ej. Karabinos, 1997)— cuyos primeros resultados presentamos aquí.

Relaciones de campo y petrografía

Los cuerpos de rocas máficas y ultramáficas y rocas relacionadas (frecuentemente tonalitas y dioritas) afloran como enclaves dentro de los granitoides peraluminicos y como intrusiones dentro de las migmatitas de Gredos (p.ej. Bea *et al*., 1999). También aparecen como intrusiones dentro de las metapelitas de alto grado, causando una intensa aureola de migmatización (Franco González y García de Figuerola, 1986). El tamaño de los cuerpos de rocas máficas-ultramáficas oscila entre unos pocos metros y cientos de metros. Los cuerpos mas grandes aparecen zonados, con cortlanditas y hornblenditas en la parte central y tonalitas y granodioritas en la parte externa (Bea *et al*., 1999).

Una característica importante de estas rocas es la intensa hibridación con las granodioritas encajantes, lo que se manifiesta en unos contactos complejos que han llevado con frecuencia a confusión. Así, son relativamente frecuentes las zonas de mezcla (Moreno-Ventas *et al*., 1995), que dan lugar a facies brechoides caracterizadas por la presencia simultánea de megacristales de feldespato potásico y grandes cristales zonados de anfíbol y, en ocasiones, también de ortopiroxeno. Las zonas de mezcla ocurren siempre alrededor de los cuerpos máficos y pueden llegar a tener tamaños decimétricos, aunque frecuentemente son más pequeñas.

Las rocas máficas y ultramáficas presentan una gran variación composicional. Existen cortlanditas (peridotitas con anfíbol y flogopita), gabros cortlandíticos con olivino, anfíbol, ortopiroxeno ± clinopiroxeno y, finalmente, dioritas, cuarzodioritas y tonalitas con anfíbol y biotita. Las rocas son generalmente masivas, sin fábrica, aunque pueden desarrollar foliaciones deformacionales en los bordes externos de los plutones. Las texturas pueden ser granulares, ofíticas o subofíticas y localmente cumuladas, especialmente en los términos

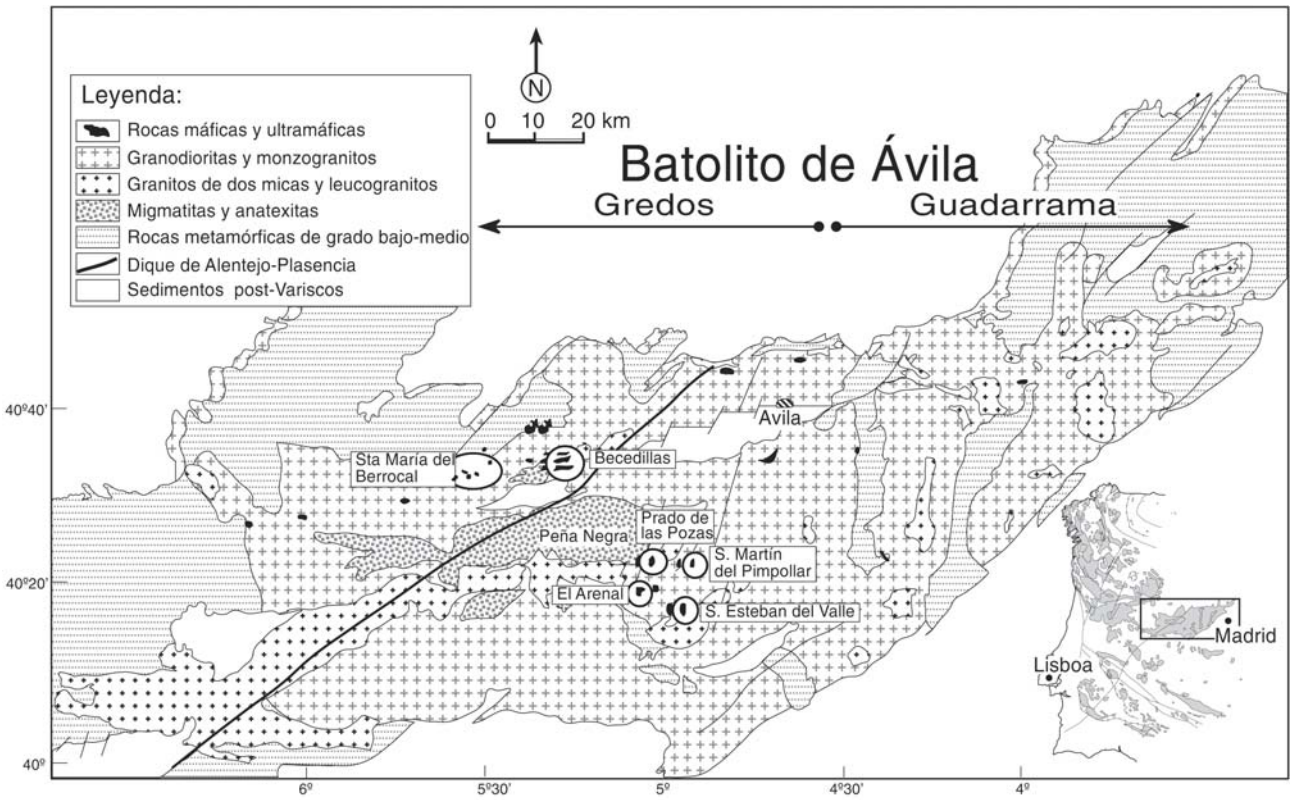

Figura 1.- Esquema geológico del batolito de Ávila (modificado de Bea *et al.*, 1999) y localización de los cuerpos de rocas máficas y ultramáficas datadas.

ultramáficos. El anfíbol y la biotita pueden ser ligeramente porfídicos, y el olivino, al igual que el Ti-anfíbol, presenta texturas coroníticas frecuentes en gabros y cortlanditas. La augita es común en algunos gabros, donde aparece rodeada por anfíbol actinolítico. Las dioritas y cuarzodioritas generalmente contienen sólo biotita y anfíbol como minerales máficos.

