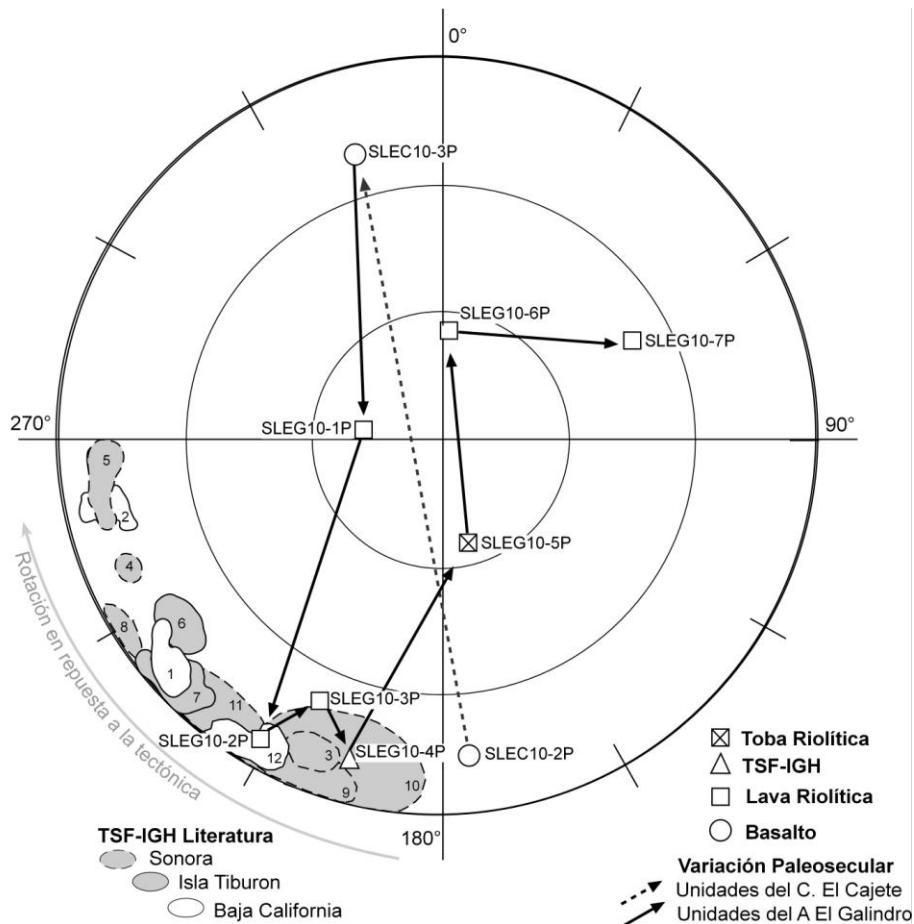


## Capítulo 5 Discusión y conclusiones

### 5.1 Discusión

#### 5.1.1 Comportamiento y fiabilidad de los resultados paleomagnéticos.

Los datos paleomagnéticos de la Sierra Libre presentados en el capítulo anterior comparten una característica muy peculiar, todas las unidades medidas presentan una polaridad invertida con fluctuaciones considerables y aparentemente aleatorias, en cuanto a dirección e inclinación se refiere, registrándose señales



**Figura 32.-** Estereograma del hemisferio inferior mostrando la variación de la inclinación y declinación del CRM en las muestras estudiadas en la Sierra Libre. Se presentan los campos de los vectores de remanencia paleomagnética obtenidos de la literatura para la Toba de San Felipe-Ignimbrita de Hermosillo: 1.- Santa Isabel Wash, 2.- Cuenca Santa Rosa (Stock et al., 1999); 3.-Hermosillo, 4.-Bahía Kino, 5.-Punta Chueca, 6.- Sierra Alta, 7.- Sierra Mayor (Oskin, 2002); 8.- Cerro La Ceja, 9.- San Miguel de Horcasitas, 10.- El Gavilán, 11.-El Pilar (Hernandez et al., 2008); 12.- Mesa El Pinole, Mesa El Burro y Mesa El Cartabón (Bennett, 2009). Se observa un aumento en la declinación de la TSF-IGH que es derivada de una deformación por cizalla dextral.

paleomagnéticas en los 4 cuadrantes, con cambios de inclinación desde subhorizontal hasta subvertical (Olguin-Villa et al., 2012). Sin embargo, en esas variaciones es posible observar una trayectoria en sentido opuesto a las manecillas del reloj (desde la muestra SLEC-2P hasta la SLEG10-7P, Figura 32). Esta rotación, que desarrolla un ciclo de hasta 360°, se caracteriza por un registro en el cual la mayoría de los datos se reparten en dos grupos con declinaciones antípodas e inclinaciones menores a los 45°, excepto por tres muestras con valores elevados entre los dos grupos. Este comportamiento puede estar asociado a la transición de una inversión del campo geomagnético o a una excursión del campo geomagnético.

