



PALEOMAGNETIC STUDY OF THE VOLCANIC SEQUENCES FROM THE PROTO GULF FORMATIONS, SONORA SOUTHERN REGION (GUAYMAS), MEXICO.

Velderrain-Rojas, L.A.^{1*}, Vidal-Solano, J.R.², Alva-Valdivia, L.M.³

¹ Instituto de Geología, ERNO-UNAM, Hermosillo, Sonora, México.

² Departamento de Geología, UNISON, Hermosillo, Sonora, México.

³ Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica, UNAM, CDMX México.

*e-mail: Luis1523@hotmail.com

ABSTRACT

The Guaymas region is located at the Sonora south coast and represents the Miocene volcanism related to the proto-Gulf of the California Rift. This region consists mainly of intermediate lavas at the base and felsic lavas at the top, which include a hipabisal intrusive of granophiric texture. This magmatic sequence named Guaymas Group (12.5 - 10 Ma) is overlying discordantly the orogenic lavas related to the Miocene continental arc and is covered by a sequence of basaltic rocks. The dominant physiography shows a semicircular structure previously defined as “semicircular caldera-like structure”. However, the paleomagnetic study of the volcanic sequence defines a tectonic (non-volcanic) origin for this structure. The paleomagnetic data suggest a clockwise vertical-axis rotations up to 90°. The rotation is related to torsion of a cortical block subject to a dextral transtensional system, which occurred after the volcanism of the Guaymas Group (<10 Ma) and before the formation of the basaltic lavas of approximately 8 Ma.

Keywords: Guaymas, proto-Gulf Rift, dextral transtensional system, paleomagnetism.

RESUMEN

La región de Guaymas ubicada en la costa Sur del estado de Sonora, representa un volcanismo miocénico relacionado al Rift del Proto-Golfo de California. Esta región consiste principalmente de lavas intermedias en la base y lavas félsicas hacia la cima, que están intrusionadas en algunos sectores, por un cuerpo de textura granofírica. Esta secuencia magmática nombrada como Grupo Guaymas (12.5 - 10 Ma), cubre discordantemente a lavas orogénicas relacionadas al arco continental del Mioceno, y es cubierta por una secuencia de lavas basálticas. La fisiografía dominante muestra una estructura semicircular definida anteriormente como una caldera. Sin embargo, el estudio paleomagnético de la secuencia volcánica define un origen tectónico (no volcánico) para esta estructura. Los resultados paleomagnéticos en la secuencia volcánica félsica de Guaymas, sugieren una rotación diferencial significativa de hasta 90° en sentido de las manecillas del reloj. Esta deformación corresponde a la torsión de un bloque cortical sujeto a un sistema transtensional de tipo dextral, que ocurrió posteriormente al emplazamiento del volcanismo del Grupo Guaymas (<10 Ma) y antes de la formación de las mesas basálticas de aproximadamente 8 Ma.

Palabras clave: Guaymas, Rift del Proto-Golfo; sistema transtensional, paleomagnetismo.

El registro Terciario presenta una amplia extensión en la costa Sur y Noroeste de Sonora, dominado principalmente por secuencias de rocas ígneas de distintas afinidades petrogenéticas asociadas con eventos de subducción y distensión de acuerdo con trabajos previos (Roldán-Quintana *et al.*, 2004; Mora-Klepeis, McDowell, 2004; Vidal-Solano *et al.*, 2005; Till *et al.*, 2009). Durante el establecimiento del actual límite de placas (Pacífico-Norteamérica; Fig. 1) aproximadamente a los 12.5 Ma (Vidal-Solano *et al.*, 2005), una deformación tectónica transtensiva es evidenciada en la Provincia Extensional del Golfo de California (PEG, Bennet, 2014, Herman, 2013). Esta afectó a distintas localidades, entre ellas, la región de Guaymas (costa Sur del estado de Sonora), la cual forma parte de los vestigios volcánicos del Mioceno relacionados al Proto-Golfo de California. La geología de Guaymas está conformada por un volcanismo intermedio-félsico