Métodos

Las determinaciones de la edad $^{207}Pb/^{206}Pb$ se realizaron por evaporación secuencial de Pb en cristal único de circón (Kober, 1986; Kober, 1987) en el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada, con un espectrómetro de masas Finnigan MAT 262 equipado con multicolector, SEM *(Secondary Electron Multiplier)* y RPQ *(Retarded Potential Quadrupole)*. El procedimiento es como sigue: el grano de circón a datar se monta en un filamento de renio que, dentro del espectrómetro, se sitúa en la posición de evaporación y se calienta hasta que la emisión de ^{206}Pb alcanza una intensidad próxima a 200-400 iones por segundo. El plomo así evaporado se recoge sobre el filamento de ionización, mantenido frío, durante 20-30 min. Se quita la corriente del filamento de evaporación, se calienta el filamento de ionización, y el plomo depositado se analiza en 5 bloques de medidas con 7 barridos de masa por bloque (en total 35 medidas); esto es lo que denominamos un "*step* de evaporación". Una vez medido, se quita la corriente al filamento de ionización y se vuelve a calentar el circón a mayor temperatura que en el paso previo, normalmente incrementando la corriente entre 50 y 100 mA. El plomo depositado se analiza de nuevo, repitiendo el proceso hasta agotar todo el plomo del circón. La adquisición de datos durante cada barrido de masas se realiza en modo dinámico (*jumping mode*) usando un SEM como detector, con la secuencia de masas 206-204-206-207-208. La razón entre las masas 204 y 206 se monitoriza para detectar y, si es necesario, corregir el plomo común. Los factores de corrección del plomo común se calculan por iteración a partir de las razones $^{204}Pb/^{206}Pb$ y $^{204}Pb/^{207}Pb$ del modelo de Stacey y Kramers (1975) para la edad calculada, hasta convergencia a un valor constante. La fraccionación de masas en el detector se corrige multiplicando por $\sqrt{(207/206)}$. Los errores estandares de cada medida se calculan según la fórmula $\boldsymbol{SE} = 2 \times \sigma / \sqrt{\boldsymbol{n}}$; donde s es la desviación estandar y n es el número de medidas. Los errores (2s) en la edad final se calculan de acuerdo con la fórmula $x - t(0{,}025)\sigma\sqrt{n}, x + t(0{,}025)\sigma\sqrt{n}$, donde x y s son la media y la desviación estandar de los *steps* de evaporación medidos, n el número de *steps* y t (0,025) el punto (0,025) superior de la distribución de la t-de student para n-1 grados de libertad (ver Johnson y Bhattacharyya, 1984).

Las dataciones Rb/Sr se han realizado también en el Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada. Para la determinación de las relaciones $^{87}Sr/^{86}Sr$ se atacaron las muestras con HNO_3+HF en cápsulas de teflón y horno microondas, se evaporaron a sequedad y se redisolvieron en HCL 2,5 N. La separación de Rb y Sr se ha realizado en columnas de cambio ionico con resinas BIORAD AG 50 W8 (200-400). Las determinaciones de $^{87}Sr/^{86}Sr$ se han realizado por TIMS (*Thermal Ionization Mass Spectrometry*), con una precision mejor de 0,003% (2s), calculada sobre sucesivas medidas, correspondientes a diferentes ataques, del estandar en polvo WSE (Govindaraju *et al*.,1994). La reproductibilidad sobre sucesivas medidas del standard en disolución NBS-987 es mejor que 0,002% (2s). El blanco de Sr del laboratorio = 0,6 ng. El valor de normalización para $^{87}Sr/^{86}Sr$ ha sido $^{88}Sr/^{86}Sr$ = 8,375209**.** Las medidas se han realizado en modo estático.

Para la determinación de $^{87}Rb/^{86}Sr$ se atacan las muestras de la manera descrita y despues de 3 evaporaciones a sequedad en presencia de HNO_3, el residuo final se disuelve en 100 ml HNO_3 4%. Las determinaciones de Rb y Sr se realizan en un espectrometro ICP-MS Perkin Elmer Sciex Elan-5000. El espectrómetro se calibro frente a disoluciones puras de Rb y Sr ($^{87}Sr/^{86}Sr$=0,707265), de Merck. Las determinaciones se han hecho segun el metodo descrito en Montero y Bea (1988). La precision del método, calculada sobre 10 replicados del estandar WSE es mejor de 1,2% rel. (2s). Los blancos del laboratorio son: Sr = 4.5 ng, Rb = 6.5 ng, (equivalentes a 0,065 y 0,045 ppm en el sólido, respectivamente).

Muestras

Los afloramientos de rocas máficas que se han datado son: San Martín del Pimpollar, El Arenal, San Esteban del Valle y Prado de las Pozas, en la parte central del batolito de Ávila, y Sta. María del Berrocal y Becedillas en la parte norte (Fig. 1):

San Martín del Pimpollar. Se ha recogido una muestra (coordenadas UTM, huso 29: 325.729 - 4.469.288), que corresponde a una tonalita fresca, masiva, ligeramente porfídica con nódulos de biotita y ligeramente hibridizada. Los circones analizados en estas rocas son prismáticos, cortos o largos e idiomórficos, de color amarillo claro o incoloros, siempre transparentes, con un tamaño medio de 250x100 micras.

San Esteban del Valle. Se ha tomado una muestra (322.965 - 4.459.565) de tonalita de grano fino, fresca y masiva. No se observa hibridación. Los circones analizados son prismáticos largos o aciculares, de color pardo oscuro y opacos o amarillos claros y translúcidos, de tamaño medio 300x150 micras los prismáticos y hasta 500 x100 micras los aciculares.
El Arenal. Se han recogido dos muestras (321.489 - 4.459.276): un gabro cortlandítico de grano fino y una tonalita de grano fino y ligeramente porfídica, muy frescas en ambos casos. Ninguna de las dos muestras

