

1. INTRODUCCIÓN

Dado que en el Estado de Sonora no han sido reportados cuerpos gabroicos de edades laramídicas, ligados a granitoides de alto potasio por mecanismos de *AFC*, con la excepción del batolito San Hipólito de Sonora Central (Urrutia-Buñuelos *et al.*, 2008), surge el interés en el presente trabajo de realizar un estudio que aporte, en el ámbito científico regional, conocimiento sobre este fenómeno. Un segundo interés se origina en la presencia de diques de lamprófido que afectan a estos plutones y la alteración que los acompaña, ya que su descripción sirve como un aporte para futuros trabajos sobre yacimientos económicos asociados.

En este capítulo se hace una breve descripción del Marco Tectónico del Jurásico al Cenozoico que operó en el noroeste de México, de las principales unidades geológicas que han sido reportadas en la región, se plantea el objetivo principal del trabajo de Tesis y se describe la metodología seguida durante la investigación.

1.1. Marco Tectónico Jurásico – Cenozoico

Durante el Jurásico Inferior un margen continental de arco magmático comenzó a desarrollarse en el margen suroeste de Estados Unidos y noroeste de México. Una transición gradual de extensión intra-arco continental a Rift continental ocurrió durante el Jurásico Medio a Superior (Saleeby y Busby-Spera, 1992). Depósitos asociados a este nuevo marco tectónico están representados por la unidad basal del Grupo Bisbee, el Conglomerado Glance, el cual es de edad Jurásico Superior – Cretácico Inferior. El resto del Grupo Bisbee del Cretácico Inferior está representado por sedimentación fluvial a marina profunda (González-León, 1994). En la parte centro-oriental de Sonora aflora una secuencia de sedimentos, región de Lampazos, cronológicamente correlacionable con la del Grupo Bisbee, pero por su carácter litológico carbonatado, es más parecida y correlacionable con secuencias de Chihuahua y del norte de Coahuila (González-León, 1988).

Los sedimentos cretácicos fueron depositados dentro de la prolongación hacia el noroeste del Geosinclinal Mexicano, relacionada con la apertura del Golfo de México

(Dickinson *et al.*, 1986; González-León, 1994), y dentro del cual se distingue la Cuenca Bisbee (Bilodeau y Lindberg, 1983) y la Cuenca de Chihuahua (Córdoba *et al.*, 1970).

Los eventos sedimentarios Cretácicos de Sonora fueron afectados por la primera fase de la deformación Larámide. La historia de esta región, del Cretácico Superior al Terciario Inferior puede ser dividida en tres fases: (1) del Cretácico Superior al Paleoceno una primera fase de deformación compresiva y de sedimentación clástica, vulcanismo y plutonismo asociado; (2) en el Paleoceno una segunda fase de mayor plutonismo, levantamiento regional, y erosión, momento de emplazamiento de las intrusiones graníticas y de los depósitos de pórfidos cupríferos; y (3) del Paleoceno al Eoceno una tercera fase de tectonismo compresivo, en la que las estructuras formadas durante la primera fase se reactivaron por el plutonismo y vulcanismo (Keith y Wilt, 1985).

En Arizona ha sido demostrado que entre los magmatismos calcoalcalinos del Batolito Laramídico por un lado y de la Sierra Madre Occidental (35-20 Ma) por el otro, ocurrió, alrededor de los 50-40 Ma, un episodio de magmatismo metaluminoso (Granito de dos micas \pm granate) derivado de una fusión cortical. La interpretación tectónica de datos geoquímicos (elementos mayores, elementos trazas y REE) obtenidos sobre el granito de dos micas y granate de Huépac (Macizo de Aconchi) mostró que: (i) este granito se emplazó en un Arco Magmático Continental del Eoceno, cuya realidad se ha podido confirmar sobre bases estratigráficas clásicas (conglomerado Novosaigme al Este; conglomerados y areniscas de la Formación Las Parras al Oeste, Baja California); (ii) su origen se debe a una acreción magmática subcortical y a la consiguiente fusión parcial de una corteza de composición tonalítica. Estudios posteriores mostraron que su emplazamiento, a una profundidad aproximada de 10 km, tuvo lugar alrededor de los 50 Ma y que fue contemporáneo de la intrusión de cúpulas de granitoides en las partes estructuralmente más altas del mismo arco (e.g. granitoide de Santa Rosa, 49 Ma), emplazadas en el Batolito Laramídico y en su “techo”, la Formación Tarahumara (Radelli, 2000).

