



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio Geológico y Metalogenético del Basamento Precámbrico del Sáhara Occidental

Saleh Lehibb 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) i a través del Dipòsit Digital de la UB (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) y a través del Repositorio Digital de la UB (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) service and by the UB Digital Repository (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.

CAPITULO 10

**CONSIDERACIONES
FINALES**

10.1.DISCUSIÓN

10.1.1. INTRODUCCIÓN

Como se ha indicado en cada capítulo, por el momento son todavía insuficientes las dataciones de que se dispone en el Sáhara Occidental para realizar una completa interpretación de la historia geológica. No obstante, se puede apuntar algunos datos o, como mínimo, plantear diversas posibilidades, que deben ser contrastadas.

Una herramienta que puede ser útil a la hora de reconstruir esta historia geológica es comparar los datos geocronológicos y litoestratigráficos disponibles del Sáhara con los de las zonas vecinas. No obstante, tampoco es muy abundante la información de la que se dispone por el momento en estas regiones, como Mauritania y Argelia. Por ello, hemos intentado plasmar en una única tabla toda la información geocronológica disponible sobre el Sáhara y sobre las zonas limítrofes (fig. 10.1.1). No obstante, como puede verse en esta misma tabla, la información de la que se dispone en estos países es muy selectiva, estando sobrerrepresentados algunos eventos (particularmente, el magmatismo ácido), mientras que no se sabe nada de la mayoría de procesos.

Por otra parte, los datos geológicos más básicos (cartografía de detalle, perfiles geológicos, datos petrográficos, geoquímica de roca total) son como mínimo insuficientes

en la mayor parte de zonas. Es como mínimo peligroso que falten datos de este tipo en zonas en las que se efectúan dataciones, pues ponen en cuestión la representatividad de las muestras y sus resultados y, por tanto, la capacidad de discusión sobre los mismos. La cartografía que presentamos revela que en el Sáhara Occidental hay una estructura geológica muy compleja, con numerosas discordancias dentro de un mismo terreno. Por consiguiente, este trabajo abre la posibilidad de poder efectuar un muestreo mucho más representativo y partir de este muestreo y nuevos análisis geoquímicos y geocronológicos, completar y reinterpretar la historia geológica del conjunto del cratón del Occidente de África (WAC).

Por tanto, por el momento constatamos que para comprender la dinámica de la dorsal de Reguibat, y la del Precámbrico del cratón de África Occidental en general, hacen falta dataciones de estos procesos clave. Ahora bien, con los datos de la cartografía y petrografía, más los datos de la geocronología ya disponibles (propios generados en el marco de esta memoria o referencias de trabajos más antiguos sobre la zona), ya se puede construir un primer esbozo de la Historia Geológica del Sáhara Occidental o, como mínimo, discutir algunas posibles interpretaciones. Es de ello de lo que nos vamos a ocupar en los próximos apartados.

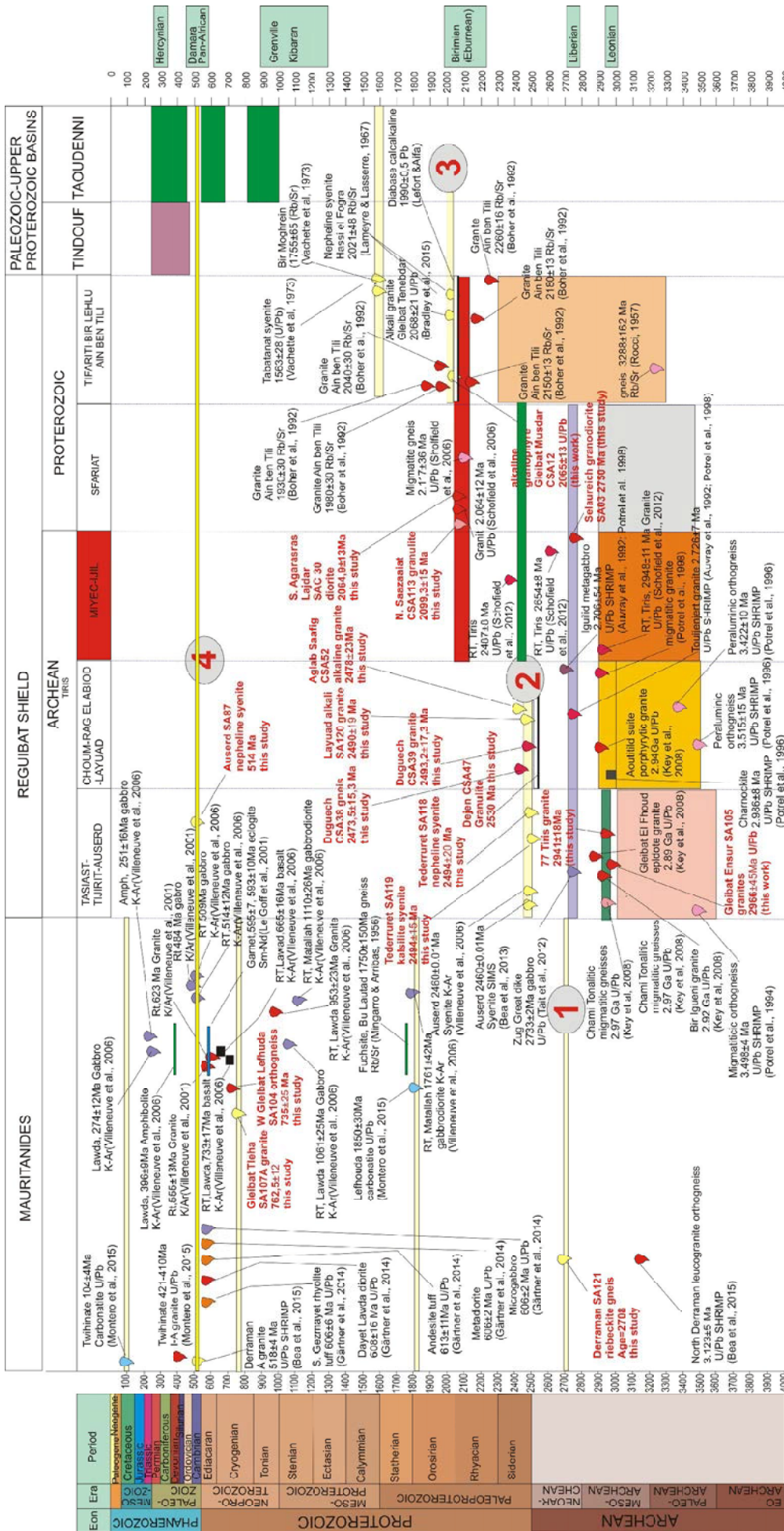


Figura 10.1.1. Síntesis de los datos geocronológicos disponibles para diferentes eventos formadores de litologías en el Sáhara Occidental Véase texto para discusión y referencias. Los números y barras amarillas indican episodios extensionales. Figure 10.1.1. Synthesis of the geochronological data available for different processes forming different rocks in Western Sahara. See text for discussions and references. Numbers and yellow bars indicate extensional periods.

10.1.2. MICROCONTINENTES PALEOARCAICOS O MESOARCAICOS?

Las dataciones disponibles en los gneises más antiguos sugieren la existencia de microcontinentes ya desde el Mesoarcaico, en la zona de Auserd, en la de Layuad, en la de Sfariat, Tifariti, Mauritánides y muy probablemente en la de Miyec (fig. 10.1.1). Así, en la zona de Tasiast-Tijirit-Auserd pero en Mauritania Potrel et al. (1994) datan unos gneises migmatíticos en 3.498 ± 4 Ma con U/Pb SHRIMP (dando por tanto una edad de Paleoarcaico); en la unidad de Choum-Rag el Abiod-Layuad Potrel et al. (1996) obtienen una edad de 3.515 ± 15 Ma U/Pb SHRIMP para unos gneises peraluminicos; los mismos autores obtienen en otros gneises peraluminicos una edad de 3.422 ± 10 Ma U/Pb SHRIMP.