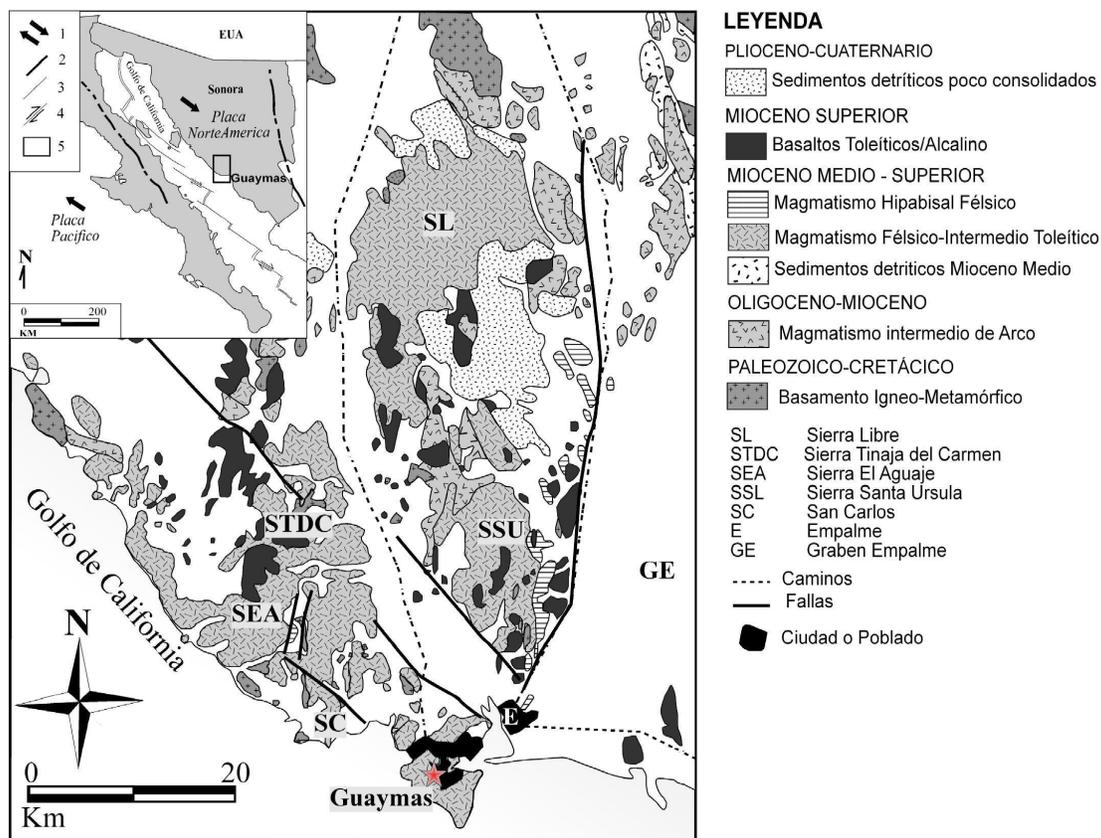


Figura 1. Mapa geológico regional de la costa sur de Sonora modificado de Gómez-Valencia y Marisela (2014). 1: Movimiento relativo actual de la placa Pacífico y placa Norteamericana (Valencia-Moreno *et al.*, 2011); 2: Límites de la Provincia Extensional del Golfo (Till *et al.*, 2009); 3. Principales estructuras y zonas de falla (Aragón-Arreola *et al.*, 2005); 4: Fallas transformantes (Calmus *et al.*, 2011); 5: Localización del área de estudio. La estrella roja muestra la ubicación de la zona de interés.

