



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

## Estudio Geológico y Metalogenético del Basamento Precámbrico del Sáhara Occidental

Saleh Lehib Nayem

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

## 6.4. EL PROTEROZOICO DEL DOMINIO DE SFARIAT-BU DAIRA: GEOQUIMICA DE ROCA TOTAL Y GEOCRONOLOGÍA

### 6.4.1. INTRODUCCION

En el dominio del Sfariat-Bu Daira hay una gran diversidad de rocas, pero el análisis de todas ellas queda lejos de los objetivos y de los medios disponibles para la realización de la tesis; de este modo, por el momento se dispone tan sólo de los datos analíticos de una población de muestras selectas empleadas para datación. Con todo, antes de proceder a estudiar las características geoquímicas de estas rocas, es preciso señalar que el estudio petrográfico de las mismas ya nos indica que todas estas rocas se encuentran afectadas en mayor o menor grado por diversos procesos de metamorfismo, además de presentar un cierto grado de deformación. Por añadidura, muchas de ellas presentan superpuestos fenómenos de alteración hidrotermal causados por la actividad de fluidos relacionados con las cizallas tardías. Todo ello implica una superposición de procesos que han modificado repetidamente la composición química original de muchas de estas rocas, por lo que los resultados por fuerza deben ser contrastados con los datos de petrografía obtenidos con microscopía de luz transmitida y reflejada.

Teniendo en cuenta todas estas limitaciones, en este apartado presentaremos datos geoquímicos de análisis de roca total y de elementos traza de una muestra de gabbro y dos de granitoides. El tratamiento de los datos geoquímicos obtenidos con GCDkit 4.00 (Janoušek et al., 2015) ha servido para valorar

diferentes diagramas de clasificación, así como de normalización de REE y elementos traza.

### 6.4.2. CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS PLUTÓNICAS

En primer lugar, se ha representado algunas de las rocas de la zona, a efectos de clasificación, en el diagrama TAS de Middlemost (1994) para las rocas plutónicas (fig. 6.6.1). Como puede apreciarse, la

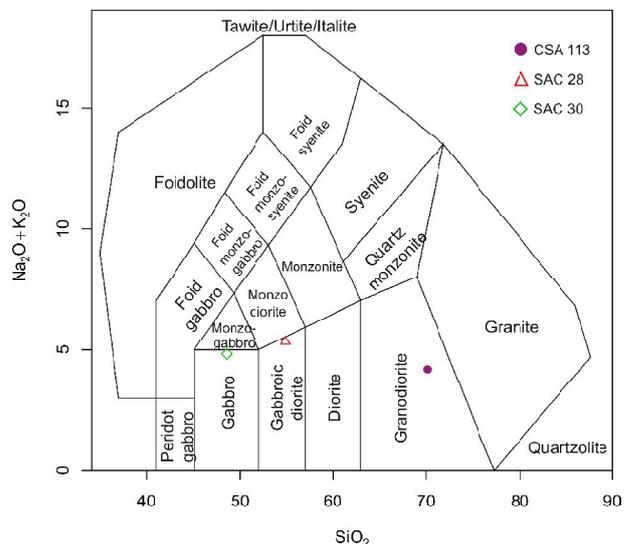


Figura 6.6.1. Representación de los análisis químicos de rocas ígneas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama TAS de Middlemost (1994).

Figure 6.6.1. Representation of the chemical analyses of igneous rocks from the Sfariat-Bu Daira zone in the TAS diagram of Middlemost (1994).



alcalinos de lo esperable y que no se corresponden de ninguna manera con la mineralogía actual de la roca, lo que puede ser la consecuencia de un proceso de alteración hidrotermal, como puede serlo el asociado a las cizallas. En el caso de la tonalita la presencia de abundante clinopiroxeno en la tonalita también debe modificar el quimismo teórico de la roca, al aumentar el parámetro R2 y disminuir a la vez el R1. Por tanto, el uso de estos elementos mayores debe tomarse con cuidado, no sólo en cuanto a la clasificación de la roca sino también en cuanto a la obtención de datos de sus ambientes de formación.

### 6.4.3. GEOQUIMICA DE LAS ROCAS IGNEAS

#### 6.4.3.1. Geoquímica de elementos mayores

Por otra parte, se ha realizado el análisis normativo de las rocas ígneas disponibles del dominio de Sfariat-Bu Daira utilizando asimismo la norma CIPW calculada mediante las hojas de cálculo GCDkit 4.00 (Janoušek et al., 2015).

Para la discriminación geoquímica de los granitoides de la zona se ha utilizado los diagramas convencionales. En primer lugar, todas las rocas ígneas analizadas hasta el momento en la zona de Sfariat-Bu Daira tienen afinidades metalumínicas según el diagrama  $A/CNK-A/NK$  en los campos definidos por Shand (1943), como puede verse en la fig. 6.6.3.

En el diagrama AFM propuesto por Irvine y Baragar (1971), parecería que las rocas de la zona de Sfariat-Bu Daira deberían mostrar un carácter calcoalcalino, con un progresivo enriquecimiento en álcalis desde la diorita a la tonalita, lo cual sería congruente con una evolución calcoalcalina.