En el resto de zonas la información del Arcaico, no obstante, es más escasa y en todo caso corresponde a materiales algo más modernos. Así, en la parte de Mauritania del dominio de Tifariti-Bir Lehlu-Ain Ben Tili se ha datado un gneis en 3288 ± 162 Ma mediante Rb/Sr, pero esta datación es muy antigua (Rocci, 1957).

En cambio, por el momento en los Mauritánides, donde los afloramientos están muy compartimentados por cabalgamientos, los materiales más antiguos encontrados hasta el momento son los leucogranitos del N de Derraman leucogranite orthogneiss, que dan una edad de 3.123 ± 5 Ma U/Pb SHRIMP (Mesoproterozoico; Bea et al., 2015).

Así pues, parece que al menos en estos dominios puede haberse dado la formación de corteza continental durante una serie de episodios desde el Paleoarcaico al Mesoarcaico.

No obstante, la información que existe sobre su contexto de formación es muy borrosa. Todos estos materiales están fuertemente deformados y metamorfizados, en muchos casos con desarrollo de migmatización, por lo que muy probablemente muchos de estos datos deban ser reinterpretados a medida que surjan más datos para cada una de las zonas. Como puede verse en la figura, el volumen de información es

todavía muy pequeño y sólo se dispone de una datación por dominio en la mayor parte de los casos, lo que es a todas luces insuficiente.

Estos materiales afloran casi siempre en núcleos de domos o en asociación a grandes cabalgamientos, por lo que los afloramientos son limitados. No obstante, en el Sáhara Occidental es en la zona de Auserd y en la de Layuad donde el afloramiento de estos materiales parece ser más continuo.

Por otra parte, en la zona de Auserd llegan a identificarse diversos greenstone belts orientados aproximadamente NNE-SSW, que podrían corresponder a antiguas cuencas sedimentarias asociadas a una actividad extensional y posteriormente deformadas. Montero et al. (2013) encuentran edades de 3.03 Ga U/Pb en circón de metagrauvas del greenstone belt de Tichla. No obstante, estos materiales están fuertemente metamorfizados e intruidos por los granitos de un episodio de granitización del Mesoarcaico, por lo que es posible que estas edades correspondan a las del metamorfismo.

10.1.3. LOS GRANITOIDES DEL LEONIENSE

En las zonas de Auserd, Layuad y Miyec existe un registro muy claro de un proceso generalizado de plutonismo ácido, incluyendo granitoides del tipo TTG (tonalitas, trondhjemitas, granodioritas). Este estadio ha sido muy bien establecido tanto en Mauritania como en el Sáhara (fig. 10.1.1).

Así, en la zona de Tasiast-Tijirit-Auserd se han datado los siguientes materiales: gneises tonalíticos migmatíticos de Chami en Mauritania en 2.97 Ga U/Pb (Key et al., 2008), granitos de Bir Igueni en Mauritania en 2.92 Ga U/Pb (Key et al., 2008), granito epidótico de Gleibat El Fhoud en Mauritania en 2.89 Ga U/Pb (Key et al., 2008), asociaciones TTG de Aghaylas en el Sáhara en 2.94-2.92 Ga U/Pb (Montero et al., 2013), granitos y migmatitas de Gleibat Ensur en el Sáhara en 2966 ± 45 Ma U/Pb (esta memoria), granito del Tiris en el Sáhara en 2941 ± 18 Ma (esta memoria).

En la zona de Choum-Rag el Abiad-Layuad se han encontrado edades muy parecidas. De este modo, los granitos porfiríticos de la zona de Aoutitilid en Mauritania se han datado en 2.94 Ga U/Pb (Key et al., 2008), los de Gleibat El Fhoud en Mauritania en 2912 ± 36 Ma (Key et al., 2008), los granitos migmatíticos de Amsaga en Mauritania en 3.03 Ma (Potrel et al., 1998) y unas charnockitas de la misma zona en 2.986 ± 8 Ma U/Pb SHRIMP (Potrel et al., 1996).

Finalmente, este proceso está también presente en la zona de Miyec-Ijil. Así, Schofield et al. (2012) obtienen una edad de 2948 ± 11 Ma U/Pb en granitos del Tiris.

Por consiguiente, parece que estos granitoides pueden adscribirse a la orogenia Leoniana (hacia 3 Ga), y es posible que estos granitoides se formaran en relación a un mismo ciclo compresivo (fig. 10.1.2a). Estos granitoides han sido interpretados en clave de granitos de arcos volcánicos, de tipo calcoalcalino (por ejemplo, Key et al., 2008).

No obstante, a partir de las relaciones de algunos de estos granitoides, sintectónicos con la zona de falla de Amsaga que limita los terrenos de Tasiast-Tijirit-Tiris y de Choum-Rag el Abiad-Layuad y que se interpreta como la zona de colisión entre los dos terrenos, se deduce que la edad de la colisión es de 2954 ± 11 Ma (Pitfield et al., 2004). Por consiguiente, es posible que durante este proceso se produjera una primera colisión y ensamblado de estos microcontinentes (fig. 10.1.2b).

10.1.4. UNA PLUMA LIBERIANA?

En los tres dominios de Auserd, Layuad y Miyec se han localizado cuerpos de sills anortosíticos, como el de Sel Aureich, así como el gran dike de Zug, cuya datación da 2733 ± 2 Ma U/Pb (Tait et al., 2013). Otro cuerpo de gabro en Iguilid da una edad de 2706 ± 54 Ma U/Pb (Auvray et al., 1992; Potrel et al., 1998). Estos autores interpretan estos diques y sills básicos y ultrabásicos como el resultado de la intrusión de magmas boniníticos

en un contexto extensional pero que anteriormente había sido de arco (Tait et al., 2013). La intrusión de estos grandes volúmenes de magmas básicos puede estar relacionada con la instalación de una pluma mantélica hacia 2750-2700 Ma (fig. 10.1.2). Dependiendo de la forma de emplazamiento estos cuerpos pueden acabar por dar o bien diques como el de Zug o complejos estratificados, como el de Sel Aurich. En estos últimos pueden producirse cámaras magmáticas en las que se dan fenómenos de cristalización fraccionada. Estos intrusivos pueden tener asociados yacimientos de Cr, Fe, etc.

Una edad parecida a la estos cuerpos ultrabásicos se ha obtenido en el granito de Touijenjert en Mauritania, el cual da una edad muy parecida, de 2726 ± 7 Ma U/Pb SHRIMP (Auvray et al., 1992; Potrel et al., 1998). Es posible que estas edades sean producidas por metamorfismo térmico del granitoide durante el proceso anteriormente citado, pero también podría ser que se reactivara la subducción en la zona de los Mauritánides durante este episodio. Con los datos actuales no se puede decir nada más.

10.1.5. ESTADIOS DE RIFT EN EL NEOARCAICO

Posiblemente como una continuación de la instalación de la pluma mantélica en el límite del Mesoarcaico con el Nearcaico, en el dominio de Tasiast-Rijirit-Tiris se instala una Large Igneous Province, con desarrollo de un magmatismo básico que se instala a partir de una densa red de fracturas, muy probablemente de tipo extensional (fig. 10.1.3d). Como se recordará, en este sector hay una densísima red de diques de diabasas de dirección aproximada NNE-SSW, que pueden estar separados un del otro por sólo unos pocos metros, y que se prolongan durante decenas de kilómetros, algunos de ellos cortando el Sáhara y Mauritania. Esta LIP es la más densa de todas las existentes en el Sáhara. Estos diques, no obstante, no cortan nunca a las rocas alcalinas subsaturadas de la zona