Muestra	ACQ	$^{204}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pbc$	edad	error
El Arenal (Gabro cortlandítico)						
Greb-2002	(1)-1	0,0000167	0,0527508	0,0526332	313	9
Greb-2002	(1)-2	0,0000127	0,0529419	0,0528885	324	7
Greb-2002	(1)-3	0,0000061	0,0525469	0,0525678	311	4
Greb-2002	(1)-4	0,0000044	0,0525531	0,0529732	312	7
Greb-2002	(2)-1	0,0000100	0,0524898	0,0589247	306	10
Greb-2002	(4)-1	0,0000269	0,0531955	0,0529316	325	5
Greb-2002	(4)-2	0,0000186	0,0526819	0,0525377	309	5
Greb-2002	(4)-3	0,0000131	0,0526272	0,0525645	310	7
Greb-2002	(5)-1	0,0000156	0,0526992	0,0525979	311	18
Greb-2002	(5)-2	0,0000068	0,0562745	0,0526539	314	9
Greb-2002	(5)-3	0,0000077	0,0525712	0,0525855	311	7
Greb-2002	(5)-4	0,0000104	0,0526774	0,0523522	314	5
Greb-2002	(5)-5	0,0000112	0,0526921	0,0526554	314	4
Greb-2002	(6)-1	0,0000080	0,0525978	0,0526068	312	10
Greb-2002	(6)-2	0,0000026	0,0525417	0,0526302	313	7
Greb-2002	6)-3	0,0000020	0,0523515	0,0524484	305	9
Greb-2002	6)-4	0,0000049	0,0525539	0,0526091	312	7
Greb-2002	6)-5	0,0000042	0,0525289	0,0525933	311	9
Greb-2004	(1)-2	0,0000099	0,0524259	0,0524070	303	4
Greb-2004	(1)-1	0,0000248	0,0527587	0,0525219	308	10
Greb-2004	(1)-3	0,0000087	0,0525564	0,0525559	310	6
Greb-2004	(1)-4	0,0000080	0,0526203	0,0526302	313	7
Greb-2004	(2)-1	0,0000381	0,0530594	0,0526286	313	5
Greb-2004	(2)-2	0,0000479	0,0532898	0,0527166	317	9
Greb-2004	(2)-3	0,0000084	0,0528742	0,0528788	324	9
Greb-2004	(3)-1	0,0000341	0,0529133	0,0525408	309	11
Greb-2004	(3)-2	0,0000092	0,0524957	0,0524866	307	7
Greb-2004	(3)-3	0,0000085	0,0525980	0,0526004	312	6
Greb-2004	(3)-4	0,0000110	0,0527944	0,0527601	318	5
Greb-2004	(5)-1	0,0000139	0,0527144	0,0526390	313	13
Greb-2004	(5)-2	0,0000132	0,0526211	0,0522551	310	21
Greb-2004	(5)-3	0,0000101	0,0526781	0,0526581	314	7
Greb-2004	(4)-1	0,0005249	0,0601140	0,0526135	312	17
Greb-2004	(4)-2	0,0000122	0,0524528	0,0524037	303	4
Greb-2004	(4)-3	0,0000167	0,0525746	0,0524586	306	4
Greb-2004	(4)-4	0,0000194	0,0529190	0,0527639	318	8
Greb-2004	(4)-5	0,0000050	0,0524911	0,0525452	309	6
Greb-2004	(4)-6	0,0000073	0,0525968	0,0526180	312	7
Prado de las Pozas (Dioritas)						
Greb-2010	(1)-1	0,0000127	0,0523990	0,0523407	300	23
Greb-2010	(1)-2	0,0000243	0,0523695	0,0521408	292	10
Greb-2010	(1)-3	0,0000561	0,0535712	0,0528835	323	26
Greb-2010	(5)-1	0,0002332	0,0564329	0,0531519	335	16
Greb-2010	(3)-1	0,0000298	0,0538657	0,0535617	352	19
Greb-2010	(3)-2	0,0001182	0,0553430	0,0537564	360	18
Greb-2010	(3)-3	0,0000180	0,,544104	0,0542802	383	4
Greb-2040	(3)-1	0,0000067	0,0527203	0,0527499	318	16
Greb-2010	(6)-1	0,0001446	0,0543684	0,0523779	302	20
Greb-2010	(6)-2	0,0001681	0,0547331	0,0523994	303	23
Greb-2010	(7)-1	0,0000392	0,0528156	0,0523685	302	20
Greb-2010	(7)-2	0,0000521	0,0530981	0,0524620	306	31
Greb-2010	(7)-3	0,0000235	0,0525486	0,0523311	300	25
Greb-2010	(8)-1	0,0000249	0,0529610	0,0527235	317	9

Viene de página anterior

Muestra	ACQ	$^{204}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pbc$	edad	error
Greb-2010	(8)-2	0,0000128	0,0529274	0,0528670	323	9
Greb-2010	(8)-3	0,0000165	0,0528084	0,0526932	316	11
Greb-2010	(8)-4	0,0000272	0,0532948	0,0530239	330	9
Greb-2010	(9)-1	0,0000046	0,0526219	0,0526372	313	4
Greb-2010	(9)-2	0,0000081	0,0526840	0,0526915	316	3
Greb-2010	(9)-3	0,0000062	0,0526269	0,0526628	314	3
Greb-2010	(9)-4	0,0000056	0,0525253	0,0525701	310	3
Greb-2010	(9)-5	0,0000055	0,0526003	0,0526462	314	4
Sta María del Berrocal (Gabro)						
Greb-2032	(1)-1	0,0000032	0,0526135	0,0526936	316	7
Greb-2032	(1)-2	0,0000055	0,0526392	0,0526848	315	7
Greb-2032	(2)-1	0,0000000	0,0524287	0,0525558	310	23
Greb-2032	(2)-2	0,0000022	0,0526408	0,0527349	317	13
Greb-2032	(3)-1	0,0000169	0,0526761	0,0525557	310	9
Greb-2032	(3)-2	0,0000060	0,0524010	0,0524395	305	7
Greb-2032	(3)-3	0,0000065	0,0525290	0,0525599	310	4
Greb-2032	(3)-4	0,0000097	0,0524350	0,0524185	304	4
Greb-2032	(3)-5	0,0000130	0,0526865	0,0526227	313	6
Greb-2032	(4)-1	0,0000006	0,0524591	0,0525773	311	15
Greb-2032	(4)-2	0,0000029	0,0526205	0,0527052	316	7
Greb-2032	(4)-3	0,0000011	0,0525931	0,0525545	310	5
Greb-2032	(4)-4	0,0000103	0,0525631	0,0525392	309	4
Greb-2032	(5)-1	0,0000077	0,0527040	0,0527176	317	9
Greb-2032	(5)-2	0,0000030	0,0524977	0,0525801	311	7
Greb-2032	(5)-3	0,0000022	0,0524425	0,0525371	309	7
Greb-2032	(5)-4	0,0000020	0,0531637	0,0525382	309	9
Greb-2032	(5)-5	0,0000053	0,0524973	0,0525467	309	7
Greb-2032	(5)-6	0,0000027	0,0526556	0,0527432	318	11
Becedillas (diorita y gabro cortlandítico)						
Greb-2030	(1)-1	0,0000302	0,0530271	0,0527121	316	9
Greb-2030	(1)-2	0,0001885	0,0551697	0,0525389	309	4
Greb-2030	(1)-3	0,0001585	0,0547275	0,0525359	309	4
Greb-2030	(1)-4	0,0001442	0,0545358	0,0524914	307	3
Greb-2030	(2)-1	0,0001017	0,0538020	0,0524406	305	28
Greb-2030	(3)-1	0,0000439	0,0530712	0,0525554	310	4
Greb-2030	(3)-2	0,0000641	0,0536461	0,0528360	322	11
Greb-2030	(3)-3	0,0000685	0,0535399	0,0526642	314	4
Greb-2030	(3)-4	0,0000670	0,0534381	0,0525843	311	18
Greb-2030	(3)-5	0,0000051	0,0525328	0,0525841	311	4
Greb-2030	(3)-6	0,0000051	0,0525095	0,0525614	310	4
Greb-2031	(1)-1	0,0000080	0,0526261	0,0526357	313	14
Greb-2031	(1)-2	0,0000193	0,0528060	0,0526511	314	9
Greb-2031	(1)-3	0,0000142	0,0526076	0,0525266	308	16
Greb-2031	(1)-4	0,0000137	0,0527275	0,0526545	314	11
Greb-2031	(2)-1	0,0007049	0,0627594	0,0525742	310	32
Greb-2031	(2)-2	0,0003717	0,0580141	0,0527040	316	23
Greb-2031	(2)-3	0,0002165	0,0560309	0,0530373	329	11
Greb-2031	(3)-1	0,0000093	0,0527260	0,0527161	317	13
Greb-2031	(3)-2	0,0000017	0,0526994	0,0528015	320	7
Greb-2031	(3)-3	0,0000121	0,0526215	0,0525703	310	33