En el caso de la anortosita, no obstante, aunque se trata de un punto aislado y que debe considerarse separadamente del resto, como puede apreciarse daría valores más alcalinos de los esperables para este tipo de rocas, pero ello se debe simplemente al hecho de que se trata de una roca cumular en un contexto en el que previamente han precipitado

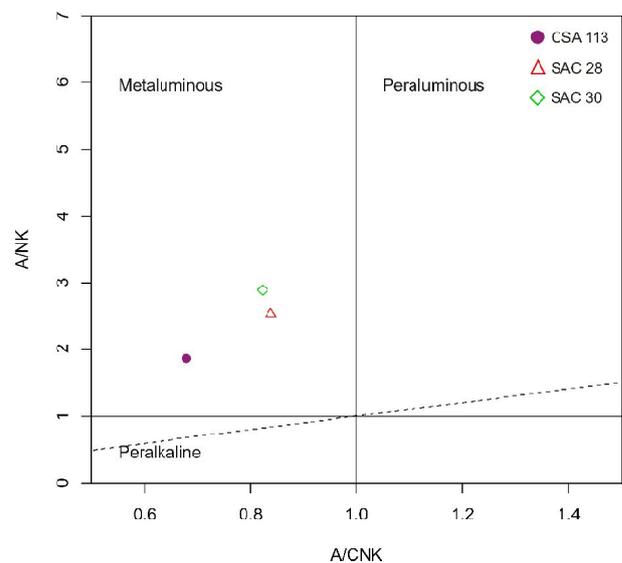


Figura 6.4.3. Representación binaria de los datos geoquímicos de algunas rocas ígneas de Sfariat-Bu Daira en el diagrama  $A/CNK-A/NK$  de Shand (1943).

Figure 6.4.3. Binary plot of the geochemical data of some igneous rocks from Sfariat-Bu Daira in the normative diagram  $A/CNK-A/NK$  (Shand, 1943).

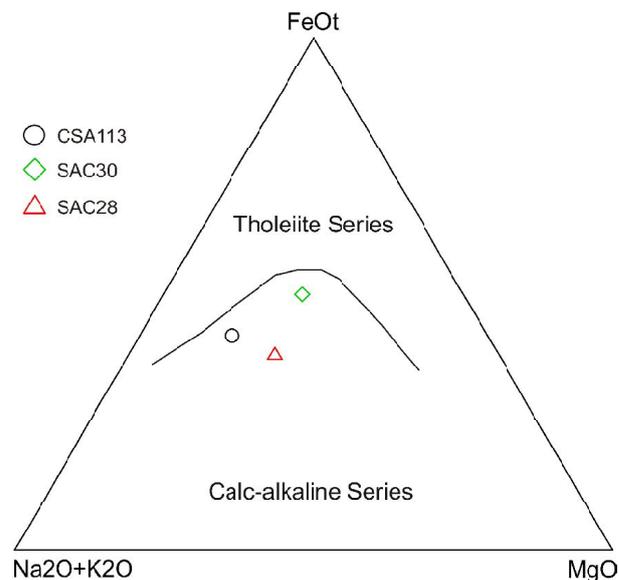


Figura 6.4.4. Representación ternaria de los datos de la norma CIPW de los granitoides de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama AFM de Irvine y Baragar (1971). Se marca los límites de los campos calcoalcalino y tholeiítico de Irvine y Baragar (1971).

Figure 6.4.4. Ternary plot of the normative CIPW data of the granitoids of the Sfariat-Bu Daira domain in the AFM diagram by Irvine and Baragar (1971). The limits of the calc-alkaline and tholeiitic fields, after Irvine and Baragar (1971).

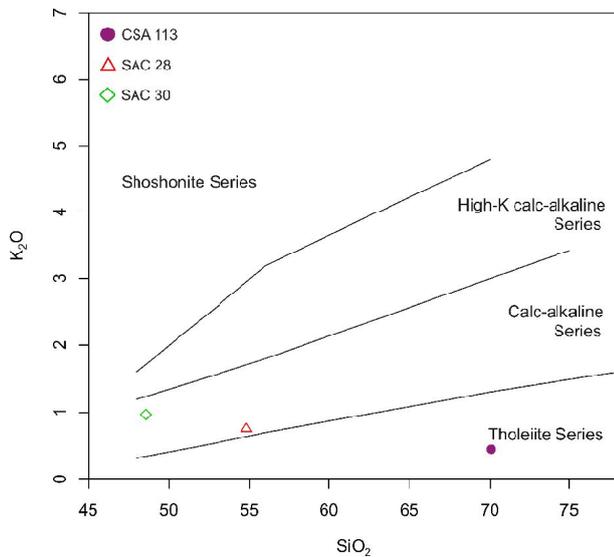


Figura 6.4.5. Representación de los análisis de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{K}_2\text{O}$  de algunas de las rocas ígneas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama de Peccerillo y Taylor (1976) para la discriminación de series tóleíticas, calcoalcalinas y shoshoníticas.

Figure 6.4.5. Representation of the analyses of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{K}_2\text{O}$  of some of the igneous rocks from the Sfariat-Bu Daira domain in the diagram of Peccerillo and Taylor (1976) used for the discrimination between tholeiitic, calc-alkaline and shoshonitic series.

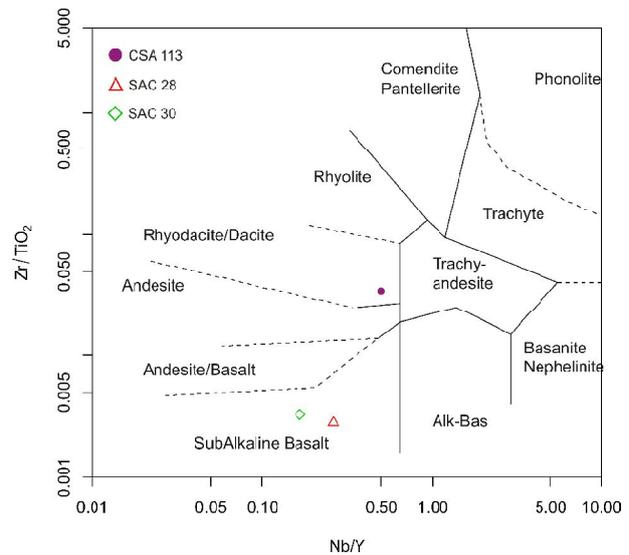


Figura 6.4.6. Representación de los análisis de algunas de las rocas ígneas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama de discriminación  $(\text{Nb}/\text{Y})-(\text{Zr}/\text{TiO}_2)$  utilizable para rocas alteradas (Winchester y Floyd, 1977).