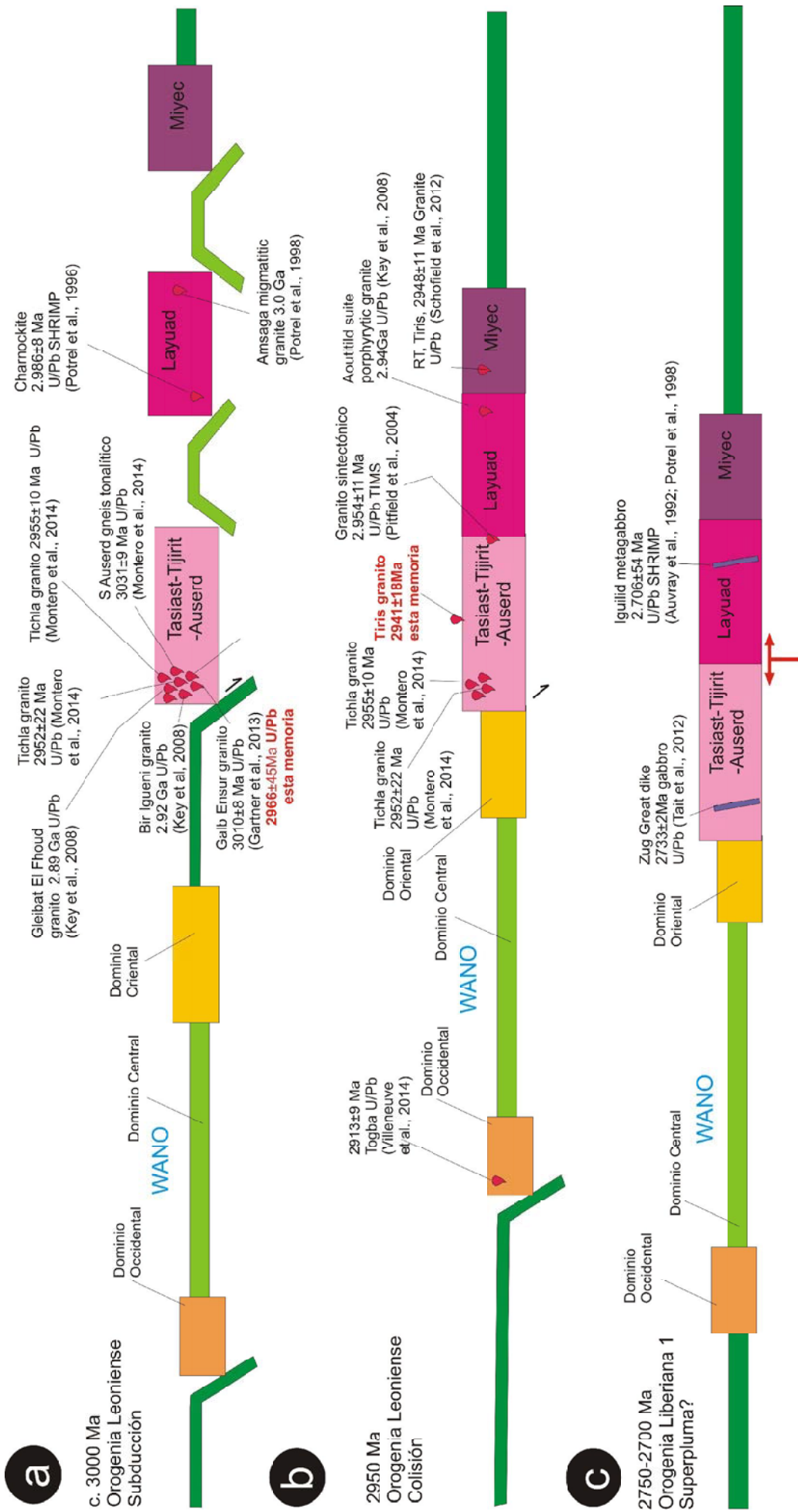


Figura 10.1.2. Evolución tectonomagmática de los diferentes dominios geológicos del Sáhara Occidental durante el Mesozoico y Neoproterozoico. Los dominios oceánicos están representados en color verde.
 Figure 10.1.1. Tectonomagmatic evolution of the different geological domains of Western Sahara during the Mesozoic and Archean times. The oceanic domains are represented in green color.

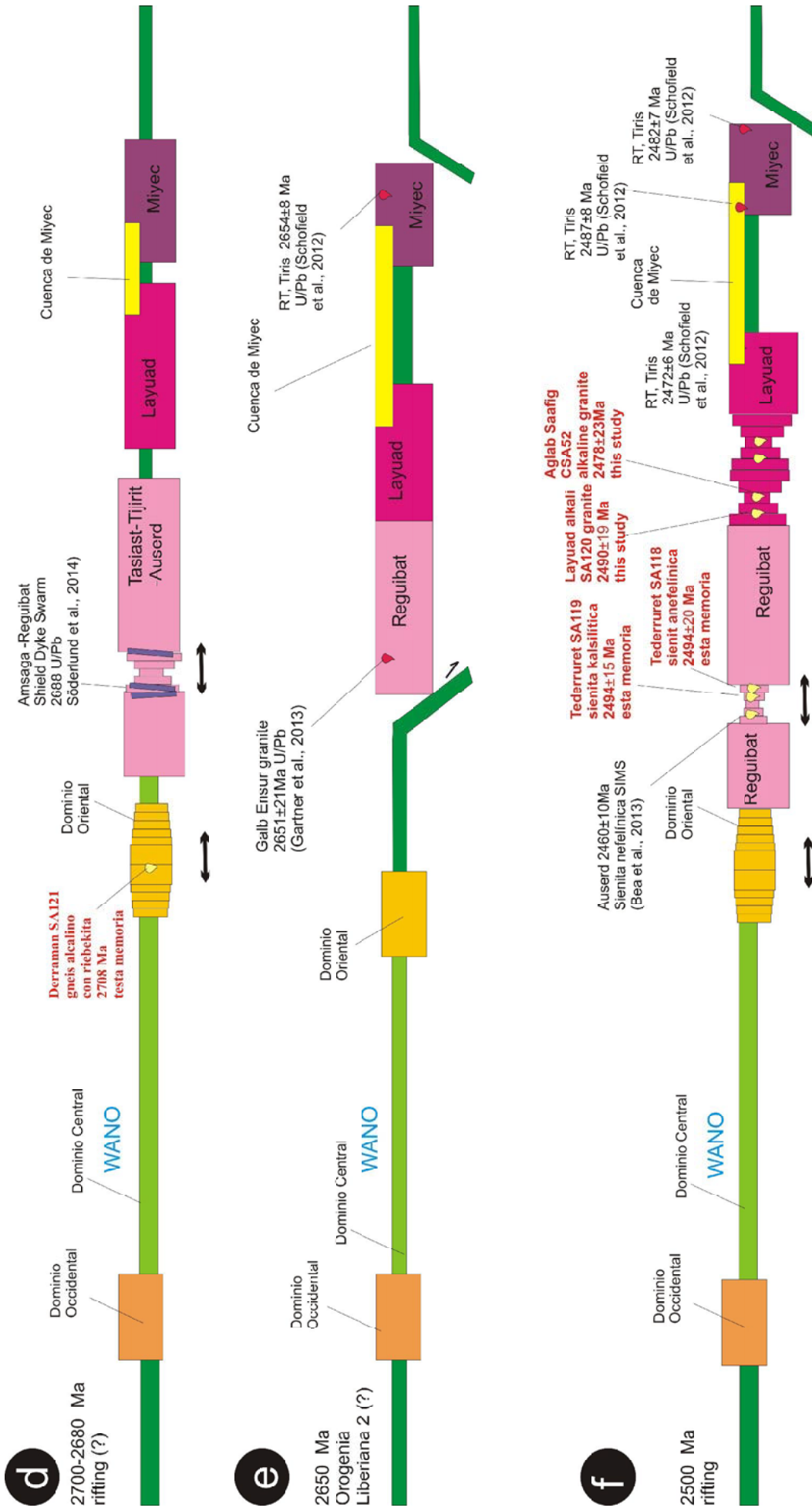


Figura 10.1.3. Evolución tectonomagnética de los diferentes dominios geológicos del Sáhara Occidental durante el Neoproterozoico. Los dominios oceánicos están representados en color verde. Las cuencas sedimentarias se representan en color amarillo.

Figure 10.1.3. Tectonometric evolution of the different geological domains of Western Sahara during the Neoproterozoic times. The oceanic domains are represented in green color. Sedimentary basins are represented in yellow color.