Tabla I.- Datos isotópicos $^{207}Pb/^{206}Pb$ de los circones de las rocas máficas. $^{207}Pb/^{206}Pbc$ es la relación corregida de plomo común. La edad y el error están en millones de años. ACQ es el número de circón + número de *step* de evaporación (ej.: (2)-1 significa circón 2, step 1).

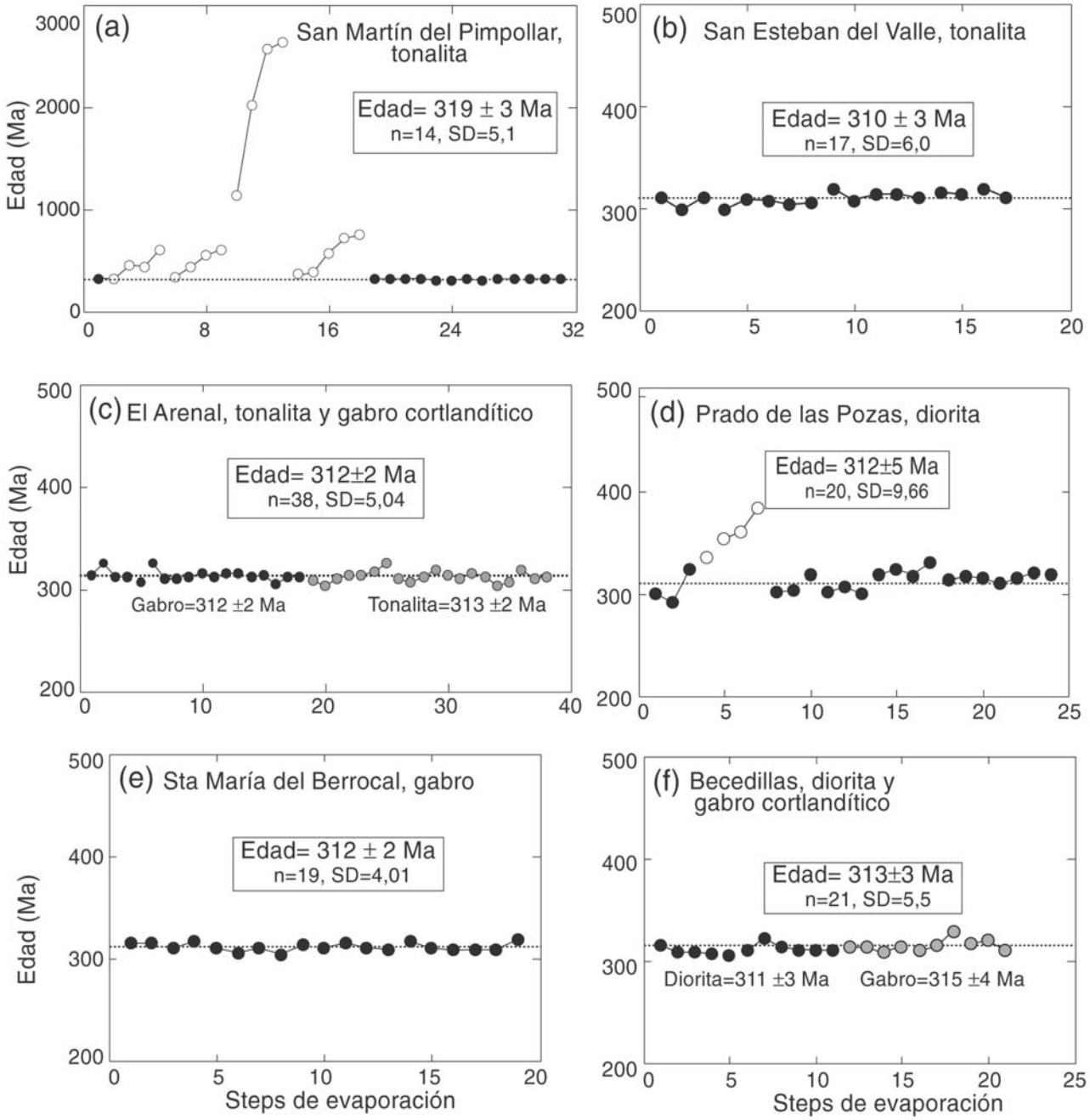

Figura 2.- Edades $^{207}Pb/^{206}Pb$ en cristal único de circón de: (a) 8 circones de la tonalita de San Martín del Pimpollar. Los puntos negros indican *steps* de evaporación correspondientes a edades de borde o edades de cristalización, (b) 5 circones de la tonalita de San Esteban del Valle, (c) 10 circones de las rocas máficas de El Arenal. Los puntos negros corresponden a *steps* de evaporación realizados en los circones de la tonalita y los puntos grises a *steps* de evaporación realizados en los circones del gabro. (d) 8 circones de las dioritas de Prado de las Pozas. (e) 5 circones del gabro de Santa María del Berrocal. (f) 6 circones de las rocas máficas de Becedillas. Los puntos negros corresponden a *steps* de evaporación realizados en los circones de la diorita y los puntos grises a steps de evaporación realizados en los circones del gabro cortlandítico. Los puntos blancos, en todos los casos, corresponden a edades mezcla o edades mínimas de núcleo, que no se han considerado para la determinación de la edad.

presenta hibridación aparente. Los circones analizados en estas dos muestras son prismáticos largos o cortos, no siempre idiomórficos, con color desde ligeramente ahumado, casi transparentes, a pardo oscuro y bastante opacos. El tamaño medio es de 275x150 micras.