Un cambio progresivo en el magmatismo del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos, se produce en una época cuando el contexto geodinámico es profundamente modificado, entre 50 y 42 Ma, con una reorientación de las placas en el

Pacífico (Stock y Molnar, 1988). Esta reorientación es acompañada por una baja de la velocidad de convergencia entre la placa oceánica Farallón y la placa continental de Norteamérica, que desencadena el emplazamiento de los grandes volúmenes del volcanismo ignimbrítico del tipo Sierra Madre Occidental.

La extensión del Cenozoico medio fragmentó la meseta volcánica de la SMO hacia el Este y el Oeste, dando lugar a la morfología actual del *Basin and Range* de los estados de Sonora y Chihuahua. En este período de extensión, con una dirección a gran escala noreste-suroeste (Gans, 1997), fallas normales lítricas determinan estructuras de *horst* y *graben*, con cambios en las acumulaciones sedimentarias según los diferentes grados de evolución de las cuencas. Los sedimentos más antiguos corresponden a depósitos aluviales arenosos a conglomeráticos, conocidos localmente como la Formación Báucarit (Dumble, 1900; King, 1939). Estos depósitos son frecuentemente inclinados y fuertemente cementados por procesos de zeolitización de baja temperatura (Cochemé *et al.*, 1988; Münch *et al.*, 1996). Intercalaciones de basaltos, con completa alteración de los fenocristales de olivino a minerales arcillosos color rojo y vesículas rellenas por zeolitas o calcita (Cochemé *et al.*, 1994), son relativamente frecuentes en las partes más bajas de la Formación Báucarit. Los basaltos de esta Formación dan edades con rangos de 23-18 Ma (Demant *et al.*, 1989; Paz-Moreno, 1992; Bartolini *et al.*, 1994; Gans, 1997; McDowell *et al.*, 1997), mientras que el vulcanismo post-Báucarit inició a los 17 Ma (Damon *et al.*, 1981; Cochemé y Demant, 1991; Gans, 1997; McDowell *et al.*, 1997). El principal episodio de la extensión Neógena regional es del Mioceno temprano, contemporáneo al depósito de la Formación Báucarit (Paz-Moreno *et al.*, 2003).

1.2. Geología General

De acuerdo con los datos reportados en la bibliografía, a nivel regional afloran como unidades principales el Grupo Bisbee, las Formaciones de la Región de Lampazos, los plutones originados de la Orogenia Larámide, el vulcanismo de la Formación Tarahumara, el Complejo Volcánico Superior de la Sierra Madre Occidental, un evento intrusivo de diques, y una secuencia volcánica bimodal. Dichas unidades se describen de manera general a continuación (Figura I-1).

Grupo Bisbee

A nivel regional, las rocas más antiguas están representadas por el Grupo Bisbee, el cual fue nombrado por primera vez en el sureste de Arizona (Ransome, 1904) y en la Sierra Anibacachi (Taliaferro, 1933). El Conglomerado basal Glance del Grupo Bisbee está compuesto de sedimentos pobremente clasificados. La Formación Morita que lo sobreyace está compuesta principalmente de areniscas, mientras que la Caliza Mural, sobreyacente a la Morita, es una unidad predominantemente carbonatada. La Formación Cintura, que corresponde a la unidad superior del Grupo Bisbee, se compone de areniscas y alternancias de lutitas y limolitas (Grijalva, 1993).

Región de Lampazos

La secuencia sedimentaria de la región de Lampazos fue dividida en siete Formaciones para su estudio, que de la base a la cima son: El Aliso, Agua Salada, Lampazos, Espinazo del Diablo, Los Picachos y su equivalente Nogal, y La Meza. Las formaciones El Aliso, Lampazos y Los Picachos y el miembro 1 de la Formación Nogal están constituidos por calizas de estratos delgados a medianos, con intercalaciones escasas de lutitas y areniscas de grano fino. La Formación Agua Salada, del Aptiano tardío, está constituida en su mitad por pedernal negro bien estratificado y en su mitad superior, principalmente por lutitas negras con nódulos y capas de pedernal. En la Formación Espinazo del Diablo existen estructuras biohermales y calizas masivas. El miembro 2 de la Formación Nogal está formado por calizas de estratos medianos y calizas masivas. El miembro 3 de esta Formación está constituido por lutitas, areniscas de grano muy fino y calizas. Ambos miembros del Albiano medio (González-León, 1988).