(sienitas nefelínicas de Auserd y Tederruret), por lo que deben ser anteriores. Estos diques tampoco cortan nunca a través de la falla que limita los dominios de Tasiast-Tijirit-Tiris y Choum-Rag el Labiad-Layuad, de manera que una posible explicación sería que estos dominios no estaban unidos en el momento en que se emplazaron estos diques (fig. 10.1.3d), si bien no se dispone por el momento de evidencias cartográficas de esta hipótesis. De hecho, la falla ha tenido posteriormente un movimiento senestral, llegando a deformar con un gancho de falla a los diques, de manera que la falla es claramente posterior a los diques.

Estos diques han sido datados en la zona de Amsaga en Mauritania, donde se ha obtenido una edad de 2688 U/Pb (Söderlund et al., 2014).

Como vimos anteriormente, esta falla es mucho más antigua, puesto que desarrolla el papel de una zona de sutura en una colisión continental hacia 2.954 ± 11 Ma U/Pb TIMS (Pitfield et al., 2004), como puede verse con la datación de un granito sintectónico situado en la falla. No obstante, estas zonas de sutura no es raro que puedan haber jugado un papel de zonas de rifting durante subsecuentes estadios extensionales, y que este ciclo puede haber pasado en muchas más ocasiones. De este modo, como fruto de esta extensión es posible que se llegara a generar corteza oceánica entre los diferentes dominios (fig. 10.1.3d), pero debe esperarse a efectuar una cartografía geológica mucho más detallada para comprobar este extremo. Se trataría, pues, de localizar posibles cuerpos de tipo ofiolítico.

Cabe tener en cuenta que en la zona oriental de los Mauritánides, en ese momento anexada a la zona de Tasiast-Tijirit-Auserd, en el Neoproterozoico se emplazan un conjunto de granitos alcalinos. Si bien el granito alcalino anorogénico de Derraman ha sido datado por Bea et al. (2015) en 518 ± 4 Ma U/Pb SHRIMP, otras muestras del mismo intrusivo nos han dado edades mucho más antiguas. De este modo, el granito riebeckítico gneisificado de Derraman SA121 da una edad de unos 2708 Ma (este estudio). No es raro que en una misma región se de el mismo tipo de

magmatismo alcalino, de forma repetitiva, pero en periodos de tiempo muy separados entre ellos (Martin et al., 2012).

Por consiguiente, es evidente que hace falta completar en el dominio oriental de los Mauritánides un muestreo más detallado de sus granitos alcalinos, a fin de definir de manera sistemática las diferencias mineralógicas y geoquímicas entre ellos, y establecer la cartografía de estas diferentes variedades y sistematizar sus dataciones. En todo caso, ya hemos visto que efectivamente sí que existen algunas diferencias importantes entre las composiciones minerales y la geoquímica de los granitoides muestreados por el momento en el dominio oriental de los Mauritánides, por lo que es muy posible que existan efectivamente estas intrusiones recurrentes de granitoides anorogénicos en la misma zona.

No puede descartarse que la cubeta de Miyec, donde se acumularon potentes series vulcanosedimentarias, detríticas y carbonatadas, no se haya empezado a formar en este estadio, si bien no hay evidencias.

10.1.5. OROGENIA LIBERIANA (?)

Durante el Neoarcaico se produce el emplazamiento de diversos granitos en el límite entre los Mauritánides y Reguibat, como el granito de Galb Ensur, datado en 2651 ± 21 Ma U/Pb (Gartner et al., 2013); también los hay en la zona de Miyec-Ijil pero en Mauritania (datados en 2654 ± 8 Ma U/Pb, Schofield et al., 2012). Estos granitoides es posible que se hayan formado en un contexto de arco (fig. 10.1.3e), pero no hay datos suficientes.

10.1.6. RIFT EN EL LÍMITE NEOARCAICO-PALEOPROTEROZOICO

Este proceso de rifting ha sido muy bien establecido en diferentes unidades. De este modo, aparece en el dominio de Tasiast-Tijirit-Auserd, donde es subsaturado, y en el de Layuad, donde es saturado, con granitos alcalinos (fig. 10.1.3f). En el primer caso, da lugar a las sienitas nefelínicas de la zona de

Auserd, fechadas en 2460 ± 10 Ma (Bea et al., 2013), pero también hay otros intrusivos todavía por estudiar al SE de esta localidad. Hay otros intrusivos de sienitas kalsilíticas en Tederruret, cuya datación ha sido establecida en esta memoria y es bastante congruente con las anteriores (muestra SA119 datada en 2494 ± 15 Ma), si bien también hay sienitas nefelínicas (muestra SA118, datada en 2494 ± 20 Ma en esta misma memoria). Bea et al. (2013) también señalan la presencia de sienitas kalsilíticas en Auserd acompañando a las nefelínicas.

En el dominio de Choum-Rag el Abiad-Layuad, en cambio, como se recordará hay abundantes intrusiones de granitos alcalinos, el más típico de los cuales es el de Layuad, que en esta memoria se ha datado en 2490 ± 19 Ma (muestra Sa120). Otro granito alcalino en la zona de Aglab Saafig (muestra CSA52) dio edades de 2478 ± 23 Ma, en el mismo rango.

Por tanto, parece evidente que en el límite Arcaico-Proterozoico se instala un sistema extensional en un cratón que hasta entonces había tenido una línea de acreción. Esta extensión se aprecia en los dominios de Tasiast-Tojjirit-Auserd y en el de Choum-Rag el Abiad-Layuad, pero de ningún modo en el de Miyec-Ijil, lo que sugiere que el tercer dominio se encontraba aislado de los otros dos en este episodio (fig. 10.1.3f).

En cambio, es posible que la cubeta sedimentaria de Miyec se formara al menos en parte en este episodio, o que se prolongara una sedimentación iniciada en el Neoproterozoico medio, puesto que hay algunos intrusivos graníticos fechados que parecen cortarla, al menos en la zona de Mauritania. Así, unos granitos de Amsaga, datados en 2487 ± 8 Ma U/Pb y 2482 ± 7 Ma (Shofield et al., 2012) podrían acotar la edad más alta posible de la unidad sedimentaria, eso si, de confirmarse que estos granitos cortan efectivamente a los materiales sedimentarios. Cabe tener en cuenta que no hemos podido ver por el momento cartografías de detalle de este sector que confirmen este extremo; en cambio, en el Sáhara Occidental no está claro que haya granitoides cortando a los materiales del dominio de Miyec; donde se ven materiales

de este tipo puede ser que sean domos y que aflore el basamento infrayacente, por lo que hacen falta más cartografías de detalle. Como se recordará, en el dominio de Miyec-Ijil se diferenció un basamento más antiguo con metamorfismo de alto grado y una cobertera con metamorfismo en grado medio. Por lo tanto, una datación de estos granitos tiene poco valor en relación a la datación de las series sedimentarias si no va contextualizada en una cartografía clarificadora.

10.1.7. LA OROGENIA BIRIMIENSE

Durante este episodio el aspecto más importante es que se produjo la convergencia del conjunto de dominios de Auserd, Layuad, Miyec por una parte, y Sfariat y Tifariti por la otra.

El resultado inicial sería el desarrollo de subducción y un desarrollo generalizado de plutonismo y volcanismo calcoalcalino (fig. 10.1.4g), incluyendo grandes paquetes de rocas boniníticas, riolitas y basaltos. Estos materiales por el momento no han sido datados. En cambio, el magmatismo calcoalcalino da un amplio intervalo de edades, que correspondería posiblemente al de la longevidad de un complejo sistema de microcontinentes y arcos de islas, cuya complejidad en detalle sólo se puede entrever debido a la complejidad de la tectónica de la zona. En todo caso, se dispone de muchas dataciones que son antiguas, realizadas con K/Ar o Rb/Sr; las dataciones con U/Pb más recientes en el dominio de Sfariat dan resultados de 2117 ± 36 Ma U/Pb en un gneis migmatítico (Shofield et al., 2006), $2064,9 \pm 13$ Ma para la diorita del S de Agarasras Lajdar (esta memoria) y $2099,3 \pm 15$ Ma para una granulita al N de Saazaaiat (esta memoria).

