

Roldán-Quintana, Jaime, 2011, Evolución del conocimiento de la geología de Sonora, México, *in* Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 1, p. 1-24, 7 figs., 2 tablas.

Capítulo 1

EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO DE LA GEOLOGÍA DE SONORA, MÉXICO

Jaime Roldán-Quintana*

RESUMEN

El estado de Sonora ha sido motivo de gran interés para naturalistas y estudiosos de las Ciencias de la Tierra desde el siglo XVII. Los misioneros jesuitas fueron los primeros en describir rasgos de la geología de Sonora y Baja California. Los primeros paleontólogos norteamericanos visitaron Sonora a mediados del siglo XVII. El primer geólogo mexicano que realizó investigación en Sonora fue José Guadalupe Aguilera, quien estudió el sismo de Bavispe en 1887.

Los estudios sobre estratigrafía continuaron en 1900, cuando Dumble estudió las rocas terciarias y triásicas de Sonora. El campo volcánico del Pinacate fue descrito por Bonillas en 1910. Durante los años 1922-27, Teodoro Flores, del Instituto Geológico de México, estudió la porción central del Estado. El primer estudio con metodología científica y que tuvo un gran aporte a la geología de Sonora fue hecho en 1939 por el geólogo Robert E. King. Los primeros estudios sobre el Golfo de California los realizó la Institución Scripps de California, en 1940.

En los años 50, el Servicio Geológico de los Estados Unidos, en colaboración con el Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México, publicaron una serie de estudios sobre yacimientos de Sonora. En los 60, Edward Wisser publicó un estudio sobre la geología y yacimientos minerales de la Sierra Madre Occidental. Al mismo tiempo, Carl Fries, Jr., del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y Paul E. Damon, de la Universidad de Arizona, realizaron los primeros estudios isotópicos sobre rocas cristalinas precámbricas.

La hipótesis de la megacizalladura Sonora-Mojave fue presentada por Silver y Anderson en 1974. En el año de 1985, el gobierno del estado de Sonora publicó la Carta Metalogenética del Estado. En 1982, se estableció una red geodésica en la porción central del Golfo de California, y en 1986 se volvió a medir, lo que permitió estimar el desplazamiento de Baja California con respecto al continente.

En 1991, la Sociedad Geológica de América publicó el *Special Paper* 254, donde aparecieron artículos actualizados sobre diversos temas de la geología de Sonora. En 1993, el gobierno del estado de Sonora y CESUES publicaron una compilación de la geología de Sonora a escala 1:500,000. En 1996, se publicó el *Special Paper* 301, de la Sociedad Geológica de América, sobre rocas mesozoicas de Sonora.

Con el fin de monitorear la falla Pitaycachi en el noreste de Sonora, el Instituto de Geología de la UNAM instaló en 2003 nueve estaciones sismológicas digitales. En 2005, la Sociedad Geológica de América publicó el *Special Paper* 393, con los pros y contras de la hipótesis de la megacizalladura Sonora-Mojave. En 2007, continuaron los estudios sobre rocas mesozoicas por personal del Instituto de Geología. En 2008 se realizó el Primer Congreso sobre la Geología y la Ecología del Noroeste de México.

Palabras clave: Historia, geología, Sonora, México.

ABSTRACT

The State of Sonora was of great importance for naturalists and people interested in Earth sciences since the xvii century. The Jesuit missionaries were the first in describing the geologic features of Sonora and Baja California. The first North American paleontologists visited Sonora in the middle of the xvii century. The first Mexican geologist to describe the geology of Sonora was José Guadalupe Aguilera, who studied the effects of the earthquake of Bavispe, in 1887.

The studies about stratigraphy continued in 1900, when Dumble described the Tertiary and Triassic rocks of Sonora. The volcanic field of El Pinacate was described by Bonillas in 1910. Between the years 1922-27, Teodoro Flores, from The Geologic Institute of Mexico, studied the central portion of Sonora. The first study in Sonora, using scientific methodology, was done by Robert E. King. His study provided a great deal of geologic information. The first studies on the Gulf of California were done in 1940 by the Scripps Institution of California.

In the fiftieths, the United States Geological Survey and the Mexican agency *Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México* published a series of bulletins about some mineral deposits of Sonora. In the sixtieths, Edward Wisser published a study about the geology and mineral deposits of Sierra Madre Occidental. At the same time, Carl Fries, Jr., from the Institute of Geology of UNAM, and Paul E. Damon of the University of Arizona, carried out the first isotopic studies in Precambrian crystalline rocks of Caborca, Sonora.

The hypothesis about the existence of the Sonora-Mojave Megashear was presented by Silver and Anderson in 1974. In 1985, the Government of the State of Sonora published a Metallogenetic Chart of Sonora. In 1992 was established a geodetic net in the central portion of the Gulf of California. This net was reoccupied in 1986, making possible to estimate the displacement of the Baja California Peninsula with respect to the continent.

In 1991, The Geological Society of America published the Special Paper 254, which contained updated articles on several topics of the geology of Sonora. In 1993, the Government of Sonora and CESUES published a compilation of the Geology of Sonora at 1:500,000 scale. In 1996 was published the Special Paper 301 by the Geological Society of America, which deals on the Mesozoic rocks of Sonora. In 2000 was held in Hermosillo the Fourth Meeting on the Geology of Northwestern Mexico.

In 2003, the Institute of Geology put in operation nine seismological stations in northeastern Sonora in order to monitor the activity of the Pitaycachi fault. In 2005, the Geological Society of America published the Special Paper 393, containing articles in favor of and against the hypothesis of the existence of the Sonora-Mojave Megashear. In 2007 geologists from the Institute of Geology continued the studies about Mesozoic rocks. In 2008 was held the first Congress on the Geology and Ecology of Northwestern Mexico.

Key words: History, geology, Sonora, Mexico.

*Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología UNAM, Apartado Postal 1039, Hermosillo, Sonora 83000.
E-mail: jaimer@servidor.unam.mx

INTRODUCCIÓN

El estado de Sonora, en el noroeste de la República Mexicana, es el segundo en extensión territorial a nivel nacional con 184,934 km². Sonora es privilegiado desde el punto de vista geológico por varias razones; en primer lugar, contiene la columna estratigráfica más completa del país, ya que existen rocas y fósiles prácticamente de todas las edades. En segundo lugar, es en el Estado en donde se ha identificado las rocas más antiguas de México. En tercer lugar, su vecindad con el Golfo de California, donde se localiza un límite de placas, le otorga una gran importancia para poder llevar a cabo estudios de frontera en tectónica de placas a nivel mundial.

También, Sonora es una región de gran interés para la búsqueda de recursos minerales, tanto metálicos como no metálicos. A la fecha, el Estado es líder en la producción de oro, cobre, molibdeno, grafito, wollastonita y otros minerales.

Sonora ha sido el foco de interés para naturalistas y estudiosos de las Ciencias de la Tierra desde hace mucho tiempo. Se tienen reportes escritos desde la mitad del siglo xvii, cuando el Estado formaba parte del Reino de la Nueva Vizcaya que era gobernado desde Culiacán, Sinaloa, y que en ese tiempo consistía en un territorio mucho más extenso hacia el norte y hacia el sur.

Posteriormente, entre 1900 y 1960, los estudios geológicos fueron muy escasos, hasta que finalmente en los últimos 45 años, el estudio de la geología de Sonora progresó de una manera acelerada, hecho que ha favorecido el desarrollo de actividades como la minería y la agricultura.

En el presente trabajo, se hará un análisis breve del desarrollo histórico del conocimiento de la geología de Sonora desde mediados del siglo xvii hasta el año 2005. El propósito es el poder identificar los trabajos de investigación más relevantes, que muestren los avances logrados en cada una de las disciplinas de la geología en el Estado, así como hacer notar aquellos eventos que no son necesariamente publicaciones, pero que contribuyeron al avance del conocimiento de la geología.

Debido a las limitaciones de espacio, en este artículo sólo se comentan los trabajos de mayor trascen-

dencia para el conocimiento de la geología; también se incluye de manera breve lo referente a los yacimientos minerales, de preferencia se comentan aquéllos que tienen relación con descripciones de la geología regional.

Principalmente, fueron consultados trabajos publicados en revistas arbitradas sobre geología; las tesis y los libretos-guía, por ser publicaciones informales de difícil acceso, sólo fueron considerados en caso de estar disponibles en la biblioteca de la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM (ERNO).

Las tesis profesionales constituyen una fuente importante de información original, generalmente inédita, aunque son de acceso limitado. Sobre la geología de Sonora, se han escrito probablemente más de 200 tesis de licenciatura, maestría y doctorado, en diferentes escuelas del país y del extranjero. De los años cincuenta a los setenta, existen tesis del Instituto Politécnico Nacional y de la Universidad Nacional Autónoma de México; a partir de los años setenta, se inicia la preparación de tesis de la Universidad de Sonora. Las tesis de maestría de la Universidad de Sonora no fueron utilizadas en este ensayo. Del Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES), sólo se encontró un número reducido de ellas a partir de los noventa, sobre geología económica y sobre aspectos biológicos. En este trabajo sólo se hará mención de algunas tesis que, a criterio del autor, han tenido que ver con avances importantes en el conocimiento de la geología de Sonora en la fecha en que aparecieron.

De ninguna manera debe considerarse este ensayo como un análisis exhaustivo sobre la bibliografía geológica del estado de Sonora; esto es más evidente en el caso de las tesis, ya que esta tarea sería demasiado extensa y difícil. En virtud de que durante el período entre 1960 y 2005 es cuando se observa el mayor desarrollo del conocimiento de la geología de Sonora y del cual se cuenta con una mayor cantidad de información publicada, se hará un mayor énfasis en este tiempo.

ANÁLISIS HISTÓRICO

Con el fin de poder realizar el análisis de la evolución histórica del conocimiento de la geología de Sonora, se

propone para este trabajo tres divisiones en el tiempo, a saber: **(1) Etapa antigua, que comprende de mediados del siglo xvii hasta 1910.** Durante este período exploradores y misioneros jesuitas reportan las primeras observaciones sobre localidades fosilíferas y datos sobre los recursos naturales de Sonora. En 1887 tiene lugar el sismo de Bavispe que afectó una gran región del noroeste de México. A principios de 1900 los estudios geológicos fueron escasos, mientras que se describen en la literatura las primeras minas de carbón, cobre y oro; **(2) Período post-revolucionario, de 1910 a 1960.** Se realizan las primeras investigaciones por parte del Instituto Geológico de México y se llevan a cabo algunos de los estudios clásicos sobre la estratigrafía de Sonora. Se llevan a cabo los primeros estudios científicos sobre el origen del Golfo de California en los años cincuenta; y **(3) Época actual de 1960 hasta 2008.** Es en este período cuando tiene lugar el desarrollo más importante del conocimiento de la geología en Sonora, consolidándose el estudio de las rocas ígneas por métodos isotópicos y químicos. Los estudios sobre el Golfo de California incluyen conceptos de tectónica de placas. Estos conceptos modifican la visión de los diferentes fenómenos geológicos, en particular la actividad magmática y la formación del Golfo de California. El tomar la Revolución Mexicana como referencia histórica tiene su justificación en el hecho de que este movimiento social también tuvo repercusiones importantes en el desarrollo de la ciencia en nuestro país.