Figure 6.4.6. Representation of the analyses of some of the igneous rocks from the Sfariat-Bu Daira domain in the discrimination diagram  $(\text{Nb}/\text{Y})-(\text{Zr}/\text{TiO}_2)$  suitable for altered rocks (Winchester and Floyd, 1977).

minerales ricos en Mg, Fe y Ca, por lo que esta roca aislada no es la más adecuada para ser representada en este diagrama (fig.6.4.4).

Para clasificar el grado de alcalinidad de las rocas se usó el diagrama  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}_2\text{O}$  de Peccerillo y Taylor (1976). Como se puede apreciar, las muestras están representadas en los campos tóleítico y calcoalcalino (Fig 6.4.5).

#### 6.4.3.2. Datos de elementos traza

Para los casos en que se sospeche que puedan haberse dado alteraciones hidrotermales que hayan modificado la composición de los elementos mayores originales puede representarse los datos de algunos elementos traza considerados

teóricamente como inmóviles durante los procesos de alteración hidrotermal en los diagramas propuestos a este fin por Winchester y Floyd (1977) y por Pearce (1996).

En el primer gráfico de discriminación  $((\text{Nb}/\text{Y})-(\text{Zr}/\text{TiO}_2))$  de Winchester y Floyd, (1977) puede distinguirse que las rocas clasificadas petrográficamente como tonalitas se representan en el campo de las riodacitas-dacitas, que vendrían a ser equivalentes volcánicos de granodioritas-tonalitas (fig. 6.4.6). Por consiguiente, es posible que el decalaje de los elementos mayores se deba a que la roca ha sufrido algún tipo de alteración hidrotermal. Cabe tener en cuenta que se observa un cierto cizallamiento con algo de desarrollo de cuarzo microcristalino en las fracturas.

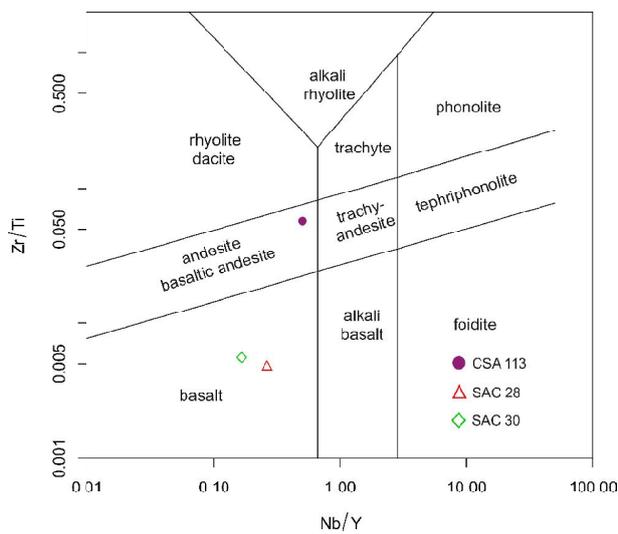


Figura 6.4.7. Representación de los análisis de algunas de las rocas plutónicas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama de discriminación  $(Nb/Y)-(Zr/Ti)$  utilizable para rocas volcánicas equivalentes alteradas (Pearce, 1996).

Figure 6.4.7. Representation of the analyses of some of the plutonic rocks from the Sfariat-Bu Daira domain in the  $(Nb/Y)-(Zr/Ti)$  discrimination diagram suitable for the equivalent altered volcanic rocks (Pearce, 1996).

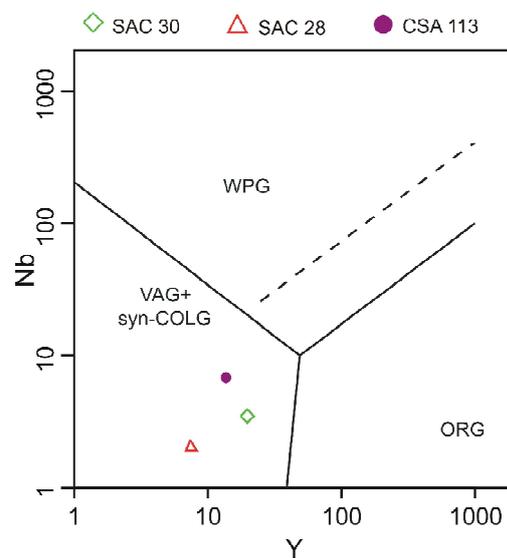


Figura 6.4.8. Representación de los análisis de algunas de las rocas plutónicas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama de discriminación  $Nb-Y$  utilizable para rocas graníticas, incluso las alteradas (Pearce, 1996).

Figure 6.4.8. Representation of the analyses of some of the plutonic rocks from the Sfariat-Bu Daira domain in the  $Nb-Y$  discrimination diagram suitable for the granitic rocks, even those altered (Pearce, 1996).

Por su parte, las anortositas y la diorita se representan en el campo basáltico, lo que en términos de clasificación plutónica supondría que estas rocas corresponderían a gabros (fig. 6.4.6). En este sentido, cabe tener en cuenta que estas dioritas son modalmente muy ricas en minerales máficos, particularmente en hornblenda.

En el segundo gráfico (fig. 6.4.7), similar conceptualmente al anterior, de discriminación  $(Nb/Y)-(Zr/Ti)$  de Pearce (1996) puede observarse un comportamiento similar al anteriormente citado, excepto en que la tonalita se representa más bien en el campo andesítico, y que los gabros y dioritas se representan en el campo basáltico.