En el dominio de Tifariti las dataciones son más difícilmente correlacionables con las de sectores de Mauritania, pero en todo caso hay muchas dataciones con Rb/Sr que parecen dudosas. En esta memoria se ha datado un granófono de tendencia alcalina en Gleibat Musdar, que ha dado una edad de 2065 ± 13 U/Pb. Una edad muy parecida (2068 ± 21 U/

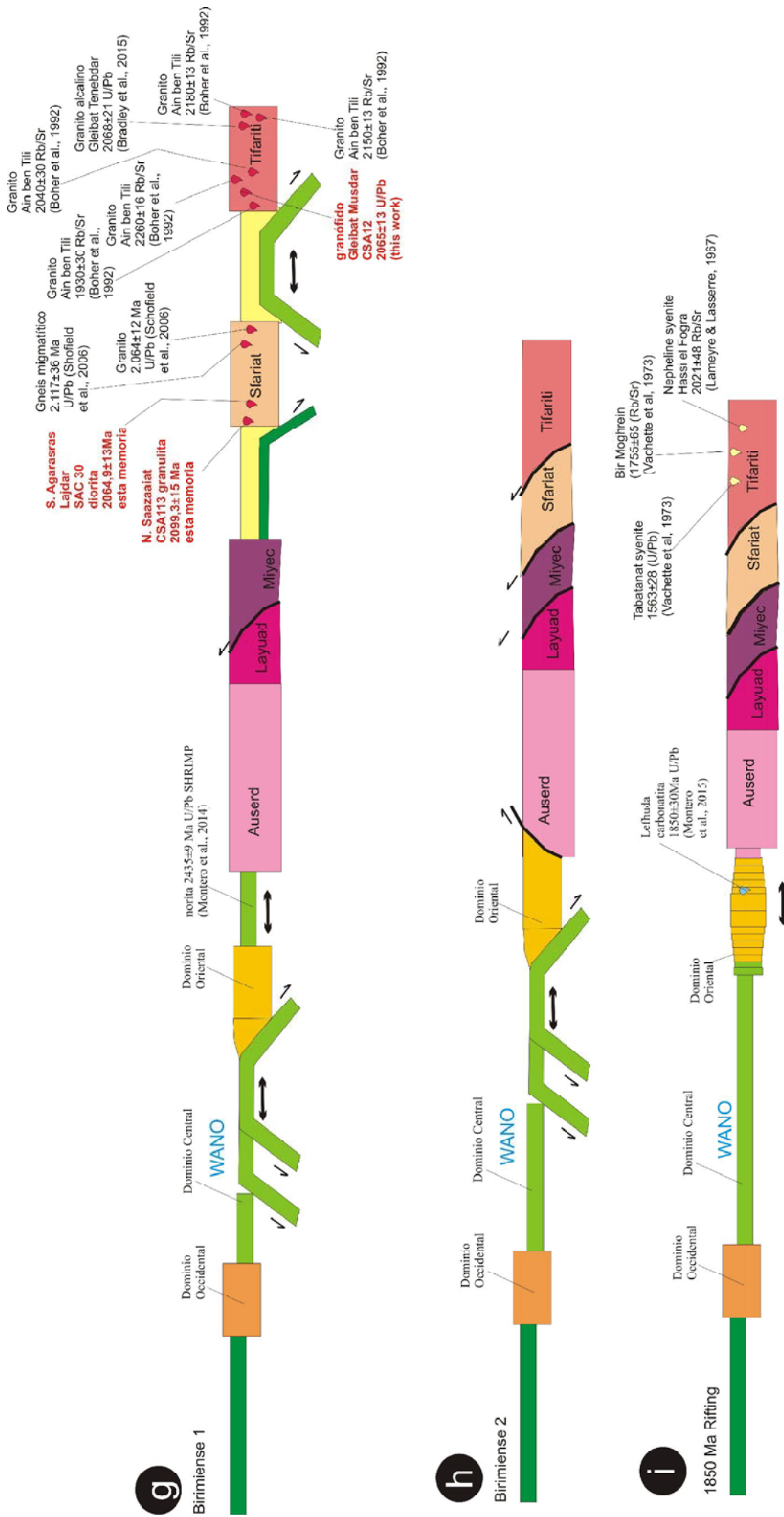


Figura 10.1.4. Evolución tectonomagmática de los diferentes dominios geológicos del Sáhara Occidental durante el Proterozoico inferior. Los dominios oceánicos están representados en color verde. Las cuencas sedimentarias se representan en color amarillo. The Figure 10.1.4. Tectonomagmatic evolution of the different geological domains of Western Sahara during the Lower Proterozoic times. The oceanic domains are represented in green color. Sedimentary basins are represented in yellow color.

Pb) es obtenida en un granito de afinidad alcalina de Gleibat Tenebda en Mauritania por Bradley et al. (2015).

El resultado final del proceso sería la colisión continental y el desarrollo de cabalgamientos de las zonas más orientales sobre las occidentales (fig. 10.1.4h), resultando unas zonas de falla de dimensión continental, que son las que pueden observarse fácilmente en foto satélite. A lo largo de estas zonas de falla se produjo una intensa circulación de fluidos hidrotermales, produciéndose un metalotecto regional de primer orden del tipo de oro orogénico, con diferentes estilos de mineralización: ilones de oro en zonas de cizalla, reemplazamientos de rocas encajantes de posible tipo IOCG, listwánitas, birbiritas, etc. Un proceso similar se daría en el otro extremo del cratón, con el dominio oriental de los Mauritánides colisionando con el dominio de Auserd (fig. 10.1.4h)

Por consiguiente, en la orogenia del Birimiense se produce la cratonización de esta parte del cratón occidental africano.

Al final de este ciclo compresivo se produce un proceso de extensión que se da aparentemente sólo en el antiguo dominio de Tifariti y en el dominio oriental de los Mauritánides (fig. 10.1.4i). Este episodio está mal caracterizado, pues muchas de las dataciones dan resultados muy dispares e incongruentes. Es posible, además, que haya varios episodios. Este magmatismo produce rocas alcalinas saturadas y subsaturadas, como en la zona de Hasi el Fogra; un ejemplo de ello es la sienita de Tabatanat, que da 1563 ± 28 U/Pb (Vachette et al., 1973). En el dominio oriental de los Mauritánides, se produce magmatismo carbonatítico, y la carbonatita de Lefhuda da una edad de 1850 ± 30 Ma U/Pb (Montero et al., 2015). De este modo, existe un episodio metalogenético perspectivo para la exploración y producción de minerales de

elementos raros, y que está todavía muy poco estudiado.

Cabe señalar que en el dominio de Sfariat, de gran complejidad tectónica, parece también existir un basamento con un grado metamórfico más alto que su cobertera. En este basamento se encuentran los depósitos del complejo estratificado de Bir Malhat, que podría estar formado en un episodio extensional antiguo en el Mesoarcaico, pudiendo ser afin al complejo de Zug. Por la importancia que tiene este complejo, es básico determinar su edad.