1. ETAPA ANTIGUA, QUE COMPRENDE DE MEDIADOS DEL SIGLO XVII HASTA 1910

En la primera parte de esta época, de mediados del siglo xvii a 1850, se llevaron a cabo las primeras observaciones sobre la geología de Sonora de las que se tiene noticia escrita, y que fueron hechas por naturalistas y gambusinos. Es bien conocido que la motivación principal de los españoles para realizar la colonización del norte de México fue la promesa de grandes riquezas minerales. Por lo anterior, es de suponerse que las primeras descripciones sobre temas geológicos fueran hechas por los gambusinos españoles.

Otros reportes fueron escritos en el siglo xvii por misioneros jesuitas, quienes dejaron escritas importan-

tes observaciones sobre su entorno natural, incluyendo aspectos relacionados con la geología. El más conocido fue el Padre Eusebio Kino (1645–1711), quien en 1698 visitó la región de El Pinacate, reconociendo su origen volcánico (Figura 1). Su viaje fue reportado por uno de sus contemporáneos:

“Kino escaló sus cerros volcánicos para ojear desde allí las costas del golfo que se dibujaban en la lejanía hacia el oeste de la actual bahía de Adair” (Polzer y otros, 1981).

El Padre Kino describió de esta manera el primer campo volcánico identificado en el noroeste de México; durante este largo viaje a caballo, también pudo demostrar que Baja California no era una isla, lo cual fue confirmado en el terreno por Juan Francisco de Anza durante su expedición de Tubac a San Francisco, en 1774. El Padre Kino se destacó, además de por su trabajo como colonizador, por su labor científica, proporcionando datos topográficos que mejoraron los mapas de su época. Uno de los mapas más destacados es el que muestra por vez primera a Baja California como península y no como isla, como se mostraba en los mapas existentes.

Otro misionero jesuita, el Padre Pfefferkorn, escribió dos libros sobre Sonora, después de que los jesuitas fueron expulsados de México. Las obras originales fueron escritas en alemán (Pfefferkorn, 1795), las que años después fueron traducidas al inglés, y sólo recientemente (1983) fueron publicadas en español. El padre Pfefferkorn, en su primer libro, dedica un capítulo al Reino Mineral, describiendo de una manera amplia y detallada la presencia de materiales de construcción útiles en áreas aledañas a las misiones. Además, describió algunos rasgos geomorfológicos y proporcionó una descripción detallada de las salinas que existían en esa época en las costas de Sonora. En otras de sus interesantes observaciones, ofreció la primera descripción de la presencia de fósiles en Sonora en las cercanías de Arivechi; al respecto dice:

“Hay un cerro pedregoso relativamente alto, en este cerro se encuentran a cada paso figuras de color rojizo, gris o blanquizcas, aparentemente petrificaciones que parecen pájaros u otros animales o diversos objetos y son tan reales como si hubieran sido pintadas por la mano de un genio” (Pfefferkorn, 1795).



Figura 1. Estatua del Padre Eusebio Kino, colonizador y geógrafo del noroeste de México. Fotografía tomada en la Plaza Zaragoza, en Hermosillo, Sonora.

Actualmente, se sabe que esta descripción corresponde a una localidad fosilífera en Arivechi (Cerro de las Conchas) conocida a nivel mundial, que contiene fósiles tipo del Cretácico Temprano.

A partir de la segunda parte de la etapa antigua, se tienen los primeros reportes científicos sobre la geología de Sonora. Los primeros investigadores de las Ciencias de la Tierra que dejaron un registro escrito fueron paleontólogos norteamericanos de la Academia de Ciencias de California y del Servicio Geológico de California. Entre ellos, se mencionará a Remond (1866), quien visitó algunas localidades fosilíferas, entre ellas las regiones de La Barranca, San Marcial y Arivechi, donde colectó plantas e invertebrados del Triásico y del Cretácico. También, fue el primero en

reconocer la presencia de calizas paleozoicas al oriente de Hermosillo.

Otro naturalista pionero en Sonora fue Gabb (1869), quien realizó lo que serían los primeros estudios paleontológicos en Sonora, estudiando e identificando como especies del Cretácico los fósiles colectados por Remond. Por primera vez se describieron fósiles triásicos, así como fauna cretácica de la localidad de Arivechi. Otro paleontólogo que estudió fósiles triásicos en Sonora fue Newberry (1876), quien fue de los primeros investigadores en estudiar los depósitos de grafito.

Hasta finales del siglo xvii, el estudio de la geología de Sonora fue hecho por extranjeros interesados en la paleontología y los recursos minerales. El primer mexicano que realizó investigación geológica en So-

nora fue el distinguido geólogo Don José Guadalupe Aguilera-Serrano, del entonces Ministerio de Fomento de la República Mexicana, en 1887. Su estudio sobre el sismo del 3 de mayo de 1887 de Bavispe, en el noreste de Sonora y que ocasionó la destrucción del poblado, fue el primer trabajo científico acerca de un sismo en México (Rubinovich-Kogan *et al.*, 1991). Aguilera-Serrano (1888) estudió los efectos de este sismo y proporcionó una descripción detallada de la traza de la falla. Asimismo, publicó el primer mapa geológico de Sonora a colores, a escala 1:1'000,000, mostrando seis unidades cartográficas (Suter, 2006).

Este sismo ha sido el más importante (M 7.2) en Sonora en tiempos históricos y afectó una gran parte del noreste de Sonora y del suroeste de los Estados Unidos. Debido a que el área afectada por este sismo fue muy grande, dicho fenómeno recibió gran atención por parte de los científicos extranjeros de la época.

Aguilera-Serrano efectuó, además, varias travesías en la región noreste del Estado, que incluyeron los valles de Moctezuma, Huásabas, Bavispe, San Bernardino y Agua Prieta. Su regreso lo realizó por Nacozari, San Javier y Cumuripa. Con sus observaciones durante estos recorridos, pudo hacer algunas descripciones sobre la morfología de estas regiones. Asimismo, describió algunas minas de carbón en la sierra de San Javier y visitó además las localidades fosilíferas descritas por Remond (1866).

En 1888, se formó la Comisión Geológica de la República Mexicana y, con motivo de la Exposición Internacional de París en 1889, fue preparado un bosquejo de la Carta Geológica General de la República Mexicana, para presentarla en dicha exposición, donde seguramente Aguilera-Serrano incluyó sus observaciones sobre la geología de Sonora. Algunas de las primeras observaciones sobre los rasgos geomorfológicos del desierto de Sonora y sobre las terrazas marinas de las costas al norte de Bahía de Kino, fueron hechas por McGee (1886). Por su parte, Dumble (1900a) realizó un reconocimiento geológico en las zonas central y meridional del Estado, identificando nuevas localidades de rocas paleozoicas, definiendo mejor las rocas triásicas como una unidad estratigráfica y asignándole el nombre de división Barranca; asimismo, realizó estudios sobre el carbón y coque en dichas localidades.

Adicionalmente, este autor describió las rocas cretácicas de la región (Dumble, 1900b).

En relación con la minería, en este período fueron publicados algunos reportes sobre la presencia de antimonio en Sonora (Douglas, 1881) y la existencia de yacimientos de oro en Mulatos y Altar (Janin, 1890).

2. PERÍODO POST-REVOLUCIONARIO, DE 1910 A 1960

Algunos de los estudios estratigráficos clásicos para la geología de Sonora fueron realizados en este período, en el que se efectuó la publicación de las primeras fechas isotópicas de rocas cristalinas precámbricas y fueron iniciados los estudios científicos sobre el golfo de California. Se aprecia la consolidación de los estudios geológicos con una metodología científica moderna. Además, fueron publicados trabajos sobre rocas paleozoicas, donde Angermann (1904) describe algunos fósiles que encontró en el área del río Cedros, en el sur de Sonora. Dumble (1900a) dividió el Terciario en las Formaciones Báucarit, Nogales y Trincheras, presentando, además, una reseña del Cretácico y del Triásico; a este último lo separó en la división Barranca y Lista Blanca, y finalmente presentó algunas observaciones sobre las rocas paleozoicas del río Cedros. Aunque la región volcánica de El Pinacate se conocía desde el siglo xvii, uno de los primeros estudios publicados sobre este campo volcánico fue hecho por Bonillas (1910), donde describe petrográfica- y químicamente una labradorita; actualmente se sabe que existen cristales de esta especie de gran calidad en los basaltos de El Pinacate (Figura 2). Durante este período se observa un marcado interés por la minería de Sonora, lo cual se ve reflejado en un mayor número de publicaciones sobre geología económica y se lleva a cabo una gran actividad minera. Por primera ocasión se publican estudios clásicos sobre las minas más importantes, como Cananea (Emmons, 1906) y Los Pilares (Emmons, 1910), y sobre el grafito en La Colorada (Hess, 1909).

Con excepción de las publicaciones sobre las minas de Sonora, las hechas sobre geología fueron escasas, lo que probablemente se debió a la inestabilidad social producida por el estallido de la Revolución Mexicana, que había sido precedida por la huelga de Cananea en 1906.