Por otra parte, algunos de los elementos traza considerados como inmóviles han sido usados clásicamente para discriminar el

ambiente geotectónico de formación de los magmas. Entre ellos, han tenido mucho éxito y se utilizan muy frecuentemente para los granitoides varios diagramas, destacando entre los mismos los gráficos binarios de Pearce (1986).

En el primero de los gráficos de elementos traza (gráfico  $Nb-Y$ , fig. 6.4.8) puede verse que las rocas graníticas (tonalita y diorita) analizadas para la zona de Sfariat-Bu Daira podrían corresponder a granitos de arco volcánico o a granitos sin-colisionales. El análisis químico de trazas de los gabros de la misma zona del complejo de Bir Malhat sugiere que también estas rocas se habrían formado en un dominio geotectónico similar, aunque evidentemente no queda claro si podrían corresponder a un episodio magmático más antiguo.

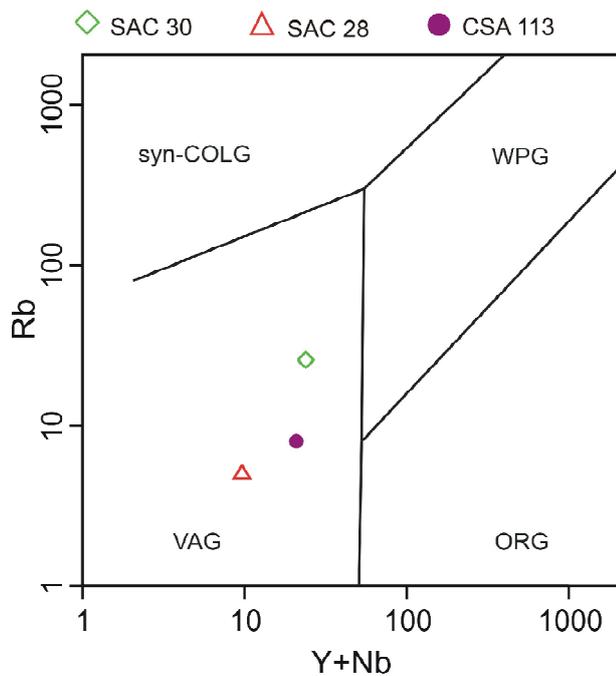


Figura 6.4.9. Representación de análisis de algunas rocas plutónicas de Sfariat-Bu Daira en el diagrama Rb-(Y+Nb) (Pearce, 1996).  
 Figure 6.4.9. Representation of analyses of some plutonic rocks from Sfariat-Bu Daira in the Rb-(Y+Nb) diagram (Pearce, 1996).

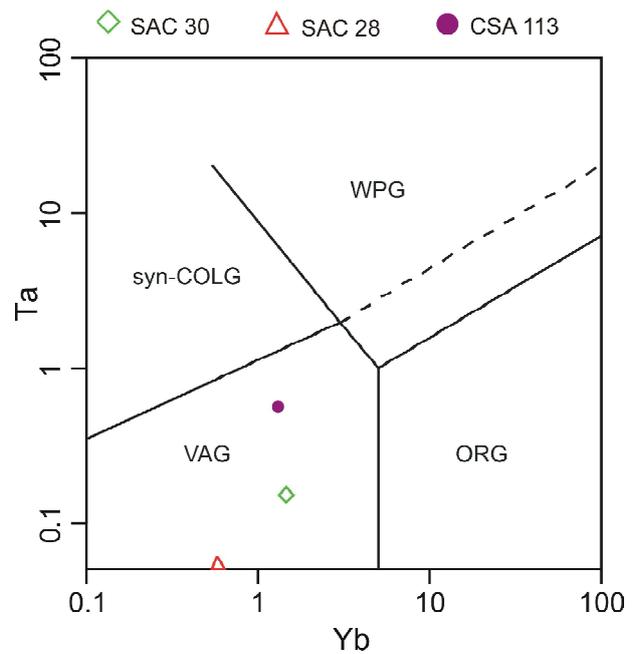


Figura 6.4.10. Representación de análisis de algunas rocas plutónicas de Sfariat-Bu Daira en el diagrama Ta-Yb (Pearce, 1996).  
 Figure 6.4.10. Representation of analyses of some plutonic rocks from Sfariat-Bu Daira in the Ta/Yb diagram (Pearce, 1996).

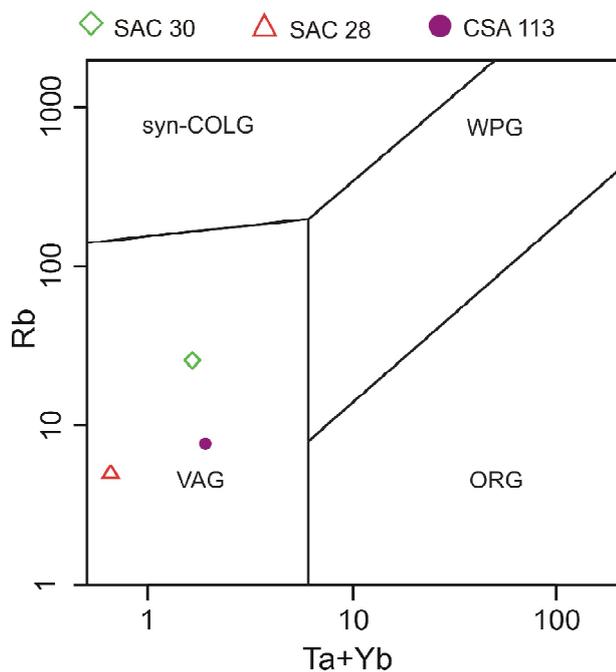


Figura 6.4.11. Representación de los análisis de algunas rocas plutónicas de Sfariat-Bu Daira en el diagrama Rb-(Ta+Yb) (Pearce, 1996).  
 Figure 6.4.11. Representation of analyses of some plutonic rocks from Sfariat-Bu Daira in the Rb-(Ta+Yb) diagram (Pearce, 1996).