Los resultados paleomagnéticos de la unidad TSF-IGH estudiada en este trabajo (Clave SLEG10-4P), presentan las mismas características que las encontradas en los afloramientos de la misma unidad estudiados en Baja California y en Sonora (Figura 32), las cuales han sido ampliamente documentadas en la literatura en numerosos estudios (Stock et al., 1999; Oskin et al., 2001; Hernandez et al., 2008; Bennett, 2009; Olguín-Villa, 2010; Darin, 2011; Olguín-Villa et al., 2012; Skinner et al., 2012). Estas características comprenden una polaridad inversa con una dirección de remanencia magnética hacia el suroeste y con una baja inclinación (Fig. 32). Estos rasgos pueden observarse también en algunas de las lavas riolíticas subyacentes SLEG10-2P y SLEG10-3P, sugiriendo que estas erupciones ocurrieron de manera sucesiva en un corto tiempo.

Bennett (2009) en el análisis de nuevos resultados paleomagnéticos de la TSF-IGH, considera como un vector de referencia estable a las direcciones de remanencia de aquellos afloramientos de la TSF-IGH en Baja California que

permanecen sub-horizontales al Oeste del escarpe del Golfo de California y no presentan deformación estructural. Dicho vector de referencia estable presenta solo algunos grados más de declinación que los valores encontrados en la unidad TSF-IGH en este estudio y los reportados en las localidades de Sonora Central, a una distancia considerable del Golfo de California ([Hernandez et al., 2008](#); Ver tablas de resultados paleomagnéticos en [Anexos](#)).

En los resultados de este trabajo se observa también que las declinaciones de los vectores magnéticos de la TSF-IGH, difieren un poco de los encontrados en localidades cercanas al Golfo de California, existiendo una dispersión de los datos en función de su ubicación en el espacio ([Fig. 32](#)). [Olguin-Villa \(2010\)](#) muestra que en la región de Cataviñá, Baja California, ubicada fuera del escarpe del Golfo de California en el límite Occidental de los vestigios TSF-IGH, los vectores de remanencia magnética presentan una declinación de  $209.1^\circ$  y una inclinación de  $-5.4^\circ$ . Estos valores son casi iguales a los reportados por [Bennett y Oskin \(2012\)](#) como vectores de referencia estable ( $212^\circ$  y  $-2^\circ$  respectivamente). Sin embargo, para localidades ubicadas dentro de la Provincia Extensional del Golfo de California como Cuenca Santa Rosa en Baja California ([Stock et al., 1999](#)), que han sido fuertemente basculadas por los procesos tectónicos relacionados a la apertura del Golfo, los vectores de remanencia magnética de la TSF-IGH presentan una declinación más elevada, mostrando una rotación de en función de la tectónica transtensional ([Figura 32](#)). Un ejemplo en Sonora de la afectación en los vectores de la remanencia paleomagnética de la TSF-IGH, por la tectónica de cizalla dextral, es el de la localidad costera de Punta Chueca, donde los afloramientos estudiados muestran

también elevadas declinaciones de hasta 270° (Oskin, 2002). De acuerdo a estos comportamientos en la variación del vector de remanencia paleomagnética, consideramos que los resultados obtenidos en nuestro estudio de la TSF-IGH son fiables y que la secuencia analizada no presenta una rotación importante.

#### 5.1.2 Ubicación en el tiempo y en la escala de polaridad geomagnética

La secuencia litológica estudiada en la Sierra Libre presenta un amplio registro del volcanismo durante el límite entre el Mioceno Medio y el Mioceno Superior. Esta secuencia es marcada por la presencia de dos magmatismos fundamentales, divididos en un volcanismo de Arco continental y uno post-Arco. Los estudios realizados en el presente trabajo fueron enfocados a los “vestigios” del magmatismo post-arco. El inicio de este magmatismo en la Sierra Libre, de acuerdo con la caracterización petrológica realizada por Barrera-Guerrero (2012), ocurre en el Mioceno medio con la aparición de modestos derrames de basalto relacionados a una serie transicional. Unidades similares han sido originalmente fechadas por MacMillan y otros (2003) en 13 Ma y por Vidal-Solano y otros (2005) en 12.6 Ma. Sobreyaciendo a las unidades máficas ocurre el Evento Volcánico Hiperalkalino constituido por potentes derrames de riolitas fluidales e ignimbritas, entre las que se encuentra la Ignimbrita de Hermosillo/Toba de San Felipe (Barrera-Guerrero, 2012). Barrera-Guerrero (2012) reconoce, que cubriendo a la secuencia hiperalkalina en la Sierra Libre, ocurre un derrame con alta densidad y de composición intermedia a félsica que forma parte del volcanismo anorogénico post-Arco. Esta unidad de afinidad toleítica fue relacionada del volcanismo islandítico del Mioceno Superior por Vidal-Solano (2005) y constreñido en los rangos de edades que van de los 11.5 a los