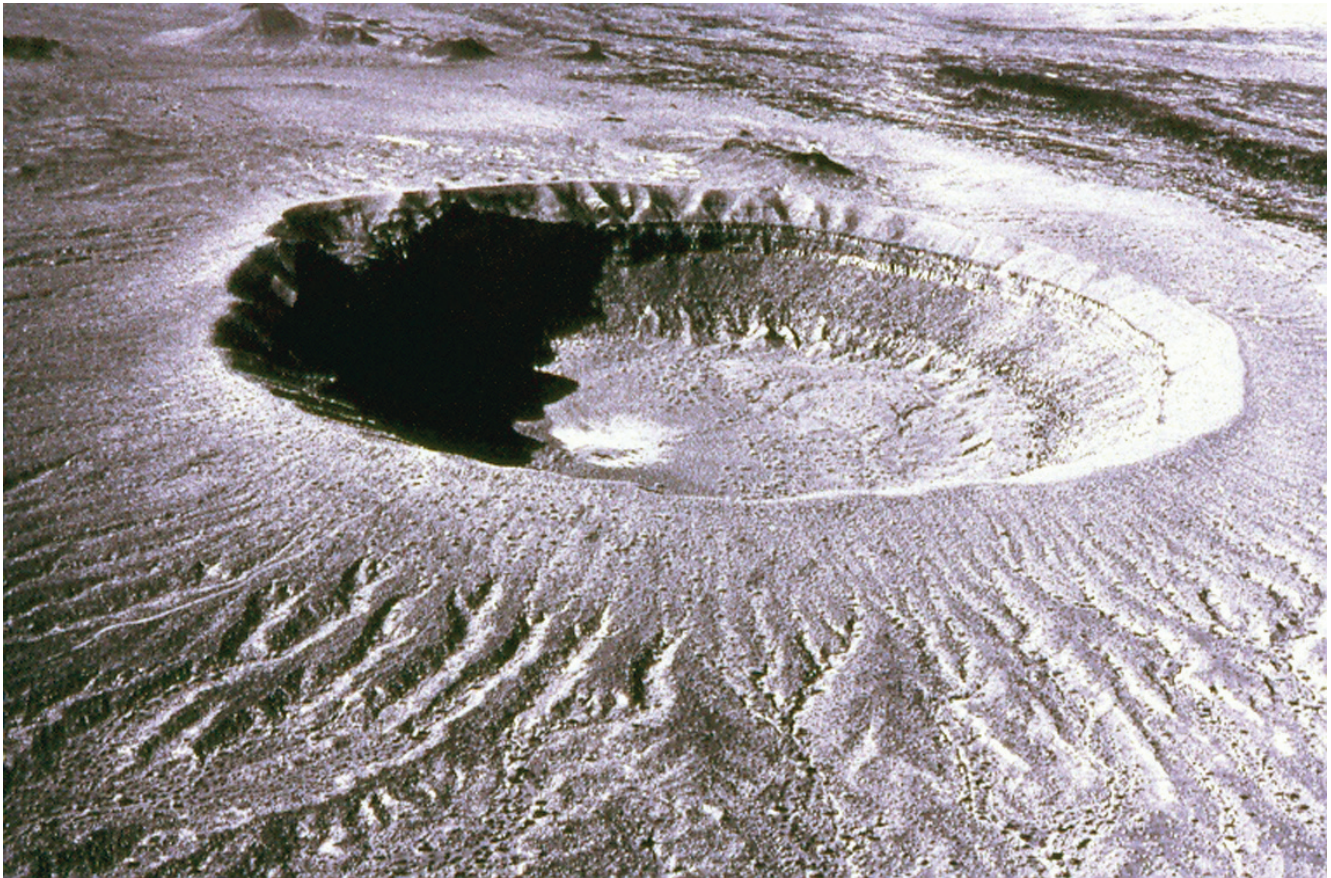


Figura 2. Cráter El Elegante, en la región volcánica de El Pinacate. Al fondo están presentes conos basálticos y derrames de lava. Fotografía por cortesía del Sr. Guillermo Moreno.

Beal (1922) estudió las regiones de Hermosillo y Guaymas, donde se tenían noticias de manifestaciones de petróleo, reportando que la Compañía Petrolera de Sonora, S. A., tuvo concesiones para explotar petróleo en esta región.

Entre los años de 1922 a 1927, Don Teodoro Flores, del Instituto Geológico de México, llevó a cabo una serie de expediciones geológicas en la región central de Sonora (Flores, 1929), habiendo trabajado en el año de 1922 en la porción central del Estado, en el valle del río Sonora, en la región de Álamos y de Hermosillo. El mismo autor, en 1925, estudió la zona de Minas Prietas, La Colorada y las minas de grafito de Moradillas. En 1926, estudió las zonas mineralizadas vecinas a la vía del Ferrocarril Sud Pacífico, entre las estaciones de Carbó y Santa Ana. En 1927, describió las regiones mineralizadas del ex Distrito de Magdalena cerca del tramo de vía férrea entre las estaciones de Santa Ana y Nogales. El trabajo de Flores (1929) sentó las bases

para establecer la estratigrafía, haciendo importantes observaciones sobre yacimientos minerales aplicando los conceptos más avanzados de esa época, y presentando también algunas descripciones sobre los rasgos fisiográficos de Sonora.

Un estudio sobre la hidrología subterránea de las cuencas de los ríos Concepción y Sonoyta fue publicado por Blázquez-López (1926), el que constituye uno de los pocos trabajos publicados sobre este tema tan importante en una región desértica como Sonora.

Uno de los primeros estudios sobre rocas volcánicas en el distrito minero de Cananea fue hecho por Valentine (1936), quien, con base en discordancias observadas en el campo, separó tres formaciones de rocas volcánicas, asignándoles tentativamente una edad mesozoica o terciaria temprana.

Uno de los trabajos clásicos y que aportan mayor información sobre la geología de Sonora lo realizó el geólogo norteamericano Robert E. King, cuyo traba-

jo marca el inicio de los estudios geológicos con una metodología científica. Por primera vez, King (1939) describe de manera sistemática la estratigrafía y la tectónica de una amplia región en el oriente de Sonora y parte de Chihuahua. En su trabajo, King aporta una gran cantidad de información para toda la columna estratigráfica del Estado, descubre nuevas localidades con rocas del Paleozoico, y define la Formación Barranca, del Triásico Superior, y la Formación Báucarit, del Terciario. Entre muchas de sus observaciones importantes, King (1939) deduce mediante observaciones de campo la edad terciaria para algunos de los batolitos que anteriormente se consideraban de edad precámbrica. Esta atinada observación ha sido confirmada mediante determinaciones de edades isotópicas en dichas rocas. Él muestra por primera ocasión la estructura cenozoica de Cuencas y Sierras. El trabajo de King es muy completo, pues aunado a sus excelentes observaciones de campo, contiene un sinnúmero de determinaciones paleontológicas. Su artículo viene acompañado de un mapa geológico con secciones estructurales (King, 1939). En muchos aspectos este trabajo mantiene su vigencia. De acuerdo con información expresada por el propio King en una conferencia que impartió en Hermosillo en 1978, su gran proyecto cartográfico en Sonora y Chihuahua de 1931 a 1933 fue realizado en condiciones precarias, ya que durante los dos primeros años no tenía empleo y sólo contaba con sus propios recursos y con apoyo de la gente local, haciendo travesías a caballo junto con arrieros locales, por temor a los apaches que aún existían, y ya para el último año recibió apoyo de empresas petroleras de Texas.

Dentro del mismo tenor estratigráfico, en esas mismas fechas, Imlay (1939) publicó un estudio sobre la paleogeografía del Cretácico del norte de Sonora y el sur de Arizona. Durante este mismo período, se tienen hallazgos paleontológicos importantes: por primera vez se reportaron estructuras estromatolíticas de edad precámbrica en la región de Caborca y se descubrieron trilobites del Cámbrico también en la región de Caborca (Cooper y Arellano, 1946). Estos descubrimientos propiciaron la realización de importantes estudios sobre las rocas más antiguas de la región de Caborca, la que constituye la localidad más meridional con rocas cámbricas y precámbricas del cratón de América del Norte.

Algunos de estos trabajos fueron publicados en el XX Congreso Geológico Internacional como excursiones y puede considerarse que son estudios clásicos para las rocas del Paleozoico. El primer crucero en el golfo de California lo llevó a cabo la Institución Scripps, de San Diego en 1940 dedicado especialmente a la realización de estudios batimétricos del Golfo (Shepard, 1950). Algunas de las islas del Golfo fueron descritas por Gastil *et al.* (1983).

Jahns (1959) describe la región volcánica de El Pinacate, en el noroeste de Sonora, la cual está formada por derrames de basalto e incluye una gran cantidad de formas bien preservadas, entre las que destacan 10 cráteres de explosión freatomagmática (*maars*), derrames recientes y volcanes monogenéticos.

En la Tabla 1 se presenta un listado de los principales eventos que afectaron el desarrollo de la geología en Sonora, aun cuando es obvio que muchos otros tuvieron también relevancia.

Por su parte, Velasco (1956), con motivo de una excursión dentro del XX Congreso Geológico Internacional, describió la geología del mineral de Cananea, dando una descripción detallada de los yacimientos cupríferos. También en los años 50 se publicó una serie de trabajos realizados por los geólogos del Servicio Geológico de los Estados Unidos en colaboración con los del Comité Directivo para la Investigación de los Recursos Minerales de México sobre yacimientos de tungsteno, carbón y antimonio (Wiese y Cárdenas, 1946; Wilson y Rocha, 1949).

3. ÉPOCA ACTUAL, DE 1960 A 2008

Como se indicó, en este período las investigaciones hechas por geólogos mexicanos en Sonora son más numerosas; sin embargo, vale la pena decir que durante este lapso, los investigadores extranjeros continúan aportando importantes datos para el conocimiento de la geología del Estado. Este período es el que muestra una mayor productividad en número de artículos y en él se consolidan las investigaciones sobre la geología de Sonora.

Para 1960, el Consejo de Recursos Minerales continúa publicando estudios sobre yacimientos minerales de Sonora, entre otros, sobre el carbón en San Marcial

Tabla 1. Principales obras publicadas y eventos relevantes sobre la geología de Sonora.

1	En 1950, se realiza el primer crucero en el Golfo de California por la Institución Scripps.
2	En 1956, se publican los libros de excursiones del XX Congreso Geológico Internacional en México a localidades en Sonora.
3	El Consejo de Recursos Minerales en colaboración con las Naciones Unidas realiza, en 1964, un programa de exploración de pórfidos cupríferos, iniciándose así la exploración de este tipo de depósitos.
4	En la Universidad de Sonora (UNISON) se crea, en 1975, la carrera de Ingeniería de Minas y posteriormente la de Geología.
5	La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en 1975 funda en Hermosillo, Sonora, la Estación Regional del Noroeste, dependiente del Instituto de Geología.
6	El Primer Simposio sobre la Geología de Sonora se organiza, en 1978, por la Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM y el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Hasta la fecha han sido efectuadas cuatro reuniones de este tipo entre 1978 y 2000.
7	En 1978, se inicia una campaña de exploración por uranio en Sonora por el Instituto Nacional de Energía Nuclear, continuada posteriormente por Uranio Mexicano.
8	En 1981, se organiza la Reunión Anual de la Sección Cordillerana de la Sociedad Geológica de América, por parte de la UNAM y la UNISON, con apoyo del Gobierno del Estado.
9	En 1983, se crea el Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES).
10	En 1984, se organiza en Hermosillo el simposio Geotectónica y Variaciones del Nivel del Mar en el área del Golfo de California por parte del Instituto de Geología de la UNAM y la Asociación Internacional de Estudios del Cuaternario (INQUA).
11	En 1996, el entonces Consejo de Recursos Minerales publica la primera carta geológica 1:50,000 de Sonora, organismo que en 1997 inicia la publicación de cartas 1:250,000 y en el año 2004 publica la carta geológica del estado de Sonora a dicha escala.
12	El alza de los precios de los metales preciosos fomenta el trabajo geológico. Los últimos períodos de alza fueron uno en los años setenta y principio de los ochenta, otro a principios de los noventa y el actual desde el año 2003.

(Pesquera, 1960) y sobre los minerales de manganeso (Ayub, 1960).

Durante este período, se definen cinco nuevas especies minerales de oro (teluritos y teluratos de oro), en las regiones de Moctezuma y Cananea (Mandarino y Williams, 1961; Mandarino *et al.*, 1975). Los depósitos de antracita de la sierra de San Javier fueron descritos por Ávila-de Santiago (1960).

El estudio de las rocas paleozoicas continuó siendo un tema de investigación importante, debido a su buena exposición en Sonora. Mulchay y Velasco (1954) describieron una correlación estratigráfica entre la secuencia paleozoica de Cananea y las de Bisbee, Arizona, y Naco, en el norte de Sonora. Aponte-Barre-

ra (1974), en su tesis profesional, lleva a cabo una de las primeras descripciones de las rocas paleozoicas del noreste de Sonora.

Una descripción muy completa de la región volcánica de El Pinacate fue publicada por Ives (1964), quien presenta una descripción geográfica, un análisis de las principales características y una bibliografía actualizada de esta región del noroeste de Sonora.