Similares resultados (fig. 6.4.9) se obtienen usando el gráfico de Rb-(Y+Nb) de Pearce (1996).

En cambio, usando los diagramas de Ta/Yb y de Rb/(Ta+Yb) los resultados se separan del campo sincolisional y quedan dentro del dominio de granitos de arco volcánico, por consiguiente asociados con procesos de subducción (fig. 6.4.10 y 6.4.11).

Ello podría ser congruente con la presencia en la misma zona de rocas volcánicas comunes en contextos de arcos volcánicos, de composición basáltica a riolítica. Por consiguiente, estas dioritas y tonalitas, y posiblemente los granitos y las granodioritas contemporáneas, podrían ser los equivalentes plutónicos de las abundantes manifestaciones volcánicas que se han cartografiado en la cobertera de la zona. Todo ello sería además congruente con la tendencia calcoalcalina definida en estas rocas plutónicas.

En cuanto al gabro, su composición de elementos traza sugiere asimismo que podría

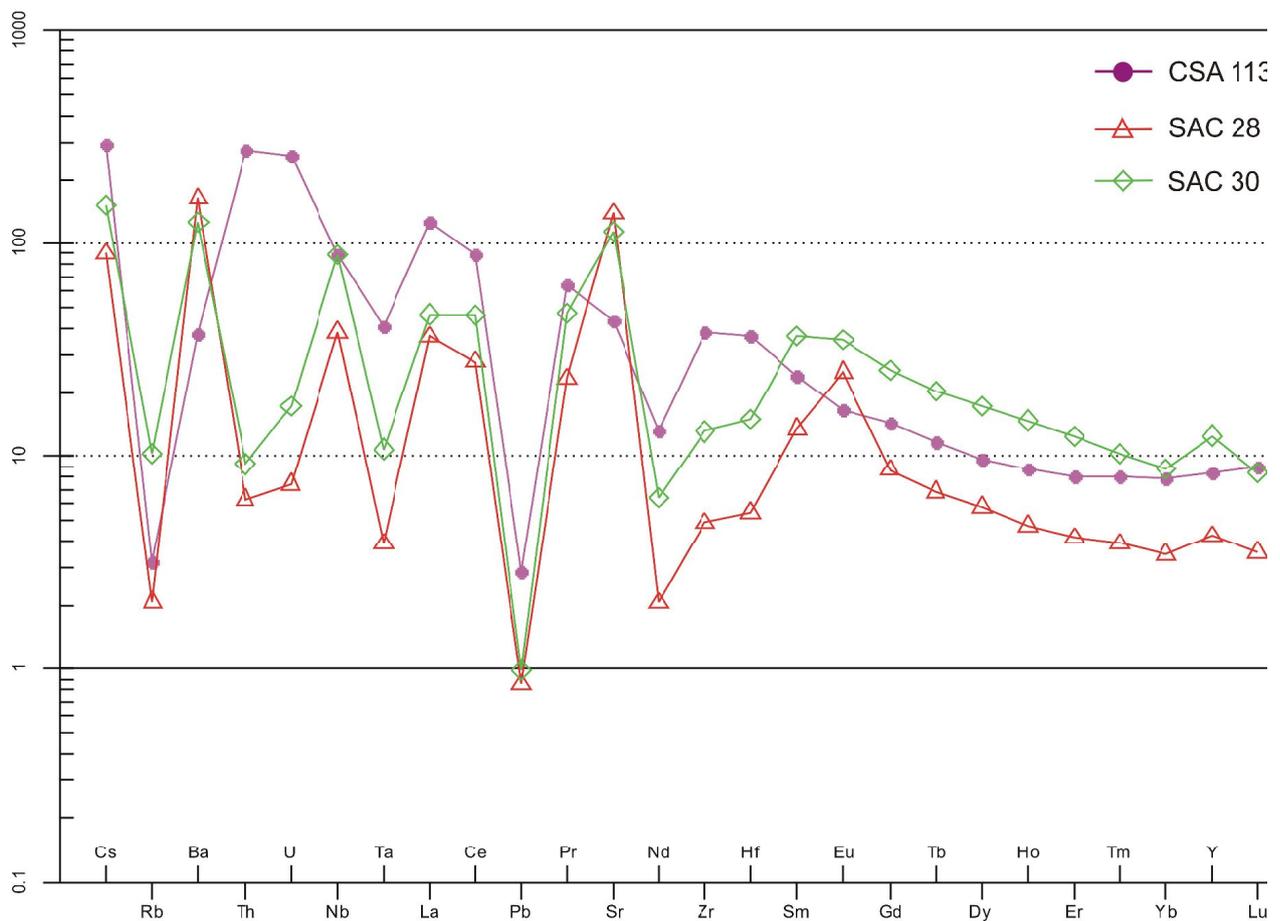


Figura 6.4.12. Representación de los análisis multielementales (spider) de granitoides y gabroanortositas de la zona de Sfariat-Bu Daira en el diagrama de normalización respecto a condritos (con los datos de Sun y Mc Donough, 1989).

Figure 6.4.12. Representation of the multielemental analyses (spider) of the granitoids and gabbroanorthosites from the Sfariat-Bu Daira zone in the chondrite normalization diagram (data from Sun and McDonough (1989).

haberse formado en un contexto de arco volcánico, aunque este dato debe mantenerse en reserva.

Todos estos resultados son muy preliminares y deben ser corroborados con un muestreo mucho más amplio.

En cuanto a los datos de elementos traza en análisis multielemental, se ha realizado la normalización respecto a condrito (fig. 6.4.12). Como puede apreciarse, no se distinguen las típicas anomalías negativas en Nb y Ti, relacionadas clásicamente con una formación en arcos magmáticos (por ejemplo, Murphy, 2007).