La Orogenia Larámide

La Orogenia Larámide es un evento tectónico compresivo que corresponde al período responsable de un gran evento magmático entre 90-40 Ma (Damon *et al.*, 1981). Chaparro-Meza (1982), utiliza el término batolito laramídico para un conjunto de rocas plutónicas de composición félsica, con fábrica granítica, variando en composición de granito a granodiorita. El magmatismo produjo un arco continental, causado por la subducción de la placa Farallón bajo la placa de Norteamérica (Coney y Reynolds,

1977; Damon *et al.*, 1983; Dickinson y Lawton, 2001), migrando de Oeste a Este perpendicularmente a la paleotrinchera, considerada paralela a la costa pacífica del NW de México. Esto originó el llamado Batolito de Sonora y sus correspondientes rocas volcánicas como el Arco Volcánico Tarahumara (Roldán-Quintana, 2002; McDowell *et al.*, 2001), que afloran de manera abundante a lo largo de sierras paralelas en direcciones NNW-SSE.

El magmatismo relacionado con las rocas plutónicas ha sido considerado de carácter calcoalcalino (Roldán-Quintana, 1991-1994-2002; Valencia-Moreno *et al.*, 1999, 2001, 2003). Además, es conocido que la mayoría de los yacimientos minerales, incluyendo los pórfidos cupríferos y skarns más importantes de Sonora, se relacionan espacial y temporalmente con este magmatismo (Clark *et al.*, 1982; Damon *et al.*, 1981, 1983 a y b; Pérez-Segura, 1985, 2006; Staude y Barton, 2001; Valencia, 2005; Barra *et al.*, 2005; Valencia-Moreno *et al.*, 2006).

Formación Tarahumara

Las andesitas y rocas asociadas de la Formación Tarahumara (Wilson y Rocha, 1946), constituyen el equivalente volcánico del llamado Batolito Larámide en Sonora (Damon *et al.*, 1983b; Roldán-Quintana, 2002) y se distribuyen ampliamente en Sonora central. La edad de la Formación Tarahumara, Cretácico superior-Terciario inferior, ha sido establecida de manera indirecta en el río Yaqui, por su relación de discordancia sobre rocas del Triásico-Jurásico de la Formación Barranca (Wilson y Rocha, 1946). Localmente hay calizas y areniscas dentro de las que se han encontrado abundantes fósiles que indican una edad del Cretácico superior y un ambiente de depósito lacustre asociado al magmatismo (Hernández-Castillo y Cevallos-Ferriz, 1999; Baraldi-Campesi *et al.*, 2004; Baraldi-Campesi y Cevallos-Ferriz, 2005).

Las rocas de la Formación Tarahumara en la zona del río Yaqui consisten en más de 1000 metros de tobas andesíticas, dacíticas y tobas riolíticas fechadas por U-Pb en zircones en 90-70 Ma (McDowell *et al.*, 2001). Otras edades K-Ar reportadas por McDowell y Roldán-Quintana (1993) dan fechas más jóvenes, por ejemplo en tobas riolíticas se reportan 55.3 Ma (biotita) y 53.6 (feldespato), mientras que en una dacita porfídica se reportan 62.5 Ma (feldespato). En el río Yaqui las rocas volcánicas más an-