Dos trabajos clásicos de las rocas del Triásico de la región de La Barranca en el centro de Sonora fueron preparados por Alencaster-de Cserna (1961) y Silva-Pineda (1961). Alencaster-de Cserna estudió con mayor detalle la Formación Barranca, elevándola al rango de Grupo Barranca; por su parte, Silva-Pineda describió

en detalle la flora fósil de la Formación Santa Clara, que actualmente forma parte del Grupo Barranca.

Una integración de la información existente sobre rocas paleozoicas hasta esa fecha fue preparada por Fries (1962). Este trabajo también sintetiza lo que se conocía sobre el zócalo precámbrico y la estructura de dichas rocas, y está ilustrado por un plano geológico y otro estructural.

En lo referente a yacimientos minerales, Wisser (1966) publicó un trabajo clásico sobre vetas hidrotermales en Sonora y Chihuahua, donde también hace mención a la estratigrafía y estructura de las rocas volcánicas terciarias de la Sierra Madre Occidental, a la que considera como una cordillera esculpida por erosión a partir de una gruesa secuencia volcánica. En su estudio, Wisser (1966) describe la porción de la Sierra Madre Occidental comprendida desde la frontera con los Estados Unidos hasta la latitud de Mazatlán, Sinaloa, incluyendo partes de Sonora y Chihuahua, considerándola como una unidad estructural y metalogénica. Entre los yacimientos sonorenses analizados en este trabajo están El Gachi, Oposura, Lampazos, La Colorada, San Javier, La Dura y Álamos. Una de las conclusiones importantes de este trabajo es que existe una zonación mineral relacionada con la posición de las vetas respecto al basamento preterciario. Pedrazzini de Schlaepfer (1961) llevó a cabo un estudio sobre las pegmatitas de la sierra de Aconchi.

En esta época hubo un gran auge en la exploración de yacimientos de cobre diseminado en Sonora, debido a la gran similitud de ambientes geológicos entre Sonora y el sur de los Estados Unidos.

En lo referente a geoquímica isotópica, Fries (1962) y Damon *et al.* (1962) realizan algunas de las primeras determinaciones de edad por los métodos K-Ar y Rb-Sr en rocas cristalinas precámbricas de la región de Bátori y El Arpa en el noroeste de Sonora. La información de estos estudios permitió extender el zócalo precámbrico de Arizona hacia Sonora.

En 1971, se llevó a cabo en Hermosillo la Convención Nacional de la Asociación de Ingenieros de Minas, Geólogos y Metalurgistas de México, este evento motivó la publicación de varios artículos sobre geología y yacimientos minerales de Sonora. Entre muchos otros se pueden mencionar el de Echávarri-Pérez (1971),

quien describió la petrografía y alteración del depósito de La Caridad entonces recientemente descubierto.

A principios de los años 70, el INEGI publica sus primeros mapas geológicos de Sonora, a escala 1:50,000 y posteriormente 1:100,000, 1:250,000 y 1:1'000,000, lo que sin duda constituyó un paso muy importante en el desarrollo de los estudios geológicos posteriores, ya que dichos mapas proporcionaron la primera aproximación del marco geológico de nuevas áreas. Una de las primeras cartas geológicas del estado de Sonora, a escala 1:500,000, fue publicada por López-Ramos (1974) en el Instituto de Geología de la UNAM. De igual manera, en su libro "Geología de México", López-Ramos (1980) incluyó una sección sobre la Provincia de Sonora en la que presenta una descripción muy completa de la geología conocida hasta esa época, ilustrándola con secciones estructurales y varias compilaciones originales sobre diversas regiones de Sonora.

Durante este tiempo aparecen artículos donde se trata de explicar el origen del golfo de California a la luz de las nuevas teorías de tectónica de placas (Hamilton, 1961; Larson *et al.*, 1968).

En esta época también se describen nuevas secciones estratigráficas para rocas de edad jurásica con fósiles en la región de la sierra de Santa Rosa, y nuevos géneros de amonites del Jurásico Tardío en la región de Cucurpe (Rangin, 1977a). A partir de esta fecha, los estudios sobre las rocas mesozoicas reciben una mayor atención por investigadores como Rangin (1977b), quien describió varias fases tectónicas en rocas mesozoicas de la región de Agua Prieta-Naco, en el noreste de Sonora. Una de sus principales aportaciones fue la definición del concepto de tectónicas sobrepuestas en las rocas mesozoicas. Un modelo especulativo sobre la geodinámica entre las rocas mesozoicas de Baja California y Sonora, fue publicado por Rangin (1978), en el cual van implícitos algunos conceptos sobre la subducción mesozoica del occidente de México.

La edad precámbrica del granito de Cananea fue confirmada por el método U-Pb (Anderson y Silver, 1977). La primera referencia publicada sobre estructuras del tipo *core complex* en el centro-norte de Sonora fue hecha por Anderson *et al.* (1980), quienes describen la presencia de deformación y metamorfismo en rocas batolíticas de edad terciaria.

Se inicia el estudio de las rocas ígneas de manera sistemática: Anderson y Silver (1978) publican por primera vez algunas edades de rocas intrusivas del arco jurásico. Un primer intento para establecer la estratigrafía de las rocas volcánicas en Sonora fue preparado por Roldán-Quintana y Solano-Rico (1978), quienes compilaron la información existente y presentaron la información en un mapa geológico.

En 1978, se realizó en Hermosillo el evento Primer Simposio sobre Geología y Potencial Minero en el Estado de Sonora, organizado por el Instituto de Geología y el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora. Derivado de este simposio, se publicó un libretto-guía con dos excursiones, una al campo volcánico de El Pinacate y la segunda que consistió en un transecto entre Caborca y Agua Prieta. En ese mismo año, se inicia la publicación del Boletín del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, donde se han difundido importantes trabajos sobre la geología del Estado. El origen de la hipótesis de la megacizalladura Mojave Sonora se inicia con la publicación de Silver y Anderson (1974) quienes plantean por primera vez un modelo basado en las ideas de tectónica de placas para explicar la evolución de Mesoamérica y el Golfo de México. La hipótesis de la existencia de la megacizalladura Mojave-Sonora fue retomada por Anderson y Silver (1979) en la región del noroeste de Sonora. Esta gran falla fue interpretada con base en una interrupción abrupta de las rocas precámbricas y paleozoicas y, de acuerdo con los mismos autores, esta megacizalladura representa una zona con desplazamiento lateral izquierdo de rumbo NW-SE, poniendo en contacto dos bloques diferentes, estimando un desplazamiento de 800 km (Anderson y Silver, 1979). A pesar de que este modelo no ha sido totalmente aceptado, sin duda alguna atrajo hacia Sonora en años posteriores a muchos investigadores en diferentes disciplinas, quienes por diferentes métodos han tratado de probar o rechazar la existencia de dicha falla. De cualquier forma, la geología de Sonora se benefició de manera importante por los numerosos estudios geológicos llevados a cabo.

Un estudio estratigráfico de gran trascendencia fue publicado por Peiffer-Rangin (1979) donde, por primera vez, se consideró que los dos grandes orógenos, el Cordillerano en el oeste de los Apalaches-Oua-

chita en el oriente de América del Norte, se unían para formar uno solo alrededor del cratón de América del Norte; esta idea ha sido apoyada por otros investigadores como Stewart (1988) quien ha estudiado las rocas paleozoicas de Sonora.

Las investigaciones sobre yacimientos minerales hechas por el entonces Consejo de Recursos Naturales no Renovables sobre depósitos de cobre porfídico en la región noreste de Sonora continuaron (Ramírez-Ruvalcaba *et al.*, 1973). Algunas áreas con condiciones de litología y alteración propicias para contener un pórfido cuprífero fueron exploradas y perforadas, encontrándose finalmente La Caridad como un yacimiento explotable.

Por su parte, el entonces Departamento de Geología y Minas de la Universidad de Sonora publicó el primer mapa metalogenético de Sonora (Echávarri-Pérez *et al.*, 1976) donde se muestra, además, algunos mapas paleogeográficos.

A fines de la década de los años 70, el interés por el estudio de las rocas precámbricas de la región de Caborca se ve renovado, cuando Weber *et al.* (1979) y Cevallos-Ferriz y Weber (1980) inician una serie de estudios sobre la arquitectura de los estromatolitos, con lo que definen nuevas formas (Figura 3).

Los estudios sobre las rocas triásicas continúan. En la sierra de El Álamo, al sureste de El Antimonio, en el noroeste de Sonora, González-León (1980) describe una sección de rocas que comprende desde el Triásico Superior hasta el Jurásico Inferior, reportando la presencia de nuevos fósiles que correlacionó con fauna similar del suroeste de los Estados Unidos. Por su parte, Weber *et al.* (1980) publicaron el avance de sus estudios paleobotánicos sobre la Formación Santa Clara, restringiendo su edad al Triásico.

A fines de los setenta, existió un renovado interés por el estudio de los depósitos pleistocénicos marinos en las costas del Golfo de California (Ortlieb y Malpica-Cruz, 1978). Una descripción de las terrazas marinas de las costas del golfo de California (Figura 4), incluyendo su altura, espesor y edad fue preparada por Ortlieb (1991).

A partir de 1980, en el Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, se presenta una serie de tesis de licenciatura con avances importantes de

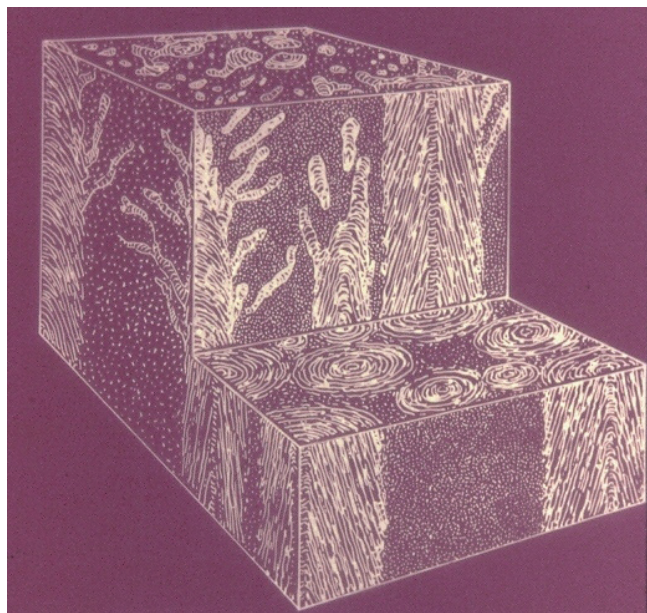


Figura 3. Estructuras estromatolíticas de edad precámbrica, en diferentes cortes, de la región de Caborca, Sonora. Tomada de Weber *et al.* (1979).

la geología tratando diversos temas: sobre cartografía de la región de Aconchi (Bojórquez-Ochoa y Rosas-Haro, 1989); también sobre cartografía con aporte de nuevos datos sobre la estratigrafía del Paleozoico de la región del río Yaqui (Navarro-Martínez y Soto-Contreras, 1987); sobre yacimientos minerales, tratando la geología y tectónica del distrito minero de Cananea (Navarro-Mayer y Ochoa-Landín, 1989); sobre la geología y geoquímica del distrito de Cerro de Oro, en el municipio de Rayón, Sonora (Castillo-Rivas, 1992); sobre aguas subterráneas, se realizó un estudio hidrogeoquímico del valle de Ures (Cirett-Galán, 1989); y sobre rocas volcánicas, se estudió los basaltos del valle de Moctezuma (Paz-Moreno, 1987).