nombrado como Grupo Guaymas; lavas intermedias a la base de los cerros, sobreyacidas por un volcanismo félsico en el cual se encuentra un cuerpo hipabisal granofríctico que se expone además en otras localidades (Sierra El Aguaje, bordes del Graben de Empalme, Suroeste de Sonora, Johnpeer, 1977; Cochemé, 1981; Mora-Álvarez, McDowell, 2000; Vega-Granillo *et al.*, 2004; Velderrain-Rojas, 2014; Fig. 1). El Grupo Guaymas se encuentra sobreyaciendo discordantemente a un conjunto de lavas máficas a intermedias, nombradas informalmente como grupo San Carlos (Gómez-Valencia, 2014), ligadas al magmatismo de arco del Mioceno Inferior, producto de la subducción de la Placa Farallón bajo la Norteamericana. Wilson (1978) le asignó un carácter calcoalcalino a estas lavas y una edad de 17.8 ± 0.5 Ma. Finalmente, el Grupo Guaymas es cubierto discordantemente por un volcanismo máfico representado por basaltos que llegan a formar mesetas sub-horizontales y que es considerado el más joven del área, nombrados como Basaltos de Empalme (Johnpeer, 1977) o Basalto Las Trincheras con edades que van desde los 10.3 ± 0.3 Ma a 8.5 ± 1.5 Ma (Mora-Álvarez, 1992), asociando su emplazamiento a una etapa extensional sin deformación de 10–8 Ma (Gastil, Krummenacher, 1977; Paz-Moreno, 1992; Mora-Álvarez, 1992; Roldán-Quintana *et al.*, 2004; Till *et al.*, 2009; Gans *et al.*, 2013). En Guaymas, particularmente, la fisiografía dominante muestra una estructura semicircular (Fig. 2) definida anteriormente como una caldera (Jonhpeer, 1977), asociada ahora en este trabajo al sistema transtensivo que imperó en la región durante el Mioceno medio-superior.

Así, con el objetivo de determinar la evolución tectónica en la región, se investigó el registro volcánico en la región de Guaymas utilizando el método paleomagnético y se propone un sistema de deformación que dio



lugar a la estructura circular que domina en el área de estudio. Además, esta investigación contribuye con el conocimiento de la evidencia tectónica transtensiva que afectó a la costa de Sonora durante el Mioceno.

Se muestreó un total de 14 sitios (103 núcleos) distribuidos en el Cerro El Vigía, donde su morfología presenta una aparente curvatura y donde el registro geológico es el más completo. Las unidades muestreadas son de carácter lávico, explosivo e hipabisal de características granofíricas, todas ellas formando parte de la secuencia félsica del Grupo Guaymas. Se realizaron pruebas piloto de cada sitio (un espécimen por sitio) para determinar el método adecuado con el que se desmagnetizaron el resto de las muestras; ya sea una desmagnetización por campos alternos (AFD) o una desmagnetización por temperatura (THD). Se observó que en las unidades lávicas y explosivas, las direcciones se determinaron mejor con la desmagnetización por campos alternos, mientras en el cuerpo hipabisal granofírico la dirección característica se pudo aislar mejor por una desmagnetización térmica. El muestreo se realizó en una jornada de campo de 7 días. El procesamiento de los núcleos, así como la desmagnetización de los especímenes, tanto por el método de campos alternos como por temperatura, para su posterior análisis, se realizó en el Laboratorio de Paleomagnetismo del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en un periodo de 45 días. La NRM se midió con un equipo JR5 *Spinner Magnetometer*. La desmagnetización por campos alternos se realizó con un desmagnetizador *Molspin Limited*.