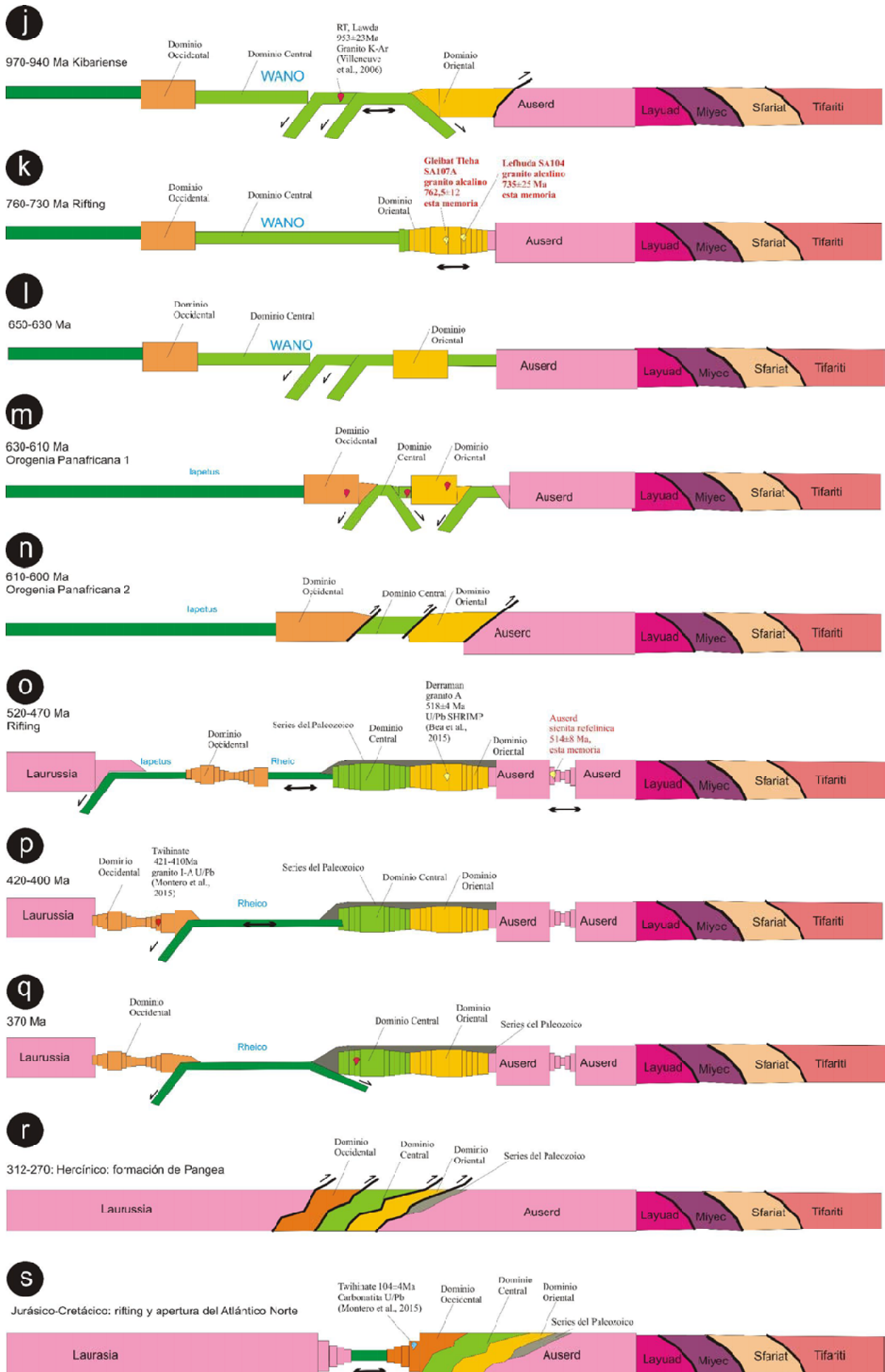
Cualquier ulterior interpretación con más detalle de la historia geológica del área en este episodio pasa además por la datación de los materiales oceánicos de los dominios de Miyec, Sfariat y Tifariti, y por certificar que se trate de materiales ofiolíticos.

10.1.8. LOS TIEMPOS DEL MESOPROTEROZOICO Y DEL NEOPROTEROZOICO

Durante este lapso la zona de los dominios de Auserd, Layuad, Miyec, Sfariat y Tifariti queda cratonizada, de manera que no se producen más fenómenos deformativos señalables en este sector. El margen inestable se traslada al W, donde como se ha visto en la descripción de los Mauritánides se produce la progresiva subducción de las unidades oceánicas hacia el W, pues ya no se registra magmatismo activo en la dorsal de Reguibat (fig. 10.1.5j).

Hacia 760-730 Ma se produciría un episodio local de rifting en el margen continental del cratón que generaría granitos alcalinos en la zona oriental de los Mauritánides (fig. 10.1.5k) pero este episodio debe ser mejor contrastado. Como puede verse, este magmatismo se produce en un sector ya afectado por magmatismo alcalino,

Figura 10.1.5. (Pág. siguiente). Evolución tectonomagmática de los diferentes dominios geológicos del Sáhara Occidental durante el Fanerozoico. Los dominios oceánicos están representados en color verde. Las cuencas sedimentarias se representan en color amarillo.
Figure 10.1.5. (Pág. siguiente). Tectonomagmatic evolution of the different geological domains of Western Sahara during the Phanerozoic times. The oceanic domains are represented in green color. Sedimentary basins are represented in yellow color.



y parece que los granitos alcalinos formados en este estadio son más fértiles que los anteriores, pues son mucho más ricos en F, REE y Nb (p.ej., Gleibat Tleha de $762,5 \pm 12$, Gleibat Lefhuda de 735 ± 25 Ma; esta memoria).

El ciclo del Panafricano a finales del Proterozoico comienza con procesos de subducción generalizados entre los dominios de los Mauritánides, con magmatismo calcoalcalino asociado, para acabar con la colisión continental entre las unidades de los Mauritánides y la dorsal de Reguibat (figs. 10.1.5l,m,n).

10.1.9. EL PALEOZOICO Y LA DEFORMACIÓN HERCÍNICA

El ciclo del Paleozoico comienza con un episodio de rift que queda bien registrado en el dominio oriental de los Mauritánides, pero que parece afectar asimismo al dominio de Auserd. Así, en este sector se han registrado sienitas nefelínicas de 514 ± 8 Ma (esta memoria) en la misma zona de Auserd donde se han registrado sienitas mucho más antiguas, en el límite Proterozoico-Arcaico. También en la zona de Derraman en la zona oriental de los Mauritánides un granito Ada 518 ± 4 Ma U/Pb SHRIMP (Bea et al., 2015), lo que parecen ser datos congruentes con los de Auserd (fig. 10.1.5o). Como se recordará, en esta misma zona tenemos datado un granito alcalino mucho más antiguo, en lo que parece ser un nuevo caso de recurrencia de magmatismo alcalino en la misma área a lo largo de períodos de tiempo muy separados entre sí. En este caso, no tenemos datos de si el comportamiento metalogénico de ambos tipos de granitos es similar o diferente.

A partir de este momento se produce la apertura del océano Rheico al separarse el dominio occidental de los Mauritánides del resto (fig. 10.1.5p); en este marco se producirá la sedimentación de potentes series de margen continental en ambiente de plataforma del Paleozoico, formándose las series de la cuenca de Tinduf. Durante el Devónico el medio sedimentario facilita la deposición de potentes

y muy continuas series de hierro oolítico, que constituyen un reservorio de Fe de primer orden.

El océano Rheico posteriormente deviene cerrado al producirse la convergencia entre Laurussia y el dominio occidental de los Mauritánides, por un lado, y el cratón aicano, por otro (fig. 10.1.5p,q). El proceso terminaría a finales del Hercínico con la colisión continental y la formación de Pangea (fig. 10.1.5r). De nuevo, este proceso produce diversos intrusivos de granitos calcoalcalinos a lo largo del Paleozoico, así como mineralizaciones de oro orogénico en las zonas de cizalla.

10.1.9. EL MESOZOICO Y CENOZOICO

A partir del Jurásico se produce la ruptura de la Pangea, quedando los dominios de los Mauritánides dentro del subcontinente Gondwana. Algunos diques de composición diabásica olivínica que cortan a las cizallas del Hercínico pueden ser el testimonio de un proceso de extensión a comienzos del Triásico. La ruptura continental se produce con la evolución del sistema de rift y el desarrollo de magmatismo carbonatítico en el Cretácico, en Twihinate, con una edad de 104 ± 4 Ma U/Pb (Montero et al., 2015). Desconocemos si existen otros tipos de diques básicos más tardíos asociados al proceso. A partir de este momento se produce la cratonización de la zona, una intensa erosión y la sedimentación de plataforma en los márgenes continentales, que acaba por dar la importante cuenca sedimentaria de El Aaiún, donde se produce la formación de depósitos de fosfatos y que puede ser perspectiva para petróleo.

Finalmente, durante el Cuaternario el clima desértico y el tipo de relieve ha determinado la formación de sabkhas en muchos puntos de todos los dominios. Estos ambientes hipersalinos han favorecido la concentración de U y, posiblemente, REE en algunas costras carbonatadas o ferruginosas, muy probablemente más enriquecidos si en el entorno de las sabkhas hay intrusiones de carbonatitas u otras rocas con preconcentraciones.

10.2.CONCLUSIONES

En el Sáhara Occidental se pueden definir dos grandes dominios: la cobertura sedimentaria del Fanerozoico y un basamento del Paleozoico y del Precámbrico.