10.4 Ma (Vidal-Solano et al., 2007). Estos datos geocronológicos permiten sugerir que nuestra secuencia puede encontrarse entre 12.6 y 11.5 Ma aproximadamente.

Un trabajo análogo al presente estudio fue realizado por Alva-Valdivia et al., (2000) en rocas volcánicas del centro de México. En ese trabajo se encontraron algunas polaridades inversas con edades absolutas de  $10.99 \pm 0.23$  relacionadas con una posible Crona **C5r.1r** (10.94-11.05), otras con edades publicadas de  $12.0 \pm 2.0$  dentro de la Crona **C5r.1r-C5Abr** (10.94-11.93). Esto fue establecido de acuerdo a los datos de la escala de polaridad geomagnética reportados por Cande y Kent, (1995), lo cual podría ubicar en el tiempo a los resultados de las magnetizaciones inversas encontrados en la Sierra Libre dentro de la misma Crona. Sin embargo, inconsistencias encontradas para el Mioceno medio en la escala de polaridad de Cande y Kent (1995) fueron revisadas con detalle en Aziz et al., (2003). Para fines de nuestra discusión sobre la ubicación en tiempo de nuestros datos paleomagnéticos, se utilizará la nueva escala de polaridad para el Mioceno medio, que además fue calibrada astronómicamente. Esta escala que contempla varias inversiones de polaridad entre los 12.9 y los 10.6 Ma, será considerada a continuación para ubicar en el tiempo la secuencia litológica estudiada (Figura 33).

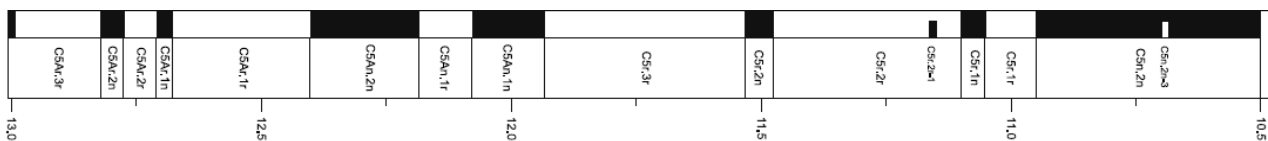


Figura 33.- Escala de polaridad Geomagnética y (sub)cronas correspondientes al Mioceno Medio-Superior. Edad en Ma. Tomado de Aziz et al., 2003.

Dentro de los rangos de tiempo antes mencionados se encuentra la subcrona más antigua de polaridad inversa, que es representada por la notación **C5Ar.3r**. Esta

contempla un pequeño rango de edad de 12.9 a ~12.8 Ma dentro del cual habría que incluir a todos los datos paleomagnéticos obtenidos a partir del presente estudio, situación que no es posible dado que las edades más antiguas reportadas en la literatura para la TSF-IGH son valores menores de 12.8 Ma. Además, esta hipótesis tendría que contemplar que todos los episodios volcánicos post-arco ocurrieron en un lapso de tiempo de 100 Ka. Por otro lado, la siguiente subcrona de polaridad inversa **C5Ar.2r** se encuentra en un período de tiempo todavía más corto a los ~12.75, por lo tanto no podría ser tomada en cuenta para nuestro estudio. Una siguiente subcrona es la **C5Ar.1r** que empieza aproximadamente a los 12.70 Ma y acaba a los ~12.35. Esta es una posible subcrona para el constreñimiento temporal de las magnetizaciones en los datos obtenidos en la Sierra Libre que además contempla un periodo de 350 Ka.

Otras posibilidades, para la delimitación temporal de la secuencia estudiada, aunque de edad más joven, son por un lado, la subcrona **C5r.3r** que comprende un periodo de tiempo entre los 11.96 y los 11.51 Ma., así como la subcrona **C5r.2r** que contempla los 11.48 a los 11.05 Ma. Ambas son de polaridad inversa y pudieran acotar no solamente a los basaltos que inician la secuencia, si no a todas las magnetizaciones medidas en la Sierra Libre.