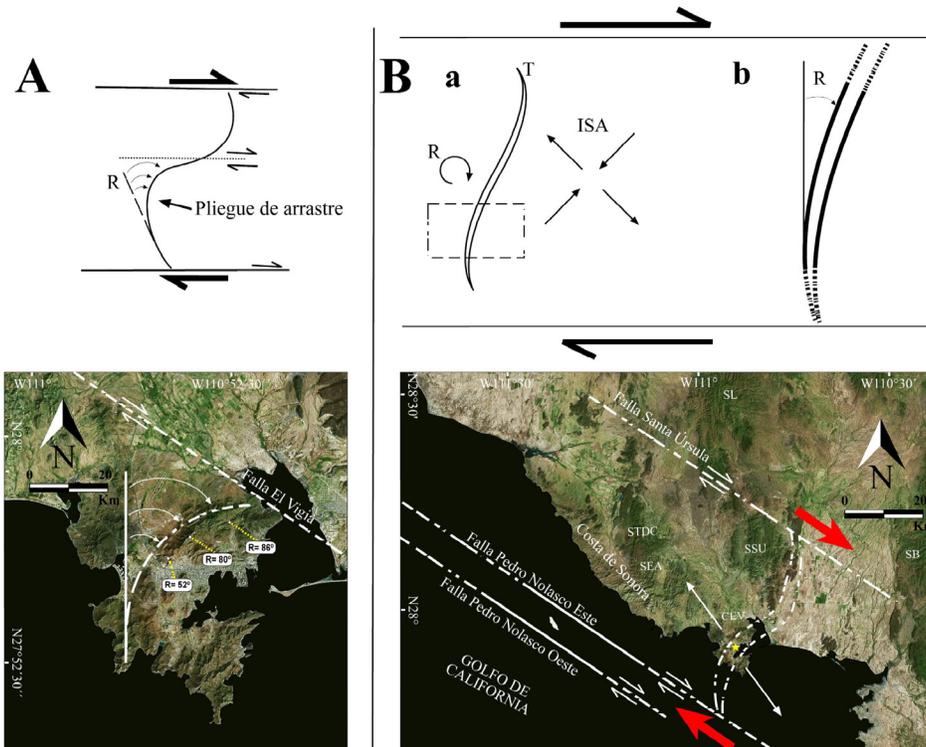


Figura 2. A: Mega pliegue de arrastre, provocado por una falla dextral. B: Formación de una estructura sigmoidea similar a una mega grieta de tensión (“tension gashes”), en un sistema de cizallamiento dextral. La estrella amarilla muestra el área de estudio y las flechas rojas indican los principales movimientos dextrales, mientras que las flechas blancas muestran la dirección de extensión. R, rotación; ISA, ejes de estiramiento, de acuerdo a Coelho *et al.* (2006); SL, Sierra Libre; STDC, Sierra Tinaja del Carmen; SSU, Sierra Santa Úrsula; SEA, Sierra El Aguaje; SB, Sierra Bacatete; CEV, Cerro El Vigía.

Los 14 sitios muestreados en el Cerro El Vigía y sus direcciones medias (declinación e inclinación) se ilustran en la Tabla 1. De los 14 sitios, 5 representan al Granófiro, y un sitio a una ignimbrita que presentan polaridad normal y una dirección media de dec: 78.5° , inc: 41.4° , mientras que 8 sitios que corresponden a



lavas e ignimbritas que sobreyacen al cuerpo granofírico, presentan una polaridad inversa con una dirección media de dec: 267° , inc: -34° . Los valores de confiabilidad (k , $\alpha 95$) sugieren que los datos fueron tomados de manera adecuada. Los resultados de la remanencia magnética muestran que en las unidades rocosas félsicas lávicas y explosivas del Grupo Guaymas en el Cerro El Vigía, se logró aislar la magnetización remanente característica (ChRM) con campos alternos. La tendencia al origen es bien definida a 100 mT, eliminando la componente secundaria en los primeros 3 pasos de desmagnetización, posiblemente conteniendo minerales de muy baja coercitividad. Por otro lado, los resultados muestran que el cuerpo hipabisal (granofíro), tiende al origen en el diagrama ortogonal por desmagnetización térmica, logrando eliminar una fuerte componente secundaria de los 660°C a los 680°C (titanohematita). De acuerdo a la declinación media esperada para el área de estudio, se identificó que las unidades han sufrido una rotación, es decir que pertenecen a un bloque que ha girado alrededor de un posible eje vertical, donde el movimiento latitudinal es casi nulo.