Ahora bien, aunque no queda claro con estos gráficos que estas rocas correspondan a procesos

de subducción, no deja en cambio de ser llamativo que los patrones de elementos traza tengan muchas similitudes entre las rocas graníticas metamorizadas en grado bajo y las rocas gabroicas del basamento metamorizado en facies anfibolitas.

No obstante, es evidente que para una correcta interpretación de los procesos petrogenéticos o incluso para la clasificación hacen falta los análisis geoquímicos de muchas más muestras de rocas ígneas procedentes de esta zona.

En cuanto al diagrama de REE, se ha realizado la normalización en base a condritos según la calibración de McDonough et al. (1989; véase fig. 6.4.13).

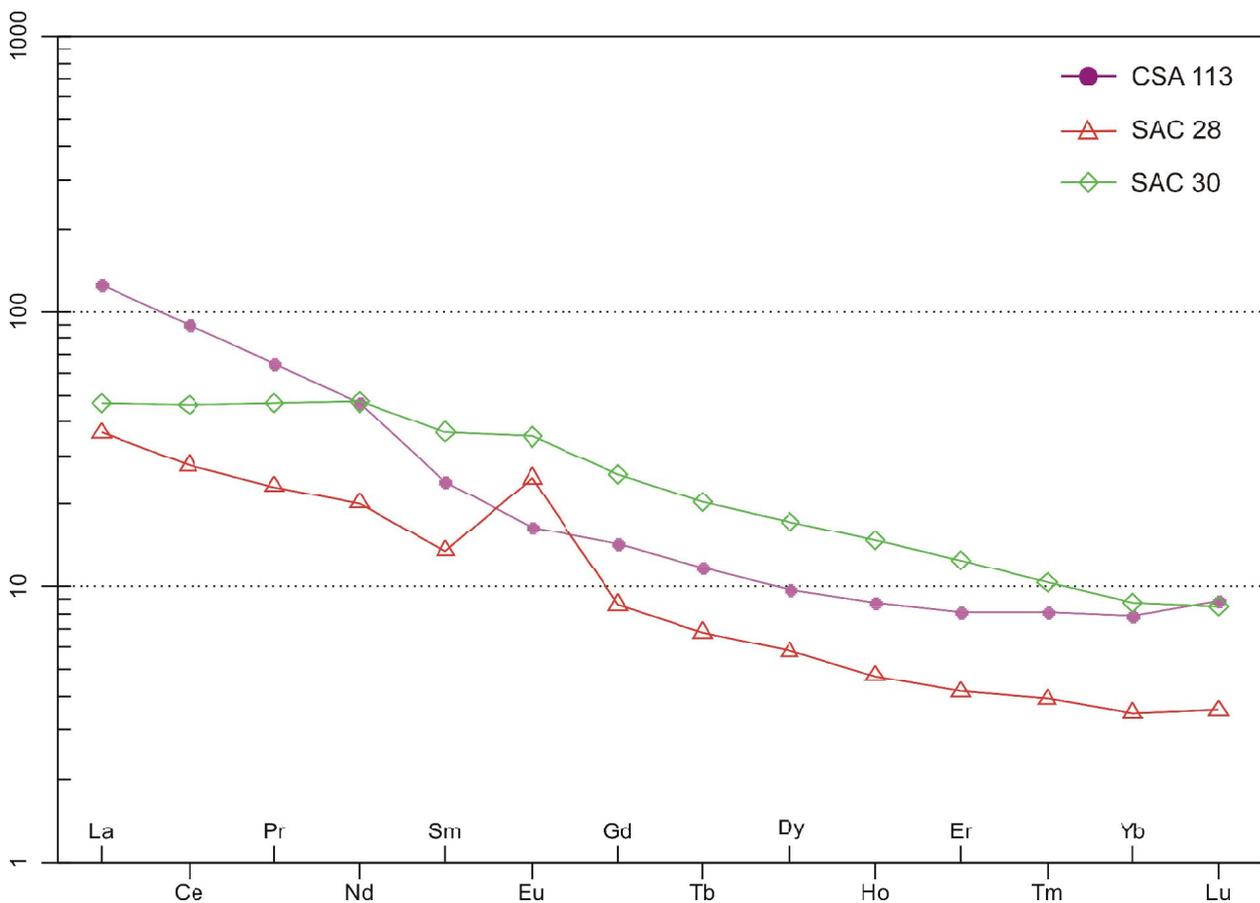


Figura 6.4.13. Representación de los análisis de REE de algunas rocas ígneas de la zona de Sfariat-Bu Daira, normalizados en base a condrito según la calibración de McDonough et al. (1991).

Figure 6.4.13. Representation of the analyses of the REE of algunas rocas ígneas from the Sfariat-Bu Daira zone, normalized on the basis of chondrite values after the calibration of McDonough et al. (1991).

En la muestra de gabbro SAC28 se aprecia una anomalía positiva de Eu que podría ser el resultado de procesos de cristalización fraccionada en una cámara magmática, relacionada con la cristalización masiva de las plagioclasas en los cumulos de anortositas, aunque debe tenerse precaución al tratarse de una sola muestra desvinculada del resto y, además, en un contexto metamorfozido en grado medio en facies de las anfibolitas.

Por su parte, los espectros de REE de los granitoides presentan ligeras pendientes de la relación La/Lu. En el caso de la muestra de diorita (SAC30) hay una ligera anomalía geoquímica positiva de Eu y MREE que podría estar relacionada con la cristalización de abundante anfíbol en la roca, y la ligera pendiente plana en las HREE en el caso de las

tonalitas (muestra Csa113) podría deberse a la presencia de clinopiroxeno.