Prado de las Pozas. Se han recogido dos muestras (309.127 - 4.460.345) de dioritas de grano fino, poco o nada hibridizadas y muy frescas. Los circones analizados son esencialmente prismáticos largos, con colores desde ahumados y translúcidos, casi trasparentes a pardo oscuro y opacos, de tamaños medio 250x<100 micras.

Santa María del Berrocal. Se ha recogido una muestra (295.885 - 4.487.236) de un gabro de grano fino, masivo, sin orientación y muy fresco. No se aprecia hibridación *in situ*. Los circones analizados son prismáticos o aciculares, idiomórficos, de color amarillo claro o incoloros, siempre transparentes y de tamaño medio 300x150 micras, los prismáticos, y hasta 450x100 micras los aciculares.

Muestra	ACQ	$^{204}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pbc$	edad	error
San Martín del pimpollar						
Greb-2006	(I)(1)-1	0,0000000	0,0523926	0,0525197	308	23
Greb-2006	(II)(2)-1	0,0000225	0,0526827	0,0524792	306	14
Greb-2006	(II)(4)-1	0,0000095	0,0528948	0,0528827	324	5
Greb-2006	(II)(4)-2	0,0000132	0,0526498	0,0525828	311	5
Greb-2006	(II)(4)-3	0,0000617	0,0533260	0,0525501	309	3
Greb-2006	(II)(4)-4	0,0000507	0,0532289	0,0526139	313	4
Greb-2006	(I)(3)-1	0,0000411	0,0529916	0,0525161	308	14
Greb-2006	(I)(3)-2	0,0000215	0,0526206	0,0524317	304	4
Greb-2006	(I)(3)-3	0,0000206	0,0527850	0,0526102	312	4
Greb-2006	(I)(3)-4	0,0000211	0,0527545	0,0525717	310	5
Greb-2006	(I)(3)-5	0,0000210	0,0527535	0,0525732	310	3
Greb-2006	(I)(3)-6	0,0000229	0,0527939	0,5258599	311	4
Greb-2006	(I)(4)-1	0,0000201	0,0528658	0,0526981	316	16
Greb-2006	(I)(4)-2	0,0000155	0,0527953	0,0526961	316	9
Greb-2006	(I)(4)-3	0,0000125	0,0527572	0,0527013	316	25
El Arenal						
Greb-2037	(1)-1	0,0000129	0,0526746	0,0526118	312	11
Greb-2037	(1)-2	0,0000149	0,0526612	0,0525701	310	16
Greb-2037	(1)-3	0,0000412	0,0534245	0,0529492	327	9
Greb-2037	(2)-1	0,0000120	0,0526030	0,0525537	310	18
Greb-2037	(2)-2	0,0000251	0,0527563	0,0525147	308	20
Greb-2037	(2)-3	0,0000384	0,0533755	0,0529412	326	16
Greb-2037	(2)-4	0,0000879	0,0541763	0,0530181	330	29
Greb-2037	(3)-1	0,0000553	0,0535133	0,0528316	322	20
Greb-2037	(4)-1	0,0000255	0,0532242	0,0529783	328	9
Greb-2037	(4)-2	0,0000068	0,0527607	0,0527888	320	35
Greb-2037	(5)-1	0,0000332	0,0530278	0,0526683	315	15
Greb-2037	(6)-1	0,0000315	0,0529461	0,0526117	312	6
Greb-2037	(6)-2	0,0000404	0,0528409	0,0523762	302	9
Greb-2037	(6)-3	0,0000441	0,0531433	0,0526241	313	9
Greb-2037	(6)-4	0,0000450	0,0533515	0,0528212	321	9
Greb-2037	(7)-1	0,0000177	0,0527672	0,0526346	313	11
Greb-2037	(7)-2	0,0000207	0,0527379	0,0525610	308	11
Greb-2037	(7)-3	0,0000113	0,0526676	0,0526289	313	9
Prado de las Pozas						
Greb-2009	(1)-1	0,0000843	0,0543601	0,0532559	340	17
Greb-2009	(1)-2	0,0001286	0,0552824	0,0535318	351	29
Greb-2009	(1)-3	0,0000752	0,0553456	0,0543795	387	12
Greb-2009	(1)-4	0,0000397	0,0553677	0,0549213	409	7
Greb-2009	(1)-5	0,0000272	0,0567209	0,0564610	471	14
Greb-2009	(1)-6	0,0000939	0,0575072	0,0562756	463	7
Greb-2009	(1)-7	0,0002340	0,0595000	0,0562292	461	20
Greb-2009	(1)-8	0,0000113	0,0108641	0,1087506	1778	3
Greb-2009	(3)-1	0,0000813	0,0544127	0,0533523	344	29
Greb-2009	(3)-2	0,0000088	0,1163003	0,1164575	1902	12
Greb-2009	(8)-1	0,0000390	0,0529350	0,0524906	307	9
Greb-2009	(11)-1	0,0000423	0,0531786	0,0526861	315	9
Greb-2009	(11)-2	0,0000158	0,0528480	0,0527354	317	11
Greb-2009	(13)-1	0,0000313	0,0529887	0,0526580	314	14
Greb-2009	(13)-2	0,0000221	0,0526769	0,0524794	306	22
Greb-2009	(13)-3	0,0000352	0,0529846	0,0525968	311	18
Greb-2009	(13)-4	0,0000205	0,0529799	0,0528067	321	7
Greb-2009	(13)-5	0,0000187	0,0528444	0,0526970	316	4
Greb-2009	(13)-6	0,0000261	0,0529182	0,0526625	314	7

Tabla II.- Datos isotópicos $^{207}Pb/^{206}Pb$ de los circones de las granodioritas de San Martín del Pimpollar, El Arenal y Prado de las Pozas. $^{207}Pb/^{206}Pbc$ es la relación corregida de plomo común. La edad y el error están en millones de años. ACQ es el número de circón + número de *step* de evaporación (ej.: (2)-1 significa circón 2, step 1).

Becedillas. Se han recogido dos muestras (304.511 - 4.491.364): un gabro cortlandítico con fenocristales de anfíbol y flogopita y una matriz fina muy oscura, y una diorita de grano medio-grueso, relativamente leucocrática, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol. Las dos muestras estaban muy frescas y presentan una hibridación aparente nula o muy ligera. Los circones analizados son redondeados, prismáticos o aciculares, incoloros o ligeramente ahumados, todos ellos transparentes, con un tamaño en torno a 250x150 micras y hasta 450x75 micras los aciculares.