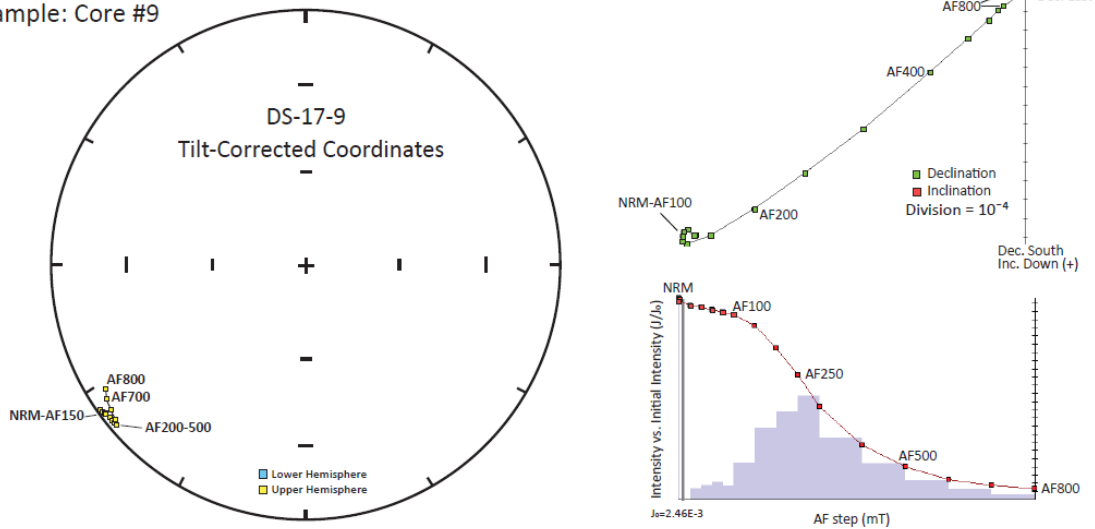
La nueva escala del Tiempo Geológico 2012 ([Gradstein et al., 2012](#)) incluye una escala de polaridad geomagnética más reciente. Esta contempla una actualización de los intervalos con polaridad invertida que fueron anteriormente contemplados en nuestra discusión. Los valores que corresponden a las posibles

subcronas son: **C5r.3r** (12.049 a 11.657 Ma), **C5An.1r** (12.272 a 12.174 Ma), **C5Ar.1r** (12.735 a 12.474).

La existencia en la costa de Sonora de un volcanismo de edad  $12.56 \pm 0.1$  Ma, que además no está relacionado petrológicamente al evento hiperalcalino (toba riolítica orogénica con biotita), ha mostrado de acuerdo a estudios paleomagnéticos, guardar también una señal de polaridad inversa con características de baja inclinación y dirección SW (Darin, 2011; Figura 34). Este evento debió haber ocurrido dentro de la subcrona **C5Ar.1r** (12.735 a 12.474). Por otro lado, Bennett (2009) reporta que la TSF-IGH tiene una edad de  $12.50 \pm 0.08$  Ma y estipula que debió depositarse durante la subcrona de polaridad invertida **C5Ar.2r** (12.401 a 12.678 Ma) de Cande y Kent (1995), aunque bajo la nueva actualización en Gradstein y otros (2012) corresponde también a la **C5Ar.1r**. Sin embargo, la edad de la TSF-IGH en la Sierra Libre ha sido obtenida en sanidinas en 12.34 Ma (MacMillan et al., 2006), mostrando que no es posible hacer una simple correlación geocronológica en esta unidad.

## A DS-17, Tuff of San Ignacio (Mtsi)

Example: Core #9



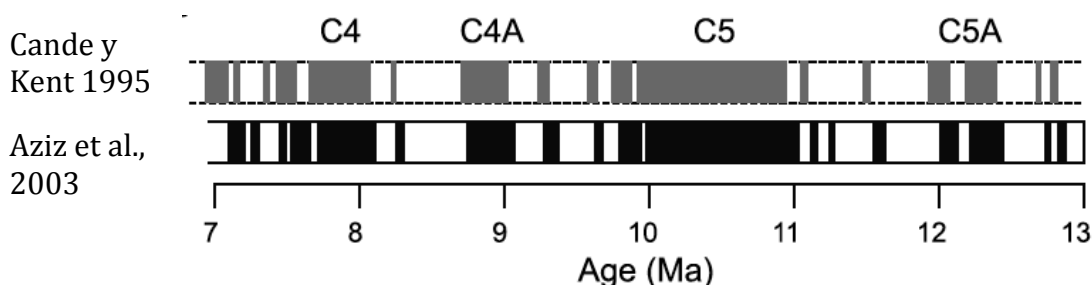
*Figura 34.- Datos paleomagnéticos de una unidad volcánica sincrónica al volcanismo estudiado en la Sierra Libre. Tesis de maestría de Mike Darin, comunicación personal.*