## 6.4.4. GEOCROLOGÍA

### 6.4.4.1. Introducción

En el dominio del Sfariat-Bu Daira parte de los materiales quedan en Mauritania y parte en el Sáhara Occidental, si bien la mayor parte quedan en este país. Existen muy pocos datos hasta ahora sobre estos materiales en Mauritania, donde no se han definido las mismas unidades al mismo nivel de detalle que en el Sáhara. De hecho, en Mauritania no se ha definido un basamento y una cobertera, si bien los últimos trabajos realizados por el

USGS ya apuntan evidencias en este sentido, destacando que algunas dataciones de rocas gneísicas en la zona de fallas de la cordillera de Bu Daira, datadas anteriormente como Paleoproterozoicas, podrían corresponder a rocas más antiguas metamorfizadas durante el Paleoproterozoico. En este caso, posiblemente la edad obtenida corresponda a la edad de la deformación, en este caso, las cizallas. De hecho, como hemos visto anteriormente repetidamente, en las listwánitas no es raro encontrar zircón o monazita, y estos minerales de ningún modo estarían presentes originalmente en la roca ultrabásica alterada, por lo que los fluidos hidrotermales asociados con las cizallas habrían depositado zircón y esa sería la edad de las cizallas.

Se ha realizado un primer intento de datación de los materiales de la unidad de Sfariat-Bu Daira en el Sáhara Occidental a partir del análisis de U/Pb en concentrados de zircón en algunas de las rocas más representativas de la zona.

#### 6.4.4.2. Resultados

Así pues, se dataron algunos de los granitoides de la zona estudiada, concretamente una muestra de dioritas (SAC 30, de un gran afloramiento de diorita al sur de Agarazraz Lajdar; fig. 6.4.14) y una muestra de tonalita (CSA113, de un afloramiento entre las fallas de Mug El Kelb y Saasaiat, fig. 6.4.15). Se han obtenido edades bastante fiables de  $2064,9 \pm 13$  Ma para las dioritas y de  $2098,4 \pm 15$  Ma para las tonalitas.

Estos resultados han sido comparados con los de Schofield et al. (2006) en Mauritania (fig. 6.4.16). Como puede verse, los resultados de estos autores son bastante similares a los nuestros, y permiten definir un estadio regional de magmatismo calcoalcalino del Paleoproterozoico fechado alrededor de 2100 Ma (Rhyaciense-Orosiriense) asociado por tanto con la orogenia Birimiana (o Eburneana).

Por desgracia, el complejo de gabros de Bir Malhat no pudo ser datado mediante el método de U/Pb en zircón al no haberse encontrado cristales de zircón en estas rocas.

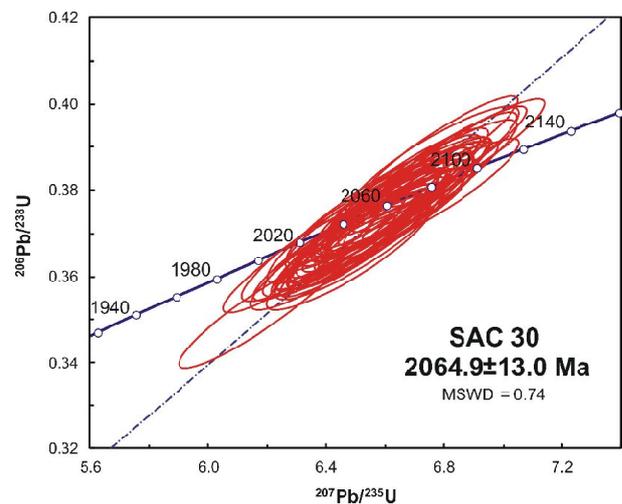


Figura 6.4.14. Representación de la concordia para análisis de U/Pb en zircón en la muestra de diorita SAC30 de Sfariat.

Figure 6.4.14. Concordia plot for the zircon U/Pb analyses from the Sfariat diorite (SAC30).

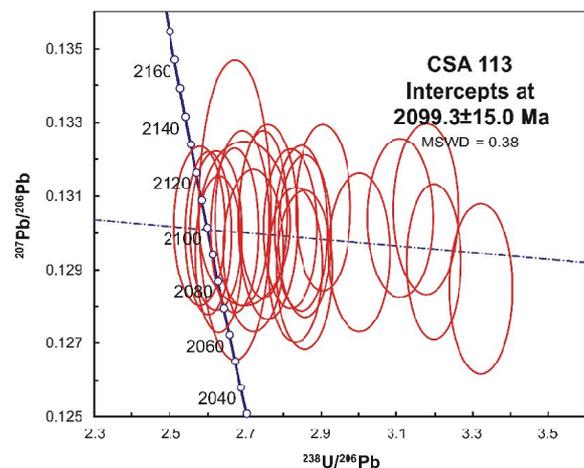
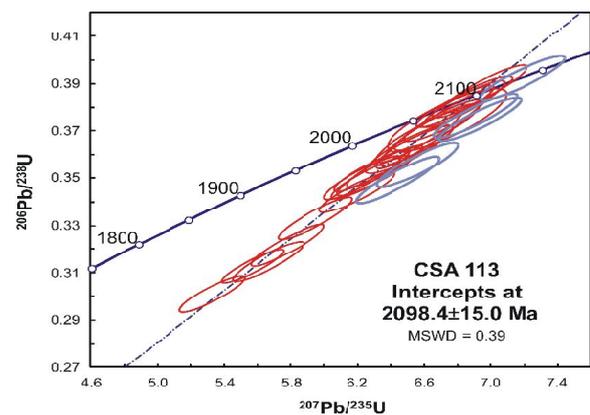


Figura 6.4.15. Representación de la concordia para análisis de U/Pb en zircón en la muestra de tonalita CSA113 de Sfariat.

Figure 6.4.15. Concordia plot for the zircon U/Pb analyses of the Sfariat tonalite CSA113.