La secuencia en el Cerro El Vigía (CEV), se encuentra en un rango entre 11 y 10 Ma (de acuerdo a fechamientos radiométricos y relaciones magnetoestratigráficas). Este cerro representa en el espacio una estructura que había sido considerada por Johnpeer (1977), como una supuesta caldera, por presentar una forma semicircular. Sin embargo, la deformación que afectó a la costa de Sonora por la apertura del Golfo de California y que ha sido reportada en trabajos anteriores cerca de la costa (Herman, 2013), nos hace pensar, que esta estructura semicircular, puede ser el producto de una deformación tectónica de la corteza, que perturbó la región de Guaymas en un rango entre 11 y 10 Ma. Comparando la dirección media del área de muestreo, es decir, del conjunto de sitios del Cerro El Vigía ($D = 85.3$, $I = 36.1$) y la referencia del polo de Norteamérica a los 10 Ma ($D = 4.07$, $I = 46.8$), considerando el rango de edad de los sitios del CEV, se obtiene una rotación de 81° en sentido horario, demostrando una rotación significativa para el Mioceno

Tabla 1. Estadística de las direcciones medias y VGPs de todos los sitios muestreados en el Cerro El Vigía.

Site	Lat	Long	n/N	Dec	Inc	k	$\alpha 95$	Pol	VGP			AF/Th	Rx
									Lat	Lon	Paleolat		
1	27.94281°	110.90220°	8/8	253.2	-47.2	70.51	6.6	I	-26.6	139.5	-28.4	AFD	IGN
2	27.94178°	110.90283°	5/5	273.5	-32.5	132.57	6.7	I	-5.2	141.8	-17.7	AFD	IGN
3	27.94178°	110.90283°	7/7	274.4	-32.6	55.93	8.1	I	-4.5	141.4	-17.7	AFD	LAVA
4	27.92643°	110.91774°	8/8	56.5	61.8	196.64	4	N	42.5	-55.1	43	THD	GRF
5	27.94186°	110.90448°	6/8	267.5	-32.1	34.57	11.6	I	-10.2	144.7	-17.4	AFD	IGN
6	27.94483°	110.90183°	7/9	254.6	-32.2	63.48	7	I	-21.6	149.4	-18.1	AFD	IGN
7	27.94571°	110.90009°	7/8	277.3	-22	110.89	5.8	I	1	145.6	-11.4	AFD	IGN
8	27.94669°	110.86607°	6/9	272.9	-50.4	164.16	5.2	I	-11.8	130	-31.1	AFD	LAVA
9	27.94085°	110.86469°	8/9	91	18.5	26.55	10.9	N	3.6	-29.7	9.5	THD	GRF
10	27.93664°	110.85599°	8/9	95.9	46.1	54.81	7.5	N	7.8	-47.9	27.5	THD	GRF
11	27.93543°	110.85669°	8/9	86.1	52.8	154.33	4.5	N	17.9	-49.7	33.4	THD	GRF
12	27.93513°	110.85467°	7/7	72.8	49.3	124.81	5.4	N	27.5	-42.3	30.2	THD	GRF
13	27.93504°	110.86153°	6/6	68.7	19.9	86.79	7.2	N	23.5	-20.2	10.3	AFD	IGN
14	27.95177°	110.89521°	6/10	269.8	-18.3	168.25	5.2	I	-4.6	150.9	-9.4	AFD	LAVA

Lat y Long: Latitud y longitud que muestran las coordenadas del sitio muestreado; n/N: Número de muestras seleccionadas del sitio sobre el total de analizadas; Dec e Inc: son las direcciones medias calculadas para cada sitio; k y $\alpha 95$: parámetro de dispersión y límite de confianza; Pol: Polaridad determinada para cada sitio; VGP: Lat y Long son las coordenadas calculadas para los VGPs; Paleolat: es la latitud antigua del sitio; Af/Th: indica el método que se usó para desmagnetizar el sitio; Rx: indica los tipos de rocas; Ign: Ignimbrita y GRF: Granofíro