Recientemente, ha sido propuesto que la edad de la TSF-IGH obtenida en las sanidinas de la mayoría de los trabajos de la literatura (promedio de 12.37 Ma), no corresponde a la edad de la erupción (Vidal-Solano, 2011). Edades más jóvenes han sido encontradas tanto en Pómez (11.7-11.9Ma, Gómez-Valencia et al., 2008), en enclaves traquíticos (12.03 Ma, Stock et al., 2008; Vidal-Solano et al., 2008b), como en sanidinas (11.8 Ma y 11.92 Ma, López-Martínez et al., 2010 y Till et al., 2009). Esto sugiere que la erupción de la TSF ocurrió después de las inversiones de las subcronas **C5An.1r** (12.272 a 12.174 Ma) y **C5Ar.1r** (12.735 a 12.474).



### 5.1.3 implicaciones petrogenéticas

Al tomar en cuenta que el evento post-arco en la Sierra Libre, a pesar de estar dominado por fuertes coladas de composición riolítica hiperalcalina, tiene la presencia de basaltos transicionales ligados genéticamente con estas unidades (Barrera-Guerrero, 2012), resulta una connotación petrológica importante, porque a pesar de manifestarse en un periodo de tiempo corto, implicaría que fue lo suficientemente amplio para permitir un cambio a un evento dominado por líquidos muy diferenciados. Es por eso que consideramos como una mejor opción la subcrona **C5r.3r** (11.657- 12.049 Ma. Gradstein et al., 2012) para la delimitación temporal de la secuencia estudiada. Bajo esta asunción líquidos basálticos transicionales pudieron diferenciarse durante un tiempo suficiente para dar paso a la formación y acumulación de un intenso magmatismo félsico, el cuál pudo manifestarse en un rango de tiempo de ~400 mil años. Cabe señalar que es notable cómo el incremento de apariciones de polaridad inversa crece bajo la escala de polaridades geomagnéticas afinada astronómicamente de Aziz et al. (2003) en comparación con las viejas referencias de Cande y Kent (1995, Figura 35).



5.2

**Figura 35.-** Comparación visual de las escalas de polaridades magnéticas mencionadas en este trabajo. Color negro; polaridad normal. Color blanco; polaridad inversa.

## Conclusiones

El presente trabajo arroja las siguientes conclusiones:

- (1) Las direcciones de remanencia magnética característica de las unidades estudiadas en la Sierra Libre presentan magnetizaciones con polaridad inversa. Este fenómeno puede estar asociado a una transición de inversión del campo geomagnético o a una excursión del campo geomagnético. Esto ocurrió durante una de las subcronas de polaridad invertida propuestas en la escala de polaridad Geomagnética (**C5r.3r**; [Gradstein, 2012](#)).
- (2) Los resultados de la remanencia paleomagnética de la TSF-IGH presentados en este trabajo muestran ser iguales o muy similares a los reportados en la literatura para vectores de referencia magnética estable, sugiriendo que no existe una rotación importante en el bloque que contiene la secuencia estudiada. Bajo esta premisa se corrobora la confiabilidad de dichos resultados.
- (3) Los resultados paleomagnéticos obtenidos en este estudio aunado al conocimiento petrológico de la secuencia estudiada, nos permite proponer que la ocurrencia del evento post-arco tuvo lugar en el Tortoniano, como respuesta a un cambio geológico mayor registrando el límite entre el Mioceno Medio y el Mioceno Tardío.

### 5.3 Perspectivas

Un trabajo futuro deberá consistir en la interpretación de los resultados de anisotropía de susceptibilidad magnética para la determinación de los puntos de emisión de este intenso volcanismo que conforma a la Sierra Libre. Además es necesaria una posterior interpretación de la mineralogía magnética para la caracterización de los minerales principales portadores de la magnetización.

Es importante continuar aplicando esta metodología paleomagnética en las unidades que subyacen y sobreyacen al paquete litológico aquí estudiado. Con esto se podrá acotar con más precisión el rango temporal en el cuál se emplazaron las unidades volcánicas y permitirá mostrar una buena evolución de la variación del Campo Geomagnético de la época y de la región.