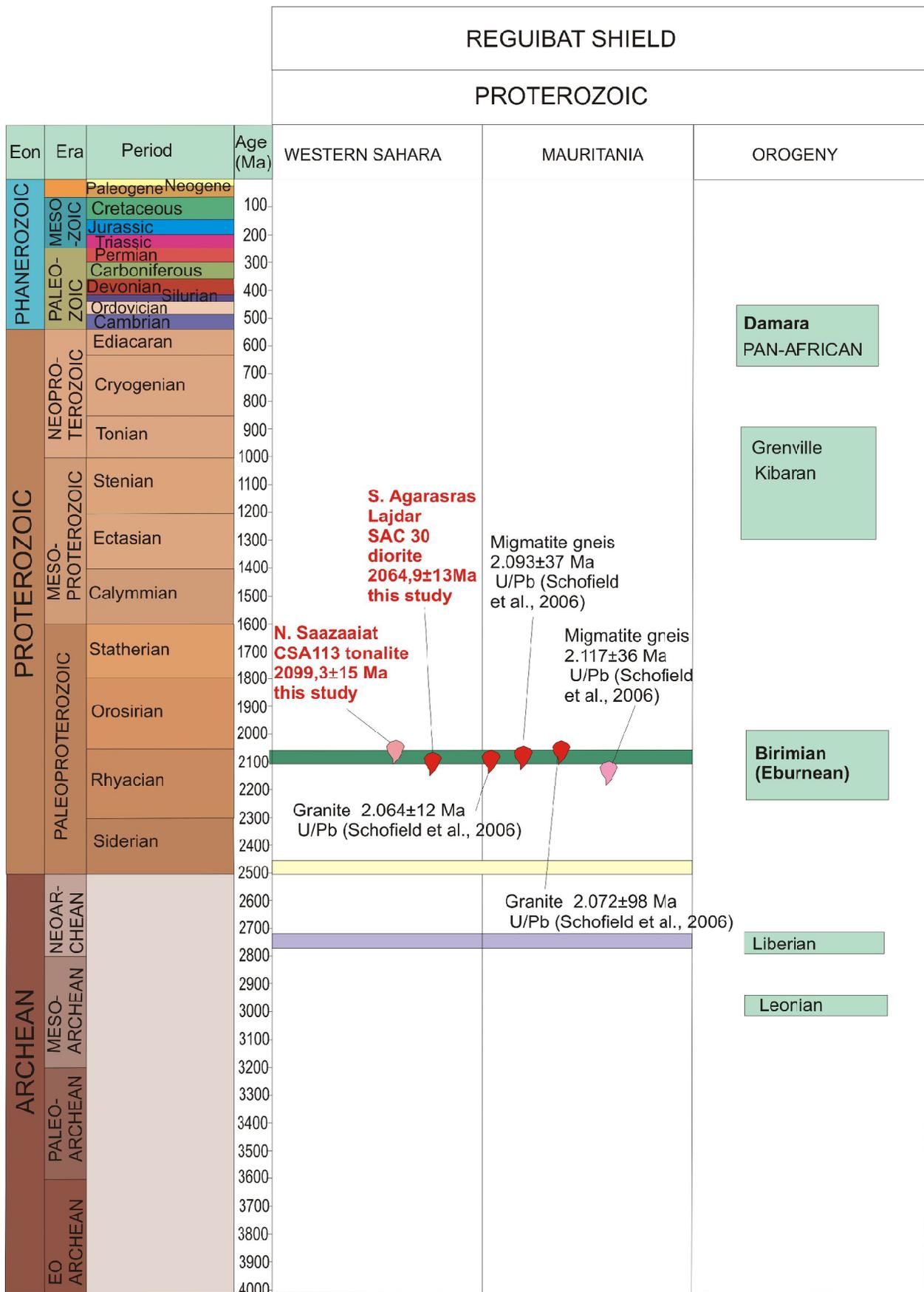


Figura 6.4.16. Representación de las dataciones U/Pb disponibles en el dominio de Sfariat-Bu Daira, y comparación con los resultados obtenidos en la parte del dominio que está en Mauritania.  
 Figure 6.4.16. Representtion of the available U/Pb data in the Sfariat-Bu Daira domain, and comparison with the obtained results in the Mauritanian part of the domain.

#### **6.4.4.3. Discusión para una historia geológica de la zona**

Por tanto, se puede extrapolar que en este sector hubo un magmatismo asociado a un arco magmático volcánico durante el Paleoproterozoico. Este arco tendría su expresión profunda en los plutones de granitoides calcoalcalinos y su expresión superficial en el volcanismo bimodal de basaltos y riolitas. Posiblemente la zona de Sfariat en buena parte correspondiera a un dominio continental y el arco magmático podría haber estado aparentemente orientado en dirección NW-SE, si tenemos en cuenta la mayor densidad de granitos que hay en la zona de Sfariat en comparación con la zona de Miyec-Ijil.

La edad del magmatismo gabroico-anortosítico de Sfariat, con el importantísimo complejo estratificado de Bir Malhat, queda

como una incógnita por el momento. Estos materiales están intruidos por los granitoides y deben ser anteriores a los mismos, y además están afectados por metamorfismo en grado medio que no se encuentra presente en los materiales claramente del arco del Paleoproterozoico. Ni en el Sáhara Occidental ni en Mauritania se han realizado hasta el momento, por desgracia, dataciones de estos materiales.

No obstante, en este sector pueden existir también materiales oceánicos, si se demuestra que los afloramientos de peridotitas de Agarazraz Lajdar pueden ser ofiolíticos, si bien se desconoce la edad de los mismos.

Tampoco se conoce la edad del magmatismo de afinidad boninítica de esta zona, ni la edad de las diabasas. Es posible que el magmatismo boninítico corresponda a un estadio de diques asociado con la formación del arco.