En 1981, se celebró en Hermosillo la Reunión anual de la Sección Cordillerana de la Sociedad Geológica de América, lo que permitió que se publicaran un libro con los resúmenes de la reunión, así como un libretto-guía que contiene información sobre ocho excursiones sobre la geología de Sonora y Baja California.

El estudio de las rocas intrusivas del batolito laramidico de Sonora fue hecho por Damon *et al.* (1983); en este trabajo se publicaron 48 edades K-Ar de rocas plutónicas y algunos datos isotópicos de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Rb}$, para entender su génesis y poder comparar

los batolitos de Sinaloa y Sonora que están asociados con la mineralización de cobre, molibdeno y oro.

En 1984 se celebró en Hermosillo el simposio “Geotectónica y variaciones del nivel del mar en el área del Golfo de California”, organizado por la Unión Internacional para el estudio del Cuaternario (INQUA) y el Instituto de Geología de la UNAM. Como resultado de este evento, se publicó un volumen de Resúmenes con las ponencias presentadas, un libro con los trabajos en extenso y un libretto-guía para una excursión en las costas alrededor del golfo de California (Figura 4).

Una revisión de la estratigrafía de las rocas del Neoproterozoico y del Cámbrico de la región de Caborca, fue hecha por Stewart *et al.* (1984), quienes presentan una columna estratigráfica medida, donde sitúan los niveles con estromatolitos. Este trabajo les permitió correlacionar la secuencia de Caborca con la de la *Great Basin* en la región oriental de California y el sur de Nevada. En este trabajo, dichos autores describen, además, la estratigrafía de la sierra de Agua Verde situada a 100 km al este de la ciudad de Hermosillo, donde afloran rocas de plataforma del Paleozoico superior.

Un artículo de gran trascendencia en las interpretaciones de la tectónica de rocas paleozoicas fue publicado por Radelli *et al.* (1987), quienes mencionan por primera vez la aloctonía de las rocas paleozoicas de cuenca en el centro de Sonora. Continuaron los estudios sobre la estratigrafía de las rocas paleozoicas, y es así que González-León (1986) describió la secuencia paleozoica de la sierra de El Tule en el noreste de Sonora y correlacionó estas secuencias con rocas similares en el sur de Arizona. Vega-Granillo y Araux-Sánchez (1987) describieron las rocas paleozoicas del rancho Las Norias, al oriente de Hermosillo. Dentro de la misma línea de investigación, Bartolini *et al.* (1989) describieron la estratigrafía de las rocas de aguas profundas de la sierra del Aliso, donde identificaron un gran número de graptolitos (Figura 5). A partir del trabajo de Stewart *et al.* (1990), es evidente la importancia del estudio de los microfósiles (conodontes y graptolitos) en las rocas paleozoicas de Sonora y fusulinidos (Figura 6), aun cuando desafortunadamente existen muy pocos especialistas para identificar esta fauna.



Figura 4. El golfo de California, vista de la costa frente a San Carlos.

La segunda edición de la Carta Metalogenética de Sonora fue publicada por Pérez-Segura (1985), presentando la localización de yacimientos de una manera más precisa, en cartas geológicas a escala 1:250,000, dando una descripción más detallada de los depósitos minerales.

La región fosilífera de Arivechi fue nuevamente foco de atención, cuando Almazán-Vázquez y Palafox-Reyes (1985) estudian la estructura del Cretácico Inferior del cerro de Las Conchas y reportan el descubrimiento de rocas paleozoicas. En esa misma región, en Sahuaripa, la tectónica mesozoica fue estudiada por Pubellier *et al.* (1995) presentando evidencias de una fase de deformación del Cenomaniano-Turoniano. Jacques-Ayala y Potter (1987) describen la estratigrafía de las rocas cretácicas en el noreste de Sonora.

Hayama *et al.* (1984) reportaron cinco fechas isotópicas K-Ar de edad terciaria para rocas metamórficas de la región de Altar, con las que interpretaron que el metamorfismo ocurrió hace 60 Ma y la intrusión de un batolito de composición granodiorítica a esta secuencia, hace 15.5 Ma. En fechas más recientes, este metamorfismo se ha atribuido a efectos de la extensión durante el Terciario. Nourse (1990) publicó un mapa detallado del *metamorphic core complex* de la sierra de Magdalena (Complejo de Núcleo Metamórfico Magdalena).

Una red geodésica en la porción central del golfo de California fue establecida en 1982 por Kasser *et al.* (1984) y medida nuevamente en 1986, con el fin de estimar el desplazamiento de Baja California con respecto a Sonora. Como resultado de estas mediciones, se pudo determinar que la península se movió a una velocidad de 6 cm/año, con respecto al continente (Kasser *et al.*, 1987). Éste fue un proyecto internacional (Francia-México) donde participaron investigadores mexicanos en el estudio del golfo de California. Ortlieb (1986) describió la actividad geotectónica y las variaciones del nivel del mar en el golfo de California.

González-León y Jacques-Ayala (1990) prepararon una compilación de los trabajos sobre rocas del Cretácico Inferior de Sonora en la que describieron las columnas estratigráficas conocidas, haciendo su correlación y discutiendo su significado paleogeográfico, para finalmente proporcionar una visión regional de la sedimentación durante el Cretácico Temprano. Rodríguez-Castañeda (1990 y 1999) publicó datos sobre la estructura de las rocas cretácicas en el norte de Sonora, en la región de Banámichi-Tuape y San Antonio. En 1991, la Sociedad Geológica de América publicó el “Special Paper 254”, editado por Pérez-Segura y Jacques-Ayala (1991), sobre la geología de Sonora, donde aparecieron artículos actualizados sobre diversos temas de la geología del Estado. Entre otros, se publicó

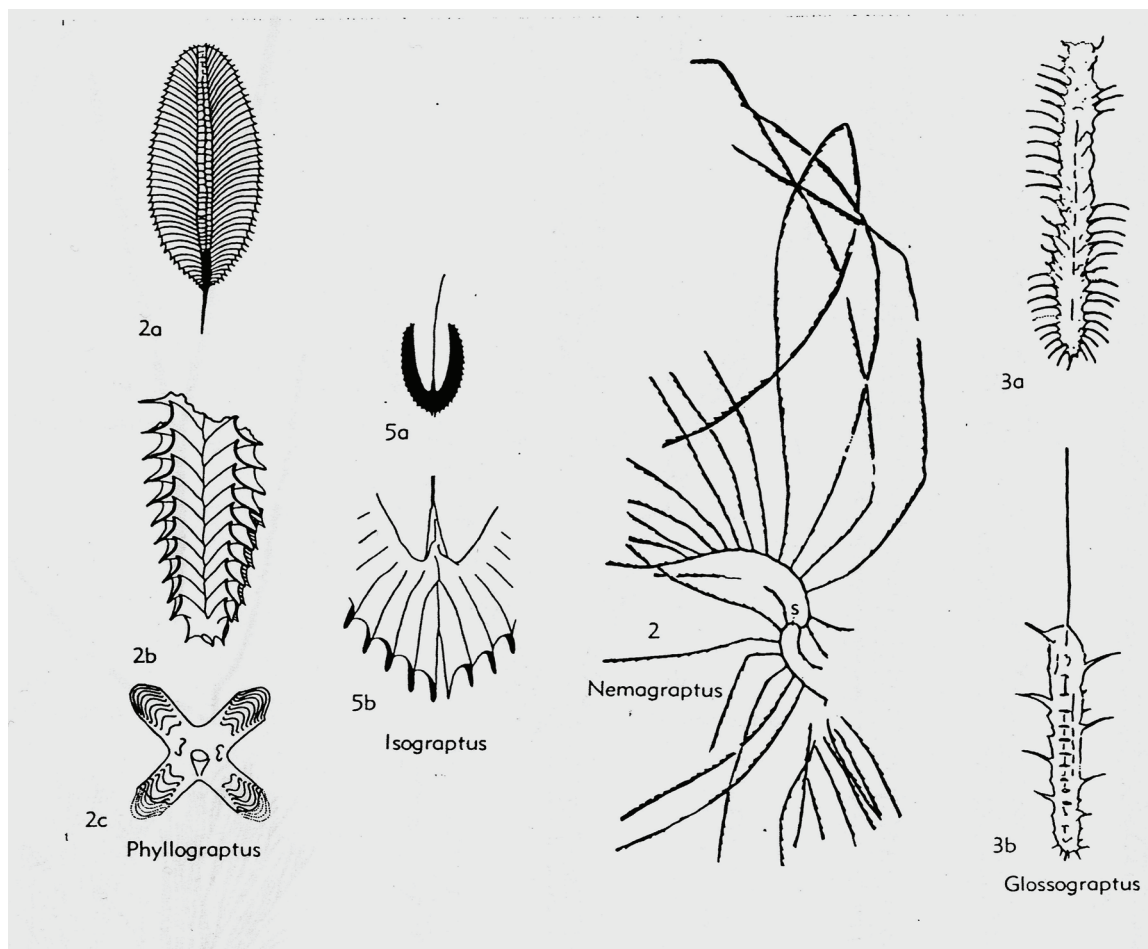


Figura 5. Géneros de graptolitos del Ordovícico Temprano y Medio de la Lutita El Mezquite, del área de Mazatán, en Sonora central. Ilustración tomada de Poole y Amaya-Martínez (2000).

un artículo sobre la estratigrafía del Grupo Barranca (Stewart y Roldán-Quintana, 1991); la paleontología de las rocas cretácicas del área de Lampazos (Scott y González-León, 1991); un trabajo sobre los batolitos de la porción central de Sonora (Roldán-Quintana, 1991); un estudio sobre las rocas volcánicas de la región de Yécora en la Sierra Madre Occidental (Cochémé y Demant, 1991); y otros trabajos de interés. García y Barragán (1998) publicó un artículo sobre las rocas mesozoicas de la región de Altar.

En ese mismo año, la AAPG publicó la Memoria 47, que constituye una excelente fuente de información de datos geológicos y geofísicos actualizados sobre el golfo de California, así como a escala regional artículos sobre procesos hidrotermales en la cuenca de Guaymas (Dauphin y Simoneit, 1991).

Los estudios sobre aguas subterráneas continuaron siendo escasos. Únicamente Castillo y Montes de Oca (1988) llevaron a cabo un trabajo sobre el contenido de bario en el agua subterránea de la franja costera de Guaymas; Vega-Granillo (1992) describió la hidrogeología de la cuenca del río Mátape en Sonora central, y Vega-Granillo y Macías-Reyes (1993) estudiaron los acuíferos de Sonora y propusieron medidas para su control.