Además, se ha datado el encajante granítico en tres de los puntos anteriores; San Martín del Pimpollar, El Arenal y Prado de la Pozas. En los tres casos se trata de monzo-

granitos o granodioritas alóctonas de la Superfacies HO (Hoyos del Espino (Bea, 1985)).

Resultados

Las rocas máficas

San Martín del Pimpollar

Se han analizado 8 circones de las tonalitas, 4 de ellos han dado una edad uniforme de núcleo a borde y otros 4 han dado edades distintas en núcleos y bordes, debido a la presencia de núcleos restíticos. En los 4 circones sin núcleo se han realizado 13 *steps* de evaporación que, junto con una edad de borde realizada en uno de los 4 circones con núcleo, dan una edad media de cristalización de 319 ± 3 Ma. Los núcleos heredados dan edades mínimas de 608, 612, 749 y 2.642 Ma, respectivamente, y edades progresivamente más jóvenes hacia los bordes, que corresponden a edades mezcla, sin significado geológico alguno (tabla I y Fig. 2a).

San Esteban del Valle

Se han estudiado 5 circones de la tonalita, todos ellos han dado edades uniformes de núcleo a borde. En estos 5 circones se han realizado un total de 17 *steps* de evaporación, que dan una edad media de cristalización de 310 ± 3 Ma (tabla I y Fig. 2b).

El Arenal

Se dataron dos muestras: una tonalita y un gabro cortlandítico. En la tonalita se han analizado 5 circones en los que se han realizado 20 *steps* de evaporación. Todos los circones han dado edades uniformes de núcleo a borde, cuya media es 312 ± 2 Ma. En el gabro se han analizado otros 5 circones, en los que se han realizado 18 *steps* de evaporación. Todos los circones han dado también una edad uniforme de núcleo a borde. La media de estos 18 *steps* da una edad de 313 ± 2 Ma.

Puesto que ambas rocas dan una edad idéntica, consideramos que la edad media de las rocas máficas de este cuerpo es 312 ± 2 Ma, que representa la media de los 38 *steps* de evaporación realizados en las dos rocas (tabla I y Fig. 2c).

Prado de las Pozas

Se han datado dos muestras de la diorita, de las que se han analizado 8 circones de una muestra y uno de la otra. Siete de estos circones han dado edades uniformes de núcleo borde, en ellos se han realizado 20 *steps* de evaporación, que dan una edad media de 312 ± 5 Ma. De los otros dos circones uno ha dado una edad de 335 y el otro una edad mínima de núcleo de 383 y el resto edades mezcla (tabla 1 y Fig. 2d).

Santa María del Berrocal

Se han analizado 5 circones, todos ellos han dado edades uniformes de núcleo a borde y en ellos se han realizado 19 *steps* de evaporación, que dan una edad media de cristalización de 312 ± 2 Ma (Fig. 2e).

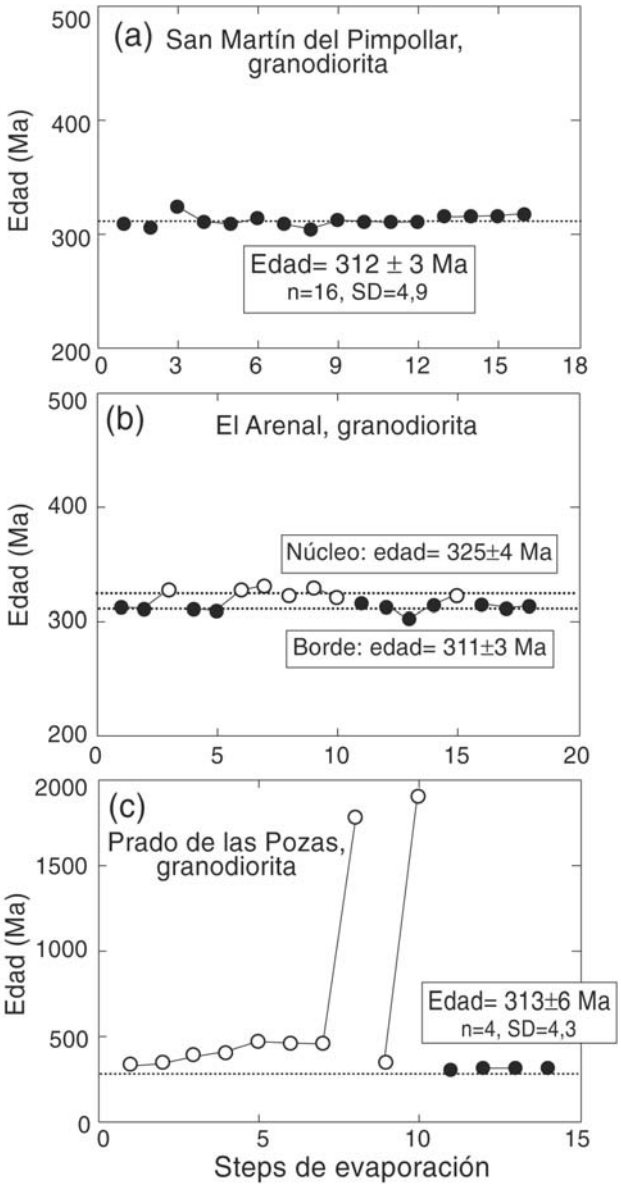

Figura 3.- Edades $^{207}Pb/^{206}Pb$ de las granodioritas de: (a) San Martín del Pimpollar, (b) El Arenal y (c) Prado de las Pozas.

Becedillas

Se han datado dos muestras de rocas máficas: una diorita y un gabro cortlandítico. En cada una de las muestras se han analizado 3 circones. En el gabro se han realizado 11 *steps* de evaporación, que dan una edad media de 311 ± 3 Ma y en el gabro cortlandítico se han realizado 10 *steps* de evaporación, que dan una media de 315 ± 4 Ma. Puesto que la edad de ambas rocas es idéntica, la edad media de los 21 *steps* de evaporación realizados en los 6 circones de las dos muestras es 313 ± 3 Ma (tabla 1 y Fig. 2f).