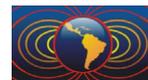


Superior posterior a los 10 Ma en el Cerro el Vigía. De acuerdo con estos datos, es posible plantear un origen, diferente al volcánico, para la estructura semicircular y dos diferentes orígenes tectónicos ligados con un sistema de deformación transcurrente en la región (Fig. 2). El primer escenario contempla la formación de un megapliegue de arrastre, provocado por una falla dextral, denominada aquí como Falla El Vigía (FEV). Esta falla, de acuerdo a las relaciones geológicas, no afecta al volcanismo más joven (Basaltos de Empalme, aprox. 8 Ma) que cubre a la secuencia afectada. El segundo escenario considera una cinemática de un sistema de estructuras Riedell en esta localidad, proponiendo la formación de una estructura sigmoidea similar a una mega grieta de tensión (tensión gashes), formada a partir de un sistema de cizalla dextral, de acuerdo a Coelho *et al.* (2006). Conforme a lo anterior, el Cerro El Vigía, representaría un doblez del borde norte en la gran estructura sigmoidea. Esta estructura sería generada por una zona sujeta a la tensión provocada en un sistema transtensional dextral, el cual está delimitado al SW por la Falla San Pedro Nolasco Este (FSNE, Aragón-Arreola, 2005) en el Golfo de California y al NE, ya sea por una falla propuesta en este trabajo como Falla San Úrsula (FSU) o, la Falla El Vigía. Bajo estos esquemas sería posible explicar una rotación diferencial en el mismo bloque cortical, que contiene a las unidades litológicas, que es mayor en el NE (80-90°) y menor en el SW (50-60°), a diferencia del modelo propuesto por Waldron (2005) en Herman (2013), en donde la rotación es desarrollada por bloques individuales que tienen un mismo valor de rotación. El segundo escenario, aquí propuesto, permite explicar una cuenca con una dirección de extensión NW-SE que provoca un graben que está ahora parcialmente inundado por el mar, formando la Bahía de Guaymas. Este graben es entonces delimitado por el Horst El Vigía al Norte y el Horst San Rafael al Sur.

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por el apoyo para la realización de esta investigación dentro del programa de Maestría en Ciencias Geológicas 2014-2016 de la Universidad de Sonora. Asimismo, al M. en C. Antonio González, por su gran apoyo durante el trabajo paleomagnético.

Referencias

- Aragón-Arreola, M., Morandi, M., Martin-Barajas, M., Delgado-Argote, L., Gonzales-Fernández, A., 2005. Structure of the rift basins in the central Gulf of California: Kinematic implications for oblique rifting, *Tectonophysics* 409, 19-38
- Bennett, S. & Oskin, M. 2014, Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. Geology, Department of Earth and Planetary Sciences, University of California–Davis. 4 p.
- Calmus, T., Vega-Granillo, R., Lugo-Zazueta, R., 2011, Evolución geológica de Sonora durante el Cretácico Tardío y el Cenozoico, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México. Universidad Nacional Autónoma de México, *Instituto de Geología Boletín* 118, cap. 7, 227–266.
- Cochemé, J. J., 1981. Mise en évidence d'un granite subvolcanique associé aux laves tertiaires du Sonora (Mexique), *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Paris, tome 293, Serie II*, 989–992.
- Coelho, S. Passchier, C., Marques, F., 2006- Riedel-shear control on the development of pennant veins: Field example and analogue modeling, *Journal of Structural Geology* 28, 9, 1658–1669
- Gans, P.B., Herman, S., MacMillan, I., 2013. Late Miocene (12-6 Ma) transtensional faulting, block rotations, and volcanism during the inception of the Gulf of California oblique rift, southwestern Sonora, México, *Geological Society of America Abstracts with Programs* 45(6).
- Gastil G., Krummenacher D., 1977. Reconnaissance geology of coastal Sonora between Puerto Lobos and Bahia Kino, *Geological Society of America Bulletin*, 88, 189-198.
- Gómez Valencia, Alejandra Marisela, 2014. Evolución espacio-temporal y petrología del magmatismo Mioceno relacionado al cese de la subducción en el NW de México, Tesis de Maestría en Ciencias Geología, Universidad de Sonora, 270 p.