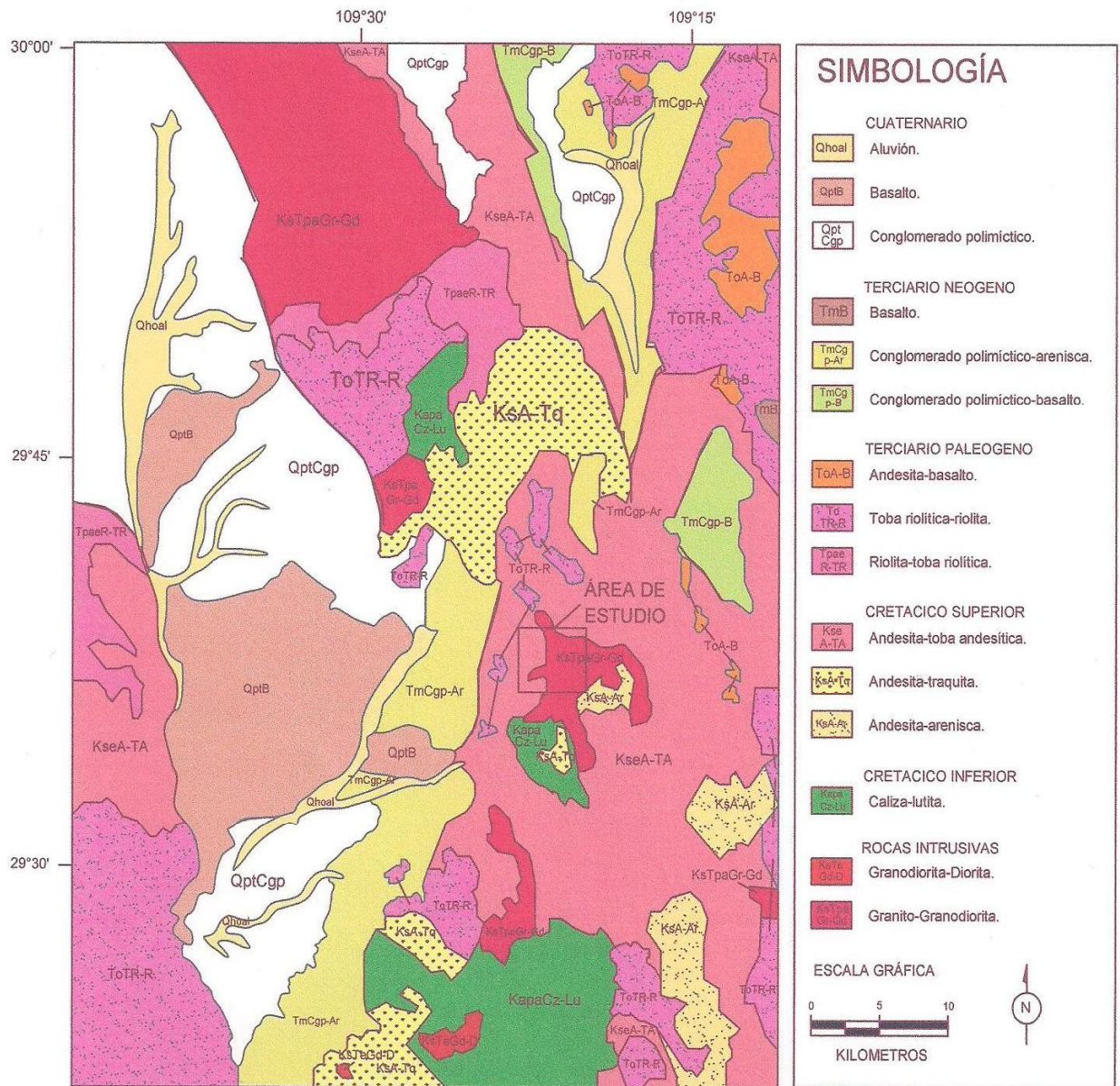


Figura I-1. Mapa geológico regional del noreste de Sonora, mostrando la geología general del área estudiada. Modificado a partir de la Carta geológico-minera Madera H129, del Servicio Geológico Mexicano (1999).

tiguas son flujos de andesita de 63.6 + 1.5 Ma (McDowell *et al.*, 1997). Es probable que estas últimas tengan más relación con un fenómeno de alteración hidrotermal muy extenso que afecta a estas rocas que incluye minerales como: biotita, cuarzo, clorita, epidota, calcita, sulfuros (Pérez-Segura, 2006). Las rocas de la Formación Tarahumara también se han correlacionado en parte con el llamado Complejo Volcánico Inferior de la Sierra Madre Occidental que tiene una edad de 68 a 52 Ma (McDowell y Keizer, 1977; McDowell y Mauger, 1994). En la misma Sierra Madre Occidental estas rocas están cubiertas por el Complejo Volcánico Superior de 38 a 28 Ma (McDowell y Keizer, 1977).

Secuencia volcánica Superior

Del Eoceno tardío al Oligoceno, la geología del noroeste de México está caracterizada por un episodio volcánico de amplia extensión, que construye la Sierra Madre Occidental, una de las provincias ignimbríticas más grandes del mundo (Paz-Moreno *et al.*, 2003). Este enorme volumen de tobas riolíticas es comúnmente referido como secuencia volcánica Superior (McDowell y Keizer, 1977), e hicieron erupción en un corto intervalo entre 34 y 27 Ma (McDowell y Clabaugh, 1979; Cochemé y Demant, 1991). La petrología y geoquímica de las lavas, así como las mineralizaciones calcofílicas asociadas, son típicas de lavas calcoalcalinas.

Evento intrusivo de diques

En varias partes del centro-oriente de Sonora ocurrieron eventos de intrusión de diques con dirección NW-SE, N-S y NE-SW, de composición riolítica, diabásica y dacítica (Solano-Rico, 1970), cortando a los sedimentos cretácicos y a los cuerpos intrusivos.