En el campo de los yacimientos minerales, Pérez-Segura (1992) describió la paragénesis de oro-teluros del yacimiento de San Francisco, en Estación Llano, y Mead *et al.* (1988), mediante fechas isotópicas, situaron las mineralizaciones de tungsteno dentro de la evolución geológica de Sonora. Radelli (1985) describió los yacimientos de scheelita en Sonora central y reportó el

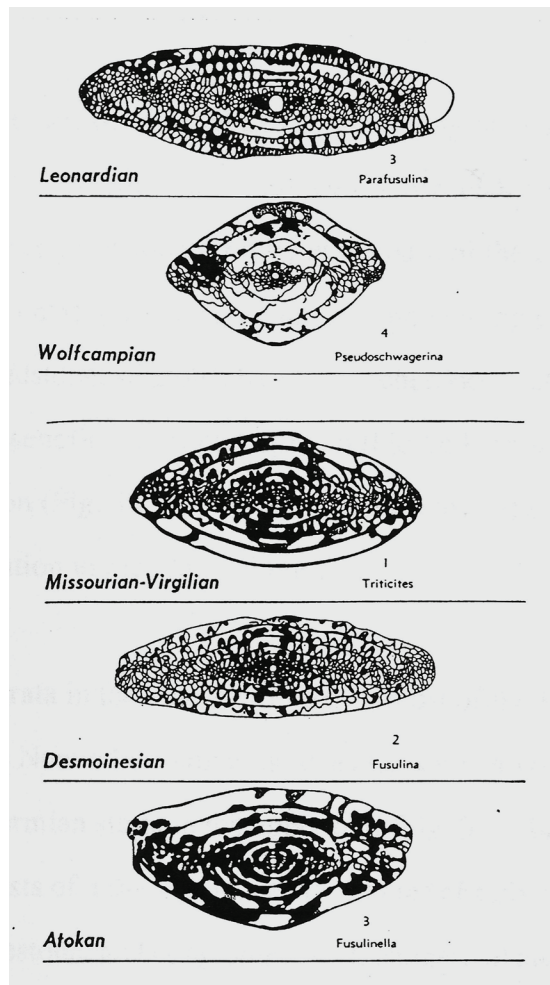


Figura 6. Géneros de fusulínidos del Pérmico Temprano en la Formación Rancho Nuevo, del área de Mazatán en Sonora central. Ilustración tomada de Poole y Amaya-Martínez (2000).

descubrimiento de la columbo-tantalita en pegmatitas del granito de dos micas de la sierra de Aconchi.

En 1992, La Sociedad Geológica de El Paso publicó el librito-guía “Geología y recursos minerales del norte de la Sierra Madre Occidental, México”, de Clark *et al.* (1992), que contiene abundante información sobre la geología y yacimientos minerales del norte de Sonora y el noroeste de Chihuahua. Contiene además la descripción de una excursión geológica entre El Paso, Texas-Chihuahua-Hermosillo-Cananea-Douglas, Arizona y El Paso, Texas.

También, en 1992, se publica la última edición de la Carta Geológica de la República escala 1:2'000,000 (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992). Por su parte, Fernán-

dez-Aguirre *et al.* (1993), del Gobierno del Estado en colaboración con el CESUES, publicaron una compilación de la geología del estado de Sonora a escala 1:500,000.

La tectónica de tipo *basin and range* en Sonora fue descrita por Stewart y Roldán-Quintana (1994) mediante un mapa y su texto explicativo, donde se muestran los efectos de esta deformación extensiva. En este mapa, en la porción central de Sonora, se identificaron tres franjas basculadas: la primera en la costa, donde las rocas terciarias están inclinadas hacia el este; la segunda, hacia el oriente, donde el basculamiento es hacia el oeste; y la tercera, en la Sierra Madre Occidental, en los límites con Chihuahua, donde el basculamiento es hacia el este. Estos grandes bloques están limitados por fallas mayores.

En los años 1999 y 2000, se continuaron los estudios sobre los batolitos laramídicos y las rocas volcánicas cogenéticas, obteniéndose nuevas fechas isotópicas U-Pb y datos isotópicos. Valencia-Moreno *et al.* (1999) mostraron las variaciones de los valores isotópicos de estroncio y neodimio en granitos de los batolitos laramídicos en una dirección N-S, encontrando los valores más evolucionados en el norte de Sonora sobre el cratón de América del Norte, mientras que valores más primitivos se encuentran en el norte de Sinaloa fuera del cratón. González-León, McIntosh *et al.* (2000) publicaron edades de entre 55 y 64 Ma para rocas intrusivas y de 58 a 72 Ma para rocas volcánicas en la región de Arizpe. Se continuaron los estudios paleontológicos sobre la Formación Antimonio en la sierra de El Álamo (González-León, Stanley y Taylor, 2000).

Durante el año 2000, se celebró la Cuarta Reunión sobre la Geología del Noroeste de México y se publicó un libro de resúmenes (Calmus y Pérez-Segura, 2000).

Para el año 2001, por primera vez, se obtienen fechas U-Pb para las rocas volcánicas de la Formación Tarahumara, las que constituyen la porción volcánica del arco laramídico de Sonora (McDowell *et al.*, 2001). Se reportan nuevos datos isotópicos del batolito granítico (Valencia-Moreno *et al.*, 2001).

La actividad sísmica de la Falla Pitaycachic y una descripción actualizada del sismo de mayo de 1887 fueron reportadas por Suter (2001).

El interés sobre el estudio del batolito de Sonora continúa con la publicación de un artículo sobre el mismo en la costa de la porción central de Sonora, donde se aportan nuevas edades isotópicas y datos geoquímicos (Valencia-Moreno *et al.*, 2003). En este mismo año, se publica un artículo sobre la deformación tipo *metamorphic core complex* en la sierra de Mazatán (Complejo de Núcleo Metamórfico Mazatán), en Sonora central (Vega-Granillo y Calmus, 2003). Con motivo de la celebración de la Reunión Anual de la Sección Cordillerana de la Sociedad Geológica de América en Puerto Vallarta, se prepararon dos libretos-guía para excursiones geológicas en Sonora: una a la Sierra Madre Occidental (Roldán-Quintana *et al.*, 2003) y la otra a la isla Tiburón (Oskin *et al.*, 2003).

El personal del Instituto de Geología de la UNAM instaló una red sismológica que consistió en nueve estaciones digitales con sismómetros y una de banda ancha en la región de Agua Prieta-Bavispe, en el noreste de Sonora, a partir de 2003, con el fin de monitorear la actividad sísmica de la falla de Pitaycachi y sus alrededores.

En el año 2004, continuó el interés sobre la estratigrafía de las rocas cretácicas, especialmente las del Grupo Bisbee en el norte de Sonora (Lawton *et al.*, 2004); se publica también un trabajo sobre la región costera del Golfo, donde se describe una estructura de grandes dimensiones (el graben de Empalme), la que se considera asociada a la apertura del golfo de California (Roldán-Quintana *et al.*, 2004).

En el año 2005, se renovó el interés sobre la hipótesis de la megacizalladura Sonora-Mojave (*Sonora-Mojave Megashear*), con la publicación de un libro que contiene numerosos artículos sobre las diversas alternativas de interpretación de dicha falla (Anderson *et al.*, 2005). Este libro, publicado por la Sociedad Geológica de América, contiene 25 artículos con evidencias a favor y en contra de la hipótesis de la megacizalladura. En 2006, se publicó un artículo sobre los gneises triásicos del sur de Sonora en la sierra de Sonobari (Keppie *et al.*, 2006); asimismo, en el mismo año, se publicó un resumen en extenso sobre trazas de fisión de los granitos de la sierra de Aconchi (Lugo-Zazueta *et al.*, 2006). Se continuó estudiando los batolitos y su relación con mineralización diseminada de

cobre y molibdeno en Sonora (Valencia-Moreno *et al.*, 2006).

Las investigaciones sobre rocas y fósiles mesozoicos llevadas a cabo por personal del Instituto de Geología de la UNAM continuaron en 2007 (González-León *et al.*, 2007; Löser y Minor, 2007).

Se llevó a cabo un estudio sobre el batolito costero de la región al norte de Kino (Ramos-Velázquez *et al.*, 2008). En abril de 2008, se llevó a cabo el Primer Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del Noroeste de México, en Hermosillo.

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LOS ESTUDIOS PUBLICADOS

Después de hacer una revisión de las publicaciones sobre la geología de Sonora, desde mediados del siglo XVII hasta el año 2008, se pueden hacer las siguientes reflexiones. En particular, se considera que el número de trabajos analizados es representativo de la producción global de artículos publicados pues, para la época de mayor productividad científica (1960-2005), se realizó una búsqueda más completa.

En la Tabla 2, se presenta un listado de las obras publicadas que, a juicio del autor, tuvieron algún efecto en la historia de la geología de Sonora.

En cuanto a temas de investigación, de 156 trabajos publicados, el mayor número corresponde a geología económica, lo que tiene sentido, ya que es bien conocida la tradición minera de Sonora hasta la fecha. En orden de importancia, las disciplinas sobre las que se han publicado más artículos corresponden a estratigrafía, paleontología, tectónica, geología marina y geología del Cuaternario, rocas ígneas y geohidrología, esta última a pesar de que Sonora es un estado caracterizado por su aridez. Las disciplinas sobre las que menos trabajos se han publicado son geofísica, geomorfología e investigaciones sobre rocas metamórficas.

Los resultados de las investigaciones sobre la geología de Sonora se han publicado en tres idiomas, principalmente, en el siguiente orden de importancia, español, inglés y francés.

En cada una de las épocas descritas, se tuvo avances importantes en el conocimiento de la geología del estado de Sonora. Así, en la época antigua, de

Tabla 2. Publicaciones selectas más influyentes en el desarrollo de la geología de Sonora durante el periodo 1929–2005.*

1	Flores (1929) y King (1939) establecen las bases para la estratigrafía de Sonora.
2	Cooper y Arellano (1946) descubren rocas cámbricas en la región de Caborca, lo que lleva posteriormente al descubrimiento del Precámbrico.
3	Alencaster-de Cserna (1961) define la estratigrafía de las rocas triásicas del Grupo Barranca. Silva-Pineda (1961) realiza las primeras descripciones de la flora fósil de la Formación Santa Clara. Weber <i>et al.</i> (1980) continúan los estudios paleobotánicos de la flora triásica de la Formación Santa Clara.
4	Damon <i>et al.</i> (1962) obtienen las primeras edades isotópicas de las rocas precámbricas de la región de Caborca-Altar.
5	Rangin (1978) realiza estudios pioneros sobre la estratigrafía y la estructura de rocas mesozoicas del norte de Sonora.
6	Silver y Anderson (1974) presentan la hipótesis de la mega cizalladura. Anderson <i>et al.</i> (1980) publican el primer reporte de un complejo de núcleo metamórfico (<i>metamorphic core complex</i>) en Sonora. Ambos autores realizan contribuciones importantes en el fechamiento de rocas ígneas (Anderson y Silver, 1977, 1978; Anderson <i>et al.</i> , 1980).
7	Peiffer-Rangin (1979) plantea la posibilidad de la continuidad entre los cinturones paleozoicos de los Apalaches y las rocas paleozoicas de Sonora.
8	Damon <i>et al.</i> (1983) obtienen edades y datos isotópicos de intrusivos laramídicos que les permiten inferir el límite sur del cratón de América del Norte
9	Stewart <i>et al.</i> (1990) muestran la importancia de los microfósiles para definir las facies de depósito de las rocas paleozoicas en el centro de Sonora. Stewart <i>et al.</i> (1994) definen en la región de Caborca dos secuencias de rocas precámbricas, una metamórfica y otra sedimentaria.
10	La Sociedad Geológica de América publica dos libros sobre la geología de Sonora (Pérez-Segura y Jacques-Ayala, eds., 1991; y Jacques-Ayala, González-León y Roldán-Quintana, eds., 1996)..
11	Sobre geología económica, aparecen las publicaciones Carta metalogenética de Sonora (Pérez-Segura, 1985) y Geología y recursos minerales de la Sierra Madre Occidental (Clark <i>et al.</i> , 1992).
12	Ortlieb (1986) publica el estudio de terrazas marinas en las costas del Golfo de California. Kasser <i>et al.</i> (1987) efectúan mediciones geodésicas entre las islas y las costas del Golfo de California que permitieron calcular el desplazamiento de la península de California hacia el NW con respecto al continente.
13	McDowell <i>et al.</i> (1997) obtienen edades para entender la extensión cenozoica en Sonora.
14	Cochemé y Demant (1991) realizan diversos estudios de rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental. McDowell <i>et al.</i> (2001) publican edades de rocas volcánicas de la Fm. Tarahumara. Anderson <i>et al.</i> (2005) publican un libro sobre la megacizalladura.