- Herman, S. W., 2013. A paleomagnetic investigation of vertical-axis rotations in coastal Sonora, Mexico: Evidence for distributed transtensional deformation during the Proto-Gulf shift from a subduction-dominated to transform-dominated plate boundary in the Gulf of California. University Of California, 38 p.
- Johnpeer, G. D., 1977. Reconnaissance geology and petrology of the Guaymas area, Sonora, Mexico. Tesis de Maestría, Arizona State University, 67 p.
- Mora-Álvarez, G., 1992. History of Cenozoic magmatism in the Sierra Santa Úrsula, Sonora, Mexico: Department of Geology, University of Texas, Austin. M. Sc. Thesis, 153 p.
- Mora-Álvarez, G., McDowell, F.W., 2000. Miocene volcanism during late subduction and early rifting in the Sierra Santa Ursula of western Sonora, Mexico, *en* Delgado- Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), Cenozoic tectonics and volcanism of Mexico, *Geological Society of America, Special Paper 334*, 123-141.
- Mora-Klepeis, G., McDowell, F. 2004. Late Miocene calc-alkaline volcanism in northwestern México: an expression of rift or subduction-related magmatism?, *J. South Am. Earth Sci. 17*, 297–310.
- Paz-Moreno, F.A., 1992. Le volcanisme mio-plio-quatenaire de l'Etat du Sonora (nordouest du Mexique): évolution spatiale et chronologique; implications pétrogénétiques: Université Aix-Marseille III, Thèse de Doctorat, 220 p.
- Roldán-Quintana, J., Mora-Klepeis, G., Calmus, T., Valencia-Moreno, M., Lozano- Santacruz, R., 2004. El graben de Empalme, Sonora, México: magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura del Golfo de California, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 21(3)*, 320-334.
- Till, C.B., Gans, P.B., Spera, F.J., MacMillan, I., Blair, K.D., 2009. Perils of petrotectonic modeling: A view from southern Sonora, Mexico, *Journal of Volcanology and Geothermal Research 186*, 160-168.
- Valencia-Moreno M., Ortega-Rivera M., 2011. Cretácico Tardío-Eoceno medio en el noroeste de México— evolución del arco magmático continental y su contexto geodinámico (orogenia Laramide). *Boletín del Instituto de Geología, UNAM 118*, 201-226.
- Vega-Granillo, R., de la O Villanueva, M., Vega-Granillo, L., Araux Sánchez, E., 2004. Geología Urbana y Riesgos Geológicos de la Región de Guaymas y San Carlos, Sonora. Colección textos académicos; 33, Universidad de Sonora, 205 p.
- Velderrain-Rojas, L. A., 2014. Contribución al estudio de los eventos volcánicos del Mioceno en la Sierra El Aguaje, porción Costera de Sonora, México, Tesis de Licenciatura, Departamento de Geología, Universidad de Sonora, 121 p.
- Vidal-Solano, J. R., Paz-Moreno, F.A., Iriondo, A., Demant, A., Cochemé, J.-J., 2005. Middle Miocene peralkaline ignimbrites in the Hermosillo region (Sonora, México). *Geodynamic implications, C. R. Geoscience 337*, 1421–1430.
- Wilson, R. T., 1978, Reconnaissance Geology and Petrology of the San Carlos Area, Sonora, Mexico, Masters of Science thesis: Arizona State University, Tempe, AZ, United States, 107 p.