Secuencia bimodal

La secuencia Oligocena está cubierta por una secuencia bimodal compuesta de (1) tobas fluidales de cenizas pobremente soldadas, y (2) rocas basálticas. Los basaltos, abundantes en la parte norte de la SMO, tienen edades entre los 30 y 22 Ma (Swanson y McDowell, 1984; Montigny *et al.*, 1987; Paz-Moreno, 1992; Paz-Moreno *et al.*, 2003). Sus características químicas son las de toleítas continentales (Cameron *et al.*, 1989;

Demant *et al.*, 1989). El emplazamiento de esta secuencia bimodal estuvo relacionado a un episodio temprano de la extensión cortical (Cochemé y Demant, 1991).

1.3. Objetivo

El objetivo principal de esta investigación es establecer la caracterización de los distintos cuerpos intrusivos del área de estudio a partir de una cartografía y petrografía a detalle, y un estudio geoquímico de elementos mayores, trazas y fechamientos radiométricos, con el fin de identificar su ambiente tectónico y posibles filiaciones genéticas. Además de las relaciones con el vulcanismo anterior y posterior a estos cuerpos.

1.4. Metodología

El trabajo de campo consistió en un reconocimiento general de los afloramientos más representativos de las rocas del área de interés, seguido de un muestreo sistemático que fue efectuado en distintas visitas al área de trabajo, tomando las medidas preventivas necesarias para evitar una contaminación en la muestra.

La fase de gabinete inicial consistió en una recopilación y análisis bibliográfico del área y temas relacionados, enfocados en el estudio de rocas ígneas intrusivas, con especial interés en las rocas gabroicas. Esto con el objeto de comparar trabajos reportados para la Sierra La Madera y el Evento Laramide en general, en Sonora. Se llevó a cabo una recopilación y uso de planos geológicos y topográficos existentes para llevar a cabo un estudio cartográfico a detalle, con ayuda de las cartas topográficas Divisaderos H12D25 y Basuchi H12D26. Así como un estudio fotogeológico del área, con ayuda de las ortofotos H12D25C, H12D25F, H12D26A y H12D26D.

La elaboración de secciones delgadas para el estudio petrográfico se llevó a cabo en distintas etapas. La selección, cortado, pegado y pulido de muestras de las primeras excursiones de campo, se realizó en los laboratorios de laminado del Departamento de Geología de la UNISON y del CICESE. La terminación de éstas y la preparación de láminas de la última excursión se realizaron en el *Laboratoire de Pétrologie*

Magmatique de l'Université Paul Cezanne, Francia. La revisión, descripción y toma de imágenes del estudio petrográfico se llevó a cabo en el Departamento de Geología de la UNISON, y el conteo de puntos en la Estación Regional del Noroeste de la UNAM.

El trabajo de molienda y separación mineral fina para fechamientos radiométricos por el método ^{40}Ar - ^{39}Ar se llevó a cabo en las instalaciones del Área de Geocronología del CICESE. Las especificaciones sobre la metodología que se llevó a cabo desde la preparación de las muestras hasta el análisis de resultados se discuten más adelante, en el apartado referente a dicho estudio.

La trituración de las muestras para el estudio geoquímico se realizó en el Laboratorio de preparación de muestras de la Estación Regional del Noroeste de la UNAM, Hermosillo, utilizando una quebradora de quijadas de acero inoxidable. La pulverización fina se llevó a cabo utilizando un molino de canicas de ágata marca *Retsch tipo S 100*, del Laboratorio de preparación de muestras del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. El análisis químico para la determinación de elementos mayores, elementos trazas y tierras raras se llevó a cabo en los laboratorios Chemex, Canadá, con ICP-MS y XRF; y en *l'Université Paul Cezanne*, Francia, con ICP-AES y AAS. Los cálculos petroquímicos: obtención de la Norma CIPW, Mg#, más la construcción de diagramas: tipo Harker, TAS, etc., se llevaron a cabo una vez que los valores porcentuales de los óxidos mayores fueron normalizados en base anhidra, tras eliminar los volátiles (H_2O^+ y H_2O^-) y recalcular el total al 100%.

Finalmente, con la obtención de los resultados analíticos se procedió al tratamiento, discusión e interpretación de éstos, y a la confección y edición de planos, figuras y tablas, para finalizar con la elaboración del presente manuscrito de tesis.