El encajante

Granodiorita de San Martín del Pimpollar

Se han analizado 5 cristales de circón, todos ellos han dado edades uniformes de núcleo a borde, lo que descarta la existencia de núcleos restíticos. En estos 5 cir-

Muestras	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$
El Arenal		
GREB-2000	0,706	0,709371
GREB-2001	0,601	0,709102
GREB-2002	1,290	0,712737
GREB-2003	1,245	0,712054
GREB-2004	1,127	0,711825
San Martín del pimpollar		
GREB-2011	0,873	0,709734
GREB-2013	1,271	0,712548
GREB-2014	2,353	0,718915
GREB-2015	2,390	0,718944
GREB-2016	2,455	0,719344

Tabla III.- Datos isotópicos Rb/Sr de las rocas máficas de El Arenal y San Martín del Pimpollar.

cones se han realizado un total de 16 *steps* de evaporación, que dan una edad media de cristalización de 312 ± 3 Ma (tabla II y Fig. 3a).

Granodiorita del Arenal

Se han analizado 7 cristales de circón en los que se han realizado 18 *steps* de evaporación. Los núcleos de los circones tienden a dar edades ligeramente más antiguas que los bordes. La edad de los bordes es de 311 ± 3 Ma, idéntica a la de las rocas máficas adyacentes (tabla II y Fig. 3b). La edad de los núcleos es de 325 ± 4, idéntica a su vez a la edad Rb/Sr de la granodiorita del Arenal, 327 ± 8 Ma, obtenida en muestras recogidas lejos de la rocas máficas (Bea *et al*., 1999).

Granodiorita del Prado de las Pozas

Se han analizado 5 circones, tres han dado una edad uniforme de núcleo a borde y dos contenían un núcleo restítico. En los 3 circones sin núcleo se han realizado 4 *steps* de evaporación, que dan una edad media de 313 ± 6 Ma. Los dos circones con núcleo han dado edades mínimas de núcleo de 1.778 y 1.902 Ma, respectivamente, y el resto se consideran edades mezcla sin significado geológico (tabla II y Fig. 3c). Una datación previa por Rb/Sr en zonas vecinas de la misma unidad arrojó un resultado de 317 ± 13 Ma (Bea *et al*., 1999), indistinguible de la edad de circón.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran, sin género de dudas, que las rocas máficas del Sector de Gredos no son precursores, tal como los denominaron Bea *et al*. (1999), sino que son coetáneos, o incluso ligeramente más jóvenes que las granodioritas en que se encuentran enclavadas.

La importantísima hibridación con material cortical, no sólo a nivel de afloramiento, sino también más profundo, como se verá más adelante, causa que las proyecciones en coordenadas $^{87}Sr/^{86}Sr$ *vs* $^{87}Rb/^{86}Sr$ no sean isocronas, sino líneas de mezcla. Para poner este hecho de relieve hemos llevado a cabo análisis Rb-Sr en dos de los cuerpos de rocas máficas que presentan suficiente variación petrográfica, San Martín del Pimpollar y El Arenal (tabla III). En San Martín se han analizado un gabro magnesiano, dos dioritas y dos tonalitas, y en El Arenal dos cortlanditas, dos gabros magnesianos y una tonalita. Los resultados muestran edades de 422 Ma para San Martín, cuya edad de circón es 319 ± 3 Ma (Fig. 4a) y de 364 Ma para el Arenal (Fig. 4b), cuya edad de circón, muy precisa, es de 312 ± 2 Ma. Es importante resaltar que San Martín, el cuerpo más heterogéneo y en el que los fenómenos de mezcla son más evidentes, es también el que muestra mayor diferencia entre las edades de circón y Rb/Sr, y donde la composición isotópica de las rocas máficas converge más claramente hacia la de las granodioritas encajantes, debido precisamente a su mayor grado de hibridación.

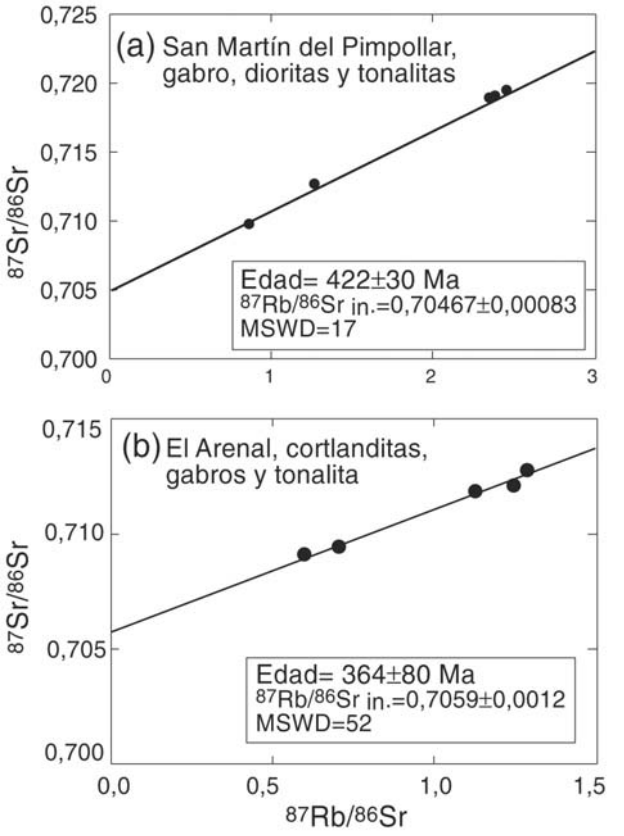

Figura 4.- Líneas de regresión $^{87}Rb/^{86}Sr$ *vs* $^{87}Sr/^{86}Sr$ de las granodioritas de: (a) San Martín del Pimpollar y (b) El Arenal.

Una cuestión muy interesante es la procedencia de los circones, bastante abundantes, de las rocas máficas. En rocas como las cortlanditas, que contienen abundantísimo anfíbol modal y concentraciones de circonio inferiores a 100 ppm, no cabe esperar la presencia de abundante circón modal, debido a la elevada solublidad del circonio en los anfíboles (Adam *et al*., 1993; Fujinawa y Green, 1997). Sin embargo contienen circón. Ocurre, además, que las rocas máficas presentan una plétora de minerales accesorios típicamente corticales como monacita, torita, xenotima o uraninita que, a diferencia del circón, sólamente se encuentran preservados como inclusiones en olivino, piroxeno y Ti-anfíbol y son, obviamente, de origen cortical (ver Bea *et al*., 1999). Es posible, por tanto, que algunos circones hayan sido transferidos como fases sólidas desde el material cortical asimilado. Sin embargo, la uniformidad de edades desde el borde hasta el núcleo indica que estu-

vieron en total equilibrio isotópico con el magma que los hospedaba. En nuestra opinión, este hecho puede explicarse asumiendo que el calor consumido por la asimilación de material cortical se obtuvo del calor latente de cristalización de primocristales, sobre todo anfíbol. La lenta cinética de disolución del circón (Watson, 1996) produjo un desfase entre la incorporación de éste al fundido y la cristalización de anfíbol, de tal manera que cuando las concentraciones de circonio en el fundido alcanzaron su máximo, la cristalización de anfíbol ya estaba substituida por la de flogopita, lo que posibilitó la reprecipitación de circón con unas características composicionales y morfológicas propias.