* Aunque la selección de estas publicaciones es subjetiva, se trató de cubrir de manera equitativa todos los aspectos publicados sobre la geología de Sonora.

mediados del siglo XVII a 1900, los descubrimientos del Padre Eusebio Kino fueron de gran trascendencia, como la identificación del origen volcánico de la sierra de El Pinacate. Sus observaciones geográficas le

permitieron cartografiar por primera vez la península de California. La descripción del sismo de Bavispe en 1887 fue el primer trabajo científico acerca de un sismo en México.

Durante el período post-revolucionario (1910-1960), se desarrollan algunos de los estudios clásicos sobre la estratigrafía de Sonora. Se describen con metodologías modernas los primeros estromatolitos en rocas precámbricas de la región de Caborca. A partir de los años setenta, se publican las primeras edades de rocas cristalinas del Precámbrico.

En la época actual, a partir de 1960, la geología de Sonora presenta un gran desarrollo, destacando lo siguiente: se publica sobre un mayor número de disciplinas; se tiene un mayor avance en el entendimiento de la tectónica y de la estratigrafía, iniciándose el estudio de las rocas ígneas con métodos modernos que incluyen el uso de datos geoquímicos e isotópicos; se publican estudios sobre la porción sonorense de la Sierra Madre Occidental; en el estudio del golfo de California, se utilizan conceptos de tectónica de placas al considerarse el área del golfo como un límite de placas con una tectónica, actividad magmática y sísmica particulares; y se llevan a cabo importantes estudios sobre terrazas marinas, relacionadas con la evolución tectónica del golfo de California.

Un nuevo concepto en geología estructural, que fue desarrollado en Arizona, se aplica en Sonora para identificar los primeros complejos con núcleos ígneo-metamórficos (*metamorphic core complexes*), en algunas regiones del norte del Estado (Figura 7). Este estilo de deformación está relacionado con la extensión durante el Terciario tardío (Coney, 1979, 1980; Davis y Coney, 1979), y condujo al reconocimiento de rocas metamórficas de edad terciaria.

La gran producción de artículos geológicos en esta época se debe, en gran medida, a la presencia en Sonora de instituciones de investigación y enseñanza en geología, como la Estación Regional del Noroeste, dependiente del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México; del Departamento de Geología de la Universidad de Sonora; y del Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora, dependiente del Gobierno del Estado. Esta asociación enseñanza-investigación creó las condiciones ideales para desarrollar de manera equilibrada ambas labores académicas. Las tres instituciones anteriormente mencionadas, desde su creación, han mantenido una estrecha colaboración en proyectos de investigación sobre la

geología del estado de Sonora. Por su parte, el Servicio Geológico Mexicano, antes Consejo de Recursos Minerales, y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (mapas topográficos y estudios de geofísica), han realizado contribuciones de suma importancia en el área de geología económica.

Por otro lado, las características geológicas de Sonora han atraído desde el siglo pasado la atención de muchos investigadores, sobre todo norteamericanos, debido a que la geología de Sonora representa la continuación hacia el sur de estructuras desde precámbricas hasta terciarias que afloran en el suroeste de los Estados Unidos. Los grupos de geólogos de los Estados Unidos han provenido de las universidades de Arizona, California, Texas (en El Paso y Austin), Cincinnati y Pittsburgh, entre otras.

Algunos investigadores franceses llegaron a Sonora en la década de los setenta, como parte de un programa de intercambio académico entre el Instituto de Geología y el "Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération" (ORSTOM, actualmente IRD) y universidades como las de París y Marsella.

Sin duda alguna, la presencia de los investigadores franceses favoreció el avance del conocimiento de la geología del Cuaternario en la región del golfo de California, los estudios sobre estratigrafía y tectónica de las rocas mesozoicas en el norte de Sonora, las investigaciones sobre la estratigrafía del Paleozoico, y, más recientemente, el estudio de las rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental.

De acuerdo con este análisis bibliográfico, se puede afirmar que en la actualidad el estado de Sonora es uno de los mejor conocidos a nivel nacional desde el punto de vista geológico, lo cual queda de manifiesto en la última Carta Geológica de la República Mexicana (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992). Lo anterior se ha logrado gracias al trabajo de varias generaciones de geólogos de diversas nacionalidades en un lapso de cuando menos 150 años.

La participación de todos los grupos de geólogos mencionados, sin duda alguna, ha enriquecido las metodologías de trabajo, favoreciendo un sano crecimiento de la filosofía científica en beneficio de una mejor educación en el área de la geología.



Figura 7. Zona de milonitas terciarias del *metamorphic core complex* de Mazatán (Complejo de Núcleo Metamórfico Mazatán), en Sonora central.

Se considera una conclusión práctica importante la identificación de líneas de investigación sobre las que se ha hecho muy poco, como son: geomorfología, estudio de rocas metamórficas y geohidrología. En especial, los estudios en esta última línea de investigación son de vital importancia para una región desértica como es el estado de Sonora, donde el agua es un recurso sumamente valioso.

Finalmente, se puede decir que la ciencia es acumulativa y no tiene nacionalidad; en el caso de la geología, la importancia del aspecto acumulativo de los estudios previos es aún más evidente. De esta manera, los grandes descubrimientos geológicos en Sonora han sido producto del trabajo de muchos geólogos. En Sonora se ha trabajado desde hace más de cien años y aún queda mucho por investigar sobre la interesantísima geología de este bello rincón de nuestra patria.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera-Serrano, J.G., 1888, Estudio de los fenómenos sísmicos del 3 de Mayo de 1887: Anales del Ministerio de Fomento de la República Mexicana, v. 10, p. 5–56.
- Alencaster de Cserna, Gloria, 1961, Estratigrafía del Triásico Superior de la parte central del estado de Sonora. Parte I, in Paleontología del Triásico Superior de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11, p. 1–18.
- Almazán-Vázquez, Emilio, y Palafox-Reyes, J.J., 1985, Bioestratigrafía del Cretácico Inferior del Cerro de Las Conchas, al oriente de Arivechi: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 2, núm. 2, p. 25–29.
- Anderson, Charles, 1950, The 1940 E. W. cruise to the Gulf of California. Part I, Geology of the islands and neighboring land areas: Geological Society of America, Memoir 43, p. 1–53.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1977, U-Pb isotope ages of granitic plutons near Cananea, Sonora: Economic Geology, v. 72, p. 827–836.
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1978, Jurassic magmatism in Sonora, Mexico: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 10, núm. 7, p. 359 (resumen).
- Anderson, T.H., y Silver, L.T., 1979, The role of the Mojave-Sonora megashear in the tectonic evolution of northern Sonora, in Anderson, T.H., y Roldán-Quintana, Jaime, eds., Geology of Northern Sonora: Geological Society of America. Annual Meeting Guidebook (Trip # 27), p. 59–68.
- Anderson, T.H.; Silver, L.T.; y Salas, G.A., 1980, Distribution and U-Pb isotopic ages of some lineated plutons, northeastern Mexico, in Crittenden, M., Jr.; Coney, P.J.; y Davis, G., eds., Cordilleran metamorphic core complexes: Geological Society of America Memoir 153, p. 269–283.
- Anderson, T.H., y Schmidt, V., 1983, The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time: Geological Society of America Bulletin, v. 94, p. 941–966.
- Anderson, T.H.; Nourse, J.; McKee, J.; y Steiner, M., eds., 2005, The Mojave-Sonora Megashear hypothesis: development, assessment, and alternatives: Geological Society of America Special Paper 393, 712 p.