A su vez, en el basamento se ha definido una serie de dominios o terranes, delimitados por fallas regionales, que responden a dominios ensamblados durante orogénias durante el Hercínico (Mauritánides) o durante el Birimiense (dominios de Tasiast-Tijrit-Auserd; dominio de Layuad, dominio de Miyec-Ijil, dominio de Sfariat, dominio de Tifariti-Bir Lehlu-Ain Ben Tili).

10.2.1. SÍNTESIS DE LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL SÁHARA

Las dataciones disponibles en los gneises más antiguos sugieren que puede haberse dado la formación de corteza continental durante una serie de episodios desde el Paleoarcaico al Mesoarcaico en al menos los dominios de Auserd, Layuad, y posiblemente en Tifariti y los Mauritánides.

Por otra parte, la existencia de un mismo tipo de proceso de plutonismo de tipo TTG generalizado en la orogénia Leoniana (hacia 3 Ga) en los dominios de Auserd, Layuad y Miyec sugiere que todos ellos tenían una asociación paleogeográfica similar en este período, por lo que es posible que estos

terrenos estuvieran ensamblados en este momento. En el dominio de Layuad en cuencas de greenstone belts se forman importantes depósitos de BIF.

Un ciclo Liberiense comienza con el desarrollo de una pluma mantélica en la zona de Auserd, que da lugar a diques y sills ultrabásicos y finalmente a una LIP constituida por enjambres de diques de diabasa de dirección NNE-SSW; en el resto de sectores se produce la individualización de los microcontinentes. El final del ciclo implica la colisión parcial de algunos de estos dominios y procesos de subducción que generan magmatismo calcoalcalino.

En el límite Proterozoico-Arcaico (unos 2500 Ma) se produce un proceso de rift generalizado, con el que se asocia magmatismo alcalino saturado y subsaturado, con indicios de elementos raros. En algunos sectores pueden individualizarse cuencas sedimentarias submarinas en las que se forman depósitos importantes de BIF.

Durante el Paleoproterozoico se produce la convergencia de, por un lado, las microplacas de Auserd, Layuad y Miyec, y del dominio oriental de los Mauritánides, por otro. Los procesos de subducción producen un magmatismo calcoalcalino generalizado, y al final el cierre de los océanos, la colisión continental con formación de complejos ofiolíticos, a veces con mineralizaciones de Cr-

PGE; además, las zonas de cizalla regionales producidas en este contexto removilizan Au, PGE, Cr, REE, entre otros elementos. El proceso de rifting generado a continuación no parece haber generado concentraciones interesantes en los granitos alcalinos asociados al mismo. Esta orogenia produce la cratonización de la mayor parte de los dominios.

El magmatismo calcoalcalino asociado a la orogenia Kibariense en el margen occidental del cratón no parece haber generado depósitos, pero los granitos alcalinos que cierran el ciclo contienen concentraciones muy altas de REE y Nb.

La orogenia Panafricana determina la aparición de magmatismo calcoalcalino en el borde occidental del cratón, así como una nueva colisión con el dominio oriental de los Mauritánides, que se cratoniza. El proceso de rifting subsecuente genera rocas alcalinas saturadas y subsaturadas, pero aparentemente desprovistas de mineralización.

Los márgenes continentales así formados facilitan la sedimentación de series de plataforma del Paleozoico, en los que se encuentran mineralizaciones de Fe oolítico en el Devónico inferior. Durante la orogenia hercínica se produce la colisión continental de todos estos dominios y Laurussia, formándose el supercontinente de Pangea. En este contexto los cabalgamientos asociados pueden formar mineralizaciones de oro orogénico, y pueden darse mineralizaciones de Cr podiforme (PGE) en ofiolitas.

Finalmente, la apertura del Atlántico N desde el Triásico superior-Jurásico produce el desarrollo de carbonatitas en el dominio más occidental de los Mauritánides, asimismo con mineralización de elementos raros. Los márgenes continentales así formados permiten el desarrollo de series de plataforma ricas en yacimientos de fosfatos y con potencial para petróleo.

10.2.2. POTENCIAL METALOGENÉTICO DEL SÁHARA OCCIDENTAL

En el curso de este trabajo se han descubierto varios depósitos minerales, principalmente en el basamento del Precámbrico. Los depósitos de menas metálicas más interesantes son los siguientes:

a) Los depósitos ortomagmáticos de Cr-PGE -Ti-V en el complejo estratiforme de Bir Malhat, con continuidades de decenas de km

b) Los depósitos de Cr-PGE en cromititas podiformes en contextos oceánicos del Proterozoico de los Mauritánides.

c) Los depósitos de Au-(PGE) orogénico asociados a zonas de cizalla, tanto en forma de listwánitas-birbiritas, sistemas filonianos o mineralizaciones estratoligadas asociadas a los mismos, correspondiendo a cizallas formadas en épocas panafricanas (dominios de Tifariti-Bir Lehlou-Ain ben Tili y de Sfariat) o hercínicas (Mauritánides).

d) Los depósitos de BIF en series submarinas; si bien estos depósitos se encuentran en todos los dominios, los más interesantes por su continuidad y leyes se encuentran en las zonas de Sfariat y Miyec-Ijil.

e) depósitos de Nb-Ta-LREE-U-Fe-V-P-Mo en carbonatitas, importantes tanto en las edades del Proterozoico como en las del Cretácico.

f) depósitos de Nb-Ta-F-HREE-U-Th en rocas alcalinas saturadas o subsaturadas, preferentemente en las enriquecidas en F.

g) depósitos de Fe oolítico en las series de plataforma del Devónico inferior, de grandes reservas.

h) depósitos de fosforitas y petróleo asociados a la cuenca sedimentaria de El Aaiún.

h) Depósitos de U-(REE??) de edad Cuaternario, asociados a calcretas y ferricretas.

10.3. PROPUESTAS DE ACTUACIÓN FUTURA

10.3.1. PROPUESTAS DE ESTUDIOS FUTUROS SOBRE LA HISTORIA GEOLÓGICA DEL SÁHARA

El Sáhara Occidental es una región muy extensa y con una complejidad geológica evidente, por lo que esta memoria puede servir para tener una primera aproximación de la geología del Sáhara, pero el objetivo nunca ha sido evidentemente llegar a resolver todos los problemas de la geología del área.

Como se ha visto, quedan muchas incógnitas por resolver, y la más acuciante es sin duda la datación de muchos de los litotipos que hemos cartografiado. En particular, teniendo en cuenta la posibilidad de que en cada dominio afloren materiales de un basamento y de cobertera, se hace preciso efectuar la datación, como mínimo, de una roca de cada uno de ellos, para tener al menos una idea de la edad del basamento y de la cobertera en cada dominio y, si es posible, de definir modificaciones por metamorfismo.

En la misma línea, de cara a establecer la más que posible existencia de discordancias internas dentro de cada dominio, es importante, además de las correspondientes cartografías de detalle (por ejemplo, en los núcleos domales de la unidad de Layuad o de Miyec) realizar la geotermobarometría de las asociaciones minerales en rocas selectas del basamento y de la cobertera, a fin de localizar

evidencias de diferencias en el grado metamórfico entre ambas unidades, o de diferencias en las trayectorias e historia del metamorfismo de ambas.

Es preciso realizar perfiles geológicos a través del área. Sería relativamente sencillo, con la cartografía disponible en este momento, realizar una serie de perfiles muy concretos a lo largo de las diferentes unidades, tomando correctamente datos de buzamientos. A partir de estos cortes debería realizarse la reconstrucción de la paleogeografía de las diferentes cuencas sedimentarias y de su ambiente geotectónico, además de poder reconstruir la morfología original de algunos intrusivos, como el de Bir Malhat. Este aspecto es importante para poder comprender el modelo de formación de este importantísimo depósito.