Un caso especial son las tonalitas de San Martín del Pimpollar, puesto que es el único caso en que se han encontrado núcleos antiguos en los circones. Curiosamente, los circones de las granodioritas encajantes son muy homogéneos, por lo que no pueden provenir de éstas. Resulta notable, además, que las edades de los núcleos sean siempre mayores de 600 Ma, incluso Arcaicos (Fig. 2a). Nuestro trabajo previo en las migmatitas de Peña Negra, posible protolito de las granodioritas (Bea *et al*., 2003; Montero *et al.*, 2004), ha puesto de manifiesto que éstas raramente contienen circones más antiguos que 600 Ma. Es posible, por tanto, que los circones de las tonalitas de San Martín provengan de la asimilación, en un nivel cortical más profundo, de materiales del Complejo Esquistograuváquico no fértil (ver Bea *et al*., 2003).

La edad de todos los cuerpos datados, excepto San Martín, es muy uniforme, 312 Ma. Si comparamos este dato con las edades Variscas registradas en las migmatitas de los complejos anatécticos, que van desde 355 a 300 Ma, con un máximo en torno a 332 Ma (Montero *et al*., 2004), está claro que la intrusión de la rocas máficas ocurrió no menos de 40 millones de años después del comienzo de la migmatización y en torno a 20 millones de años después de que la producción de fundidos anatécticos alcanzase su máximo. Esto descarta el que las rocas máficas hayan jugado un papel esencial en el calentamiento cortical que causó la anatexia, y apunta a que la intrusión de la rocas máficas en el Sector de Gredos fue un fenómeno muy localizado en el tiempo cuyo significado todavía no se entiende por completo.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. González Casado, editor de la SGE y al Dr. Villaseca, así como a un revisor anónimo, la constructiva revisón del manuscrito y sus útiles comentarios, que han contribuido a mejorar este trabajo. Este trabajo ha sido subencionado por los Proyectos PB-98 1345 (CICYT), BTE2002-04618-C02-01 (MCyT) y proyecto NATO Collaborative Grant EST-CLG-978997.

Referencias

Adam, J., Green, T.H. y Sie, S.H. (1993): Proton Microprobe Determined Partitioning of Rb, Sr, Ba, Y, Zr, Nb and Ta Between Experimentally Produced Amphiboles and Silicate Melts with Variable F Content. *Chemical Geology*, 109: 29-49.

Bea, F. (1985): Los granitoides hercínicos de la mitad occidental del Batolito de Avila (Sector de Gredos). Aproximación mediante el concepto de superfacies. *Revista de la Real Academia de Ciencias Físicas, Exactas y Naturales de Madrid*, 79: 549-572.

Bea, F., Montero, P. y Molina, J.F. (1999): Mafic precursors, peraluminous granitoids, and late lamprophyres in the Ávila batholith: A model for the generation of Variscan batholiths in Iberia. *Journal of Geology*, 107: 399-419.

Bea, F., Montero, P. y Zinger, T. (2003): The nature and origin of the granite source layer of Central Iberia: Evidence from trace element, Sr and Nd isotopes, and zircon age patterns. *Journal of Geology*, 111: 579-595.

Franco González, M.P. y García de Figuerola, L.C. (1986): Las rocas básicas y ultrabásicas en el extremo occidental de la Sierra de Ávila (Provincias de Ávila y Salamanca). *Studia Geologica Salmanticensis*, 23: 193-219.

Fujinawa, A. y Green, T.H. (1997): Partitioning behaviour of Hf and Zr between amphibole, clinopyroxene, garnet and silicate melts at high pressure. *European Journal of Mineralogy*, 9: 379-391.

Govindaraju, K., Potts, P.J., Webb, P.C. y Watson, J.S. (1994): 1994 Report on Whin Sill Dolerite WS-E from England and Pitscurrie Micrograbbro PM-S from Scotland: assessment by one hundred and four international laboratories. *Geostandards Newsletters*, 18: 211-300.

Johnson, R. y Bhattacharyya, G. (1984): *Statistics. Principles and Method*. John Wiley & Sons, New York, 578 p.

Karabinos, P., (1997). An evaluation of the single-grain zircon evaporation method in highly discordant samples. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 2467-2474.

Kober, B. (1986): Whole-grain evaporation for $^{207}Pb/^{206}Pb$-age investigations on single zircons using a double filament thermal ionization source. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 93: 482-490.

Kober, B. (1987): Single-zircon evaporation combined with Pb+ emitter-bedding for $^{207}Pb/^{206}Pb$ age investigations using thermal ion mass spectrometry and implications to zirconology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 96: 63-71.

Montero, P. y Bea F. (1988): Accurate determination of $^{87}Rb/^{86}Sr$ and $^{147}Sm/^{144}Nd$ ratios by inductively-coupled-plasma mass spectrometry in isotope geoscience: an alternative to isotope dilution analysis. *Analytica Chimica Acta*, 358: 227-233.

Montero, P., Bea, F., Zinger, T., Scarrow, J., Molina, J.F. y Whitehouse, M. (2004): 55 million years of continuous anatexis in Central Iberia: Single zircon dating of the Peña Negra Complex. *Journal of the Geological Society of London*, 161: 255-264.

Moreno-Ventas, I., Rogers, G. y Castro, A. (1995): The role of hybridization in the genesis of Hercynian granitoids in the Gredos Massif, Spain: Inferences from Sr-Nd isotopes. *Contributions to Mineralogy and*

Petrology, 120: 137-149.

Pereira, M.D., Ronkin, Y. y Bea, F. (1992): Dataciones Rb/Sr en el Complejo Anatéctico de la Peña Negra (Batolito de Ávila, España Central): Evidencias de magmatismo pre-hercínico. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 5: 129-134.

Stacey, J.S. y Kramers, J.D. (1975): Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207-221.

Watson, E.B. (1996): Dissolution, growth and survival of zircons during crustal fusion: Kinetic principles, geological models and implications for isotopic inheritance. *Translations of the Royal Society of Edinburg-Earth Sciences*, 87: 43-56.

Manuscrito recibido el 23 de febrero de 2004
Aceptado el manuscrito revisado el 20 de mayo de 2004