Es crítico desarrollar un muestreo y un estudio geoquímico de detalle de los diferentes tipos de intrusivos. En particular, es importante conocer la geoquímica de los diferentes tipos de gabros y rocas ultrabásicas de los complejos estratificados y discriminarlos de los posibles materiales ofiolíticos; también hace falta información geoquímica de las rocas volcánicas y de las anfibolitas. De la mayor parte de las rocas graníticas hace falta asimismo información geoquímica, en particular la que permita clasificar correctamente sus dominios geotectónicos. En el caso del

complejo de Bir Malhat, una buena caracterización implica un muestreo muy detallado para poder analizar las variaciones verticales en el complejo, aunque para ello previamente debería realizarse el estudio estructural que hemos citado.

Con los cortes bien trazados, sería posible realizar una campaña de exploración geofísica, que podría definir la continuación de los cuerpos en profundidad, muy en particular de los mineralizados.

A escala de más detalle, es preciso realizar la geoquímica mineral de muchos de los litotipos estudiados, así como las mediciones oportunas para poder establecer de manera precisa las condiciones de metamorfismo.

Como puede comprenderse, esta memoria es sólo una primera aproximación a la geología del Sáhara Occidental, pero ha puesto al descubierto un conjunto apasionante de preguntas que merecen respuesta.

10.3.2. PROPUESTAS DE ESTUDIO FUTURO DEL POTENCIAL METALOGÉNICO DEL SÁHARA OCCIDENTAL

La gran variedad de yacimientos minerales descubiertos en el Sáhara, y sobretodo el gran tamaño de muchos de ellos, exige para el futuro un estudio mucho más preciso de cada uno, pues muchos de ellos pueden tener interés, no sólo científico sino económico.

Depósitos ortomagmáticos de Cr-PGE -Ti-V en el complejo estratiforme de Bir Malhat

Son probablemente el resultado más interesante que se ha obtenido en el curso de estos trabajos, y debería completarse la cartografía a escala conveniente de toda el área de Sfariat para tener delimitado completamente la extensión de los afloramientos del cuerpo, pues se ha revelado mucho más extenso de lo que permitía suponer la fotogeología. Es importante que se realice

el mismo tipo de trabajo en Mauritania.

Una vez realizada la cartografía, es importante establecer unidades cartografiables dentro del complejo, a fin de poder definir la extensión y potencia de las mineralizaciones de Cr-PGE, por una parte, y de Ti-V por la otra. La realización de zanjas de exploración, llegados a este punto, es ya imperativa. A partir de estas unidades debe efectuarse un nuevo muestreo para evaluar las variaciones mineralógicas y geoquímicas dentro del complejo, a fin de construir el modelo genético del mismo.

Finalmente, como hemos indicado, la datación de este complejo es uno de los temas más urgentes que quedan pendientes.

Depósitos de Cr-PGE en cromititas podiformes en contextos oceánicos

Como se recordará, hay manifestaciones de cromititas podiformes típicas en los Mauritánides, pero hay otras rocas ultrabásicas que parecen tener afinidad ofiolítica en Agasrazraz Lajdar, en Aguainit, Gart Tinileg, Ain Ben Tili y muchos lugares más. Estas zonas están insuficientemente reconocidas y, de confirmarse su carácter oceánico, deben ser mejor exploradas, pues podrían contener asimismo mineralizaciones de Cr.

Depósitos de Au-(PGE) orogénico asociados a zonas de cizalla

Las listwänitas o birbiritas, por el momento, no han podido proporcionar objetivos de interés, pues las mineralizaciones parecen ser pobres. De hecho, por el momento no se han identificado mineralizaciones con sulfuros o arseniuros. No obstante, las series del Proterozoico del dominio de Tifariti-Bir Lehlu-Ain Ben Tili contienen potentes tramos de pizarras negras con pirita, de manera que estas rocas pueden proporcionar mayor cantidad de S a las soluciones hidrotermales que los atraviesen. Por otra parte, la gran abundancia de rocas de este tipo y sus buenos afloramientos permiten poder realizar estudios

de detalle de estas litologías, por otra parte mal conocidas.

En el caso de las mineralizaciones asociadas a cizallas, posiblemente sea conveniente realizar en la zona al NW de Miyec la exploración magnética en los paquetes carbonatados, para localizar en profundidad posibles mineralizaciones no aflorantes de magnetita reemplazando los mármoles en las proximidades de las cizallas, en las que se pueda haber dado mineralizaciones de oro. Este tipo de contexto puede ser una buena trampa geoquímica para fluidos mineralizantes. Cabe recordar que estas mismas cizallas son las que cortan a las mineralizaciones de Cr de Bir Malhat, y que es posible los fluidos hidrotermales que circulan por las cizallas hayan producido removilizar PGE, especialmente los elementos más solubles como Pd y Pt, desde la mineralización primaria hacia las cizallas, y finalmente hacia cualquier trampa geoquímica donde se puede haber producido su acumulación.

Los fluidos asociados con las cizallas indudablemente han removilizado elementos supuestamente inmóviles como Zr, W, Ti, REE, o Cr, de manera que puede haber posibilidades de que se hayan formado depósitos minerales de otros elementos difícilmente detectables, especialmente REE.

Depósitos de BIF

Evidentemente hace falta comprobar la continuidad del conjunto de series con BIF, estableciendo la cartografía de detalle de las zonas más ricas; determinar la estructura mediante los perfiles geológicos que hemos propuesto debe servir también para analizar el modelo de la cuenca en la que se formaron; en el mismo sentido, es importante realizar columnas estratigráficas para determinar el número de niveles de BIF que se encuentran en cada distrito y sus relaciones con los litotipos encajantes. Es importante comprobar que no hay procesos metasomáticos en las rocas encajantes asociadas con estos depósitos.

El estudio de las asociaciones minerales y la química mineral de los silicatos de hierro en estos depósitos puede aportar información acerca de las condiciones de metamorfismo de los mismos.

Depósitos de Nb-Ta-LREE-U-Fe-V-P-Mo en carbonatitas

No hay publicaciones sobre la petrogénesis y metalogénia de estas carbonatitas, más allá de los datos ofrecidos en las publicaciones de datación de las mismas. No obstante, las carbonatitas del Precámbrico de los Mauritánides son un buen ejemplo de depósitos metamorfizados y fuertemente deformados, por lo que puede ser muy interesante establecer la evolución de su mineralogía en función del tipo de metamorfismo experimentado; este aspecto es particularmente interesante para el comportamiento de elementos como Nb, Ta, REE durante el metamorfismo. Como se ha visto, el pirocloro se encuentra reemplazado por otros óxidos de Nb, principalmente de los grupos de la columbita y de la ixiolita.

Depósitos de Nb-Ta-F-HREE-U-Th en granitos alcalinos del Precámbrico

A este tipo de depósitos se le puede aplicar el mismo tipo de razonamiento que para las carbonatitas; ambos tipos de rocas han sufrido fenómenos metamórficos similares, si bien el protolito era diferente. En particular, es importante analizar los factores que determinan la aparición de silicatos con Nb como los encontrados en los granitos de los Mauritánides en este tipo de contextos.

Por consiguiente, el Sáhara Occidental es un lugar excelente para estudiar el comportamiento de los minerales primarios del grupo del pirocloro durante los procesos de metamorfismo regional, con todas las implicaciones geoquímicas que ello pueda tener para la movilidad del Nb o de los elementos raros en este contexto y en el marco de la alteración hidrotermal por las cizallas tardías.

Depósitos de U-(REE??) asociados a calcretas y ferricretas de edad Cuaternario

En algunos casos ha podido entreverse la asociación directa de los depósitos de ferricretas o calcretas y sus mineralizaciones de U con la proximidad de carbonatitas. Este es un aspecto que merece la pena estudiarlo con detalle. Los depósitos de U de este tipo han sido valorizados recientemente por ser fácilmente explotables.

No obstante, se sabe que las REE son móviles en contextos salinos, como los que se dan en el contexto de formación de estas

costras. Por tanto, si se da el caso de que existan carbonatitas con preconcentraciones de REE en las proximidades de estas costras, es posible que estos elementos puedan asimismo concentrarse en ellas.

No se conocen datos sobre la mineralogía y texturas de los minerales de estas costras, con excepción de una descripción básica como «carnotita» de unas mineralizaciones de la zona de Agracha. Por tanto, es interesante efectuar un estudio sistemático de las asociaciones minerales en los depósitos de este tipo, así como el estudio de las fases minerales de las rocas infrayacentes.