- Angermann, E., 1904, Apuntes sobre el Paleozoico en Sonora: Instituto Geológico de México, Parergones, v. 1, p. 81–90.
- Aponte-Barrera, Mario, 1974, Estratigrafía del Paleozoico (Cámbrico a Pensilvánico): México, D. F., Instituto Politécnico Nacional, tesis de Ingeniero Geólogo, 49 p. (inédita).
- Ávila-de Santiago, Gonzalo, 1960, Geología de los depósitos de antracita de la Sierra de San Javier y Santa Clara, municipio de San Javier, Sonora: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de Ingeniero Geólogo, 32 p. (inédita).
- Ayub, M., 1960, Minerales de manganeso en los estados de Sonora, Durango, Zacatecas y San Luis Potosí: México, D. F., Consejo de Recursos Minerales no Renovables (México), Boletín 49, 136 p.
- Bartolini, C.; Stewart, J.; Carter, C.; Murchey, B.; y Repetski, J., 1989, Stratigraphy of Paleozoic eugeoclinal strata in Sierra El Aliso, Central Sonora, Mexico: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 6, núms. 1 y 2, p. 11–21.
- Beal, C., 1922, La Compañía Petrolera de Sonora: Boletín del Petróleo, v. 13, núm. 4, p. 263–291.
- Blázquez-López, Luis, 1926, Hidrología subterránea de las cuencas de los ríos Concepción y Sonoíta, Altar, Sonora: México, D. F., Departamento de Exploración y Estudios Geológicos (Instituto Geológico de México), Folletos de Divulgación, núm. 22, p. 3–30.
- Bojórquez-Ochoa, Jesús, y Rosas-Haro, José, 1989, Geología de la Hoja Aconchi H12D13, Municipio de Aconchi, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 92 p. (inédita).
- Bonillas, C., 1910, Estudio geoquímico y óptico de una labradorita del Pinacate: México, D. F., Instituto Geológico de México, Parergones, v. 3, p. 25–30.
- Calmus, Thierry, y Pérez-Segura, Efrén, eds., 2000, Cuarta Reunión sobre la Geología del Noroeste de México y Áreas Adyacentes: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Estación Regional del Noroeste y Universidad de Sonora, Departamento de Geología: Libro de Resúmenes, Publicaciones Ocasionales núm. 2, 149 p.
- Castillo-Rivas, Juan, 1992, Geología y geoquímica del Distrito Cerro de Oro, Municipio de Rayón, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 93 p. (inédita).
- Castillo, José, y Montes de Oca, Jorge, 1988, Bario en el agua subterránea en la franja costera del Valle de Guaymas Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Boletín, núms. 1 y 2, p. 87–95.
- Cevallos-Ferriz, Sergio, y Weber, Reinhard, 1980, Arquitectura, estructura y ambiente de depósito de algunos estromatolitos del Precámbrico sedimentario de Caborca, Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 4, núm. 2, p. 51–56.
- Clark, K.F.; Roldán-Quintana, Jaime; y Schmidt, R., eds., 1992, Geology and mineral resources of northern Sierra Madre Occidental, Mexico: El Paso Texas, El Paso Geological Society, Guidebook for the 1992 Field Conference, 479 p.
- Cirett-Galán, Jorge, 1989, Características geológicas e hidrogeoquímicas del valle de Ures, Sonora, México: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 60 p. (inédita).
- Cochémé, J.J., y Demant, Alain, 1991, Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico, in Pérez-Segura, Efrén, y Jacques-Ayala, César, eds., Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America Special Paper 254, p. 81–94.
- Coney, P.J., 1979, Tertiary evolution of Cordilleran metamorphic core complexes, in Armentrout, J.W.; Cole, M.R.; y Terbest, H., eds., Cenozoic paleogeography of western United States: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, Symposium 3, p. 15–28.
- Coney, P.J., 1980, Cordilleran metamorphic core complexes, in Crittenden, M.D.; Coney, P.J.; y Davis, G.H., eds., Tectonic significance of metamorphic core complexes of the North American Cordillera: Geological Society of America Memoir 153, p. 7–31.
- Cooper, G., y Arellano, A.R.V., 1946, Stratigraphy near Caborca, northwest Sonora: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 30, p. 606–611.
- Damon, P.E.; Livingston, D.E.; Mauger, R.L.; Giletti, B.J.; y Pantoja-Alor, Jerjes, 1962, Edad del Precámbrico anterior y de otras rocas del zócalo de la región de Caborca-Altar, en la parte noroccidental del Estado de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 64, pte. 2, p. 11–44.
- Damon, P.E.; Shafiqullah, Muhammad; Roldán-Quintana, Jaime; y Cochémé, J.J., 1983, El Batolito Larámide (90–40 Ma) de Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional 15, Memoria, p. 63–95.
- Dauphin, P., y Simoneit, B., eds., 1991, The Gulf of California and Peninsular Province of the Californias: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists Memoir 47, 793 p.
- Davis, G.H., y Coney, P.J., 1979, Geological development of metamorphic core complexes: Geology, v. 7, p. 120–124.
- Douglas, J., 1881, The antimony deposits in Sonora, Mexico: Engineering and Mining Journal, v. 31, p. 350–352.
- Dumble, E., 1900a, Notes on the geology of Sonora, Mexico: American Institute of Mining and Petroleum Engineering Transactions, v. 29, p. 122–152.
- Dumble, E., 1900b, Cretaceous of Obispo Canyon, Sonora, Mexico: Texas Academy of Sciences Transactions, v. 4, p. 81.
- Echávarri-Pérez, Ariel, 1971, Petrografía y alteración del depósito La Caridad, Municipio de Nacozari, Sonora: Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, Convención Nacional 9, Memoria, Hermosillo, p. 71–78.
- Echávarri-Pérez, Ariel; Saitz-Sau, Óscar; y Salas-Pizá, G.A., 1976, Mapa metalogenético del Estado de Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Minas y Geología.
- Emmons, S.F., 1906, Los Pilares mine, Nacozari, Mexico: Economic Geology, v. 1, p. 629–643.
- Emmons, S.F., 1910, Cananea mining district of Sonora, Mexico: Economic Geology, vol. 5, p. 312–356.

- Fernández-Aguirre, M.A.; Monreal-Saavedra, Rogelio; y Grijalva-Haro, A.S., eds., 1993, Carta Geológica de Sonora, escala 1:500,000: Hermosillo, Dirección de Fomento Minero del Gobierno del Estado de Sonora y CESUES.
- Flores, Teodoro, 1929, Reconocimientos geológicos en la región central del Estado de Sonora: México, D.F., Instituto Geológico de México, Boletín 49, 267 p.
- Fries, Carl, Jr., 1962, Reseña de la geología del Estado de Sonora con énfasis en el Paleozoico: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 14, p. 257–272.
- García y Barragán, J.C.; Jacques-Ayala, César, y DeJong, Kees, 1998, Stratigraphy of the Cerros El Amol, Altar, Sonora, Mexico, in Clark, K.F., ed., Gold deposits of northern Sonora, Mexico: Society of Economic Geologists Guidebook, v. 30, 252 p.
- Gastil, Gordon; Minch, J.; y Phillips, R., 1983, The geology and ages of the islands, in Case, T.J., y Cody, M.L., eds., Island biogeography in the sea of Cortez: Berkeley, University of California Press, p. 13–25.
- Gabb, W., 1869, Cretaceous and Tertiary fossils: Geological Survey of California, Paleontology, v. 11, Sections 1, 11 y 111, 229 p.
- González-León, C.M., 1980, La Formación Antimonio (Triásico Superior-Jurásico Inferior) en la Sierra del Álamo, Estado de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 4, núm. 1, p. 13–18.
- González-León, C.M., 1986, Estratigrafía del Paleozoico de la Sierra del Tule, noreste de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 6, núm. 2, p. 117–135.
- González-León, C.M., y Jacques-Ayala, César, 1990, Paleogeografía del Cretácico Temprano en Sonora: Linares, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Actas, núm. 4, p. 125–152.
- González-León C.M.; McIntosh, W.; Lozano-Santacruz, Rufino; Valencia-Moreno, Martín; Amaya-Martínez, Ricardo; y Rodríguez-Castañeda, J.L., 2000, Cretaceous and Tertiary, sedimentary, magmatic and tectonic evolution of north-central Sonora (Arizpe and Bacanuchi quadrangles) northwest Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 112, núm.4, p. 600–610.
- González-León C.M.; Stanley, G., Jr.; Taylor, D., 2000, Ammonoid discoveries in the Antimonio Formation, Sonora, Mexico—new constraints on the Triassic-Jurassic boundary: Journal of South American Earth Sciences, v. 13, p. 491–497.
- González-León, C.M.; Scott, R.W.; Löser, Hannes; Lawton, T.F.; Robert, E.; y Valencia, V.A., 2007, Aptian-lower Albian Mural Formation—stratigraphy, biostratigraphy and depositional cycles on the Sonoran shelf, northeastern Mexico: Cretaceous Research, doi.: 10.1016/j.cretes.2007.06.001.
- Hamilton, W., 1961, Origin of the Gulf of California: Geological Society of America Bulletin, v. 72, p. 1307–1311.
- Hayama, Y.; Shibata, K.; y Takeda, H., 1984, K/Ar ages of the low grade metamorphic rocks in the Altar Massif, northwestern Sonora, Mexico: Journal of the Geological Society of Japan, v. 90, p. 589–596.
- Hess, F., 1909, Graphite mining near La Colorada, Sonora: Engineering Magazine, v. 28, p. 26–48.
- Imlay, R.W., 1939, Paleogeographic studies in northeastern Sonora, Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 50, núm. 11, p. 1923–1744.
- Ives, R., 1964, The Pinacate region, Sonora, Mexico: California Academy of Sciences, Occasional Papers, núm. 47, p. 1–43.
- Jacques-Ayala, César, y Potter, P.E., 1987, Stratigraphy and paleogeography of Lower Cretaceous rocks, Sierra El Chanate, northwestern Sonora, Mexico, in Dickinson, W.R., y Klute, M.A., eds., Mesozoic rocks of southern Arizona and adjacent areas: Arizona Geological Society Digest, v. 18, p. 203–214.
- Jacques-Ayala, César; González-León, C.M.; y Roldán-Quintana, Jaime, eds., 1996, The Mesozoic of northwestern Mexico: Geological Society of America, Special Paper 301, 216 p.
- Jahns, R.H., 1959, Collapse depressions of Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico: Arizona Geological Society, Southern Arizona Guidebook 2, p. 165–184.
- Janin, L., Jr., 1890, The Mulatos gold mines, State of Sonora, Mexico: Engineering and Mining Journal, v. 49, p. 131–132.
- Kasser, M.; Guichard, J.; Angelier, J.; Castellanos, Francisco; Colletta, B.; Guerrero-García, J.C.; Lesage, Ph.; Montañón-Rey, Tito; Rodríguez-Castañeda, J.L.; y Roldán-Quintana, Jaime, 1984, Establishment of a geodetic network across the central Gulf of California, in Malpica-Cruz, V.M.; Celis-Gutiérrez, Socorro; Guerrero-García, J.C.; y Ortlieb, Luc, eds., Neotectonics and sea level variations in the Gulf of California area—a Symposium: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, p. 139–148.
- Kasser, M.; Ruegg, C.; Lesage, Ph.; Ortlieb, Luc; Pagaret, J.; Duch, N.; Guerrero-García, J.C.; y Roldán-Quintana, Jaime, 1987, Geodetic measurements of plate motions across the Central Gulf of California 1982–1986: Geophysics Research Letter, v. 14, núm. 1, p. 5–8.
- King, R.E., 1939, Geological reconnaissance in northern Sierra Madre Occidental of Mexico: Geological Society of America Bulletin, v. 50, núm. 11, p. 1625–1722.
- Keppie, J.D.; Dostal, J.; Miller, B.V.; Nance, R.D.; Ortega-Rivera, A.; Roldán-Quintana, Jaime; y Lee, J.K., 2006, Geochronology and geochemistry of the Francisco Gneiss—Triassic continental rift tholeiites on the Mexican margin of Pangea, metamorphosed and exhumed in a Tertiary core complex: International Geology Review, v. 48, p. 1–16.
- Larson, R.; Menard, W.; y Smith, M., 1968, Gulf of California—a result of ocean-floor spreading and transform faulting: Science, v. 161, p. 781–784.
- Lawton, T.F.; González-León, C.M.; Lucas, S.G.; y Scout, R.W., 2004, Stratigraphy and sedimentology of the Upper Aptian–Upper Albian Mural Limestone (Bisbee Group) in northern Sonora, Mexico: Cretaceous Research, v. 25, p. 43–60.
- López-Ramos, Ernesto, 1974, Geología general y de México, 1.ª ed.: México, D. F., edición privada, 509 p.
- López-Ramos, Ernesto, 1980, Geología de México, tomo II, 2.ª ed.: México, D. F., edición privada, p. 58–105.
- Lugo-Zazueta, R.E.; Calmus, Thierry; Wong, M.; y Gleadow, A.J., 2006, Termocronología ⁴⁰Ar/³⁹Ar y trazas de fisión: Evolución terciaria “Basin and Range” de la sierra de Aconchi, Sonora México: XI Congreso Geológico Chileno. Actas, v. 1, Geodinámica Andina, p. 271–274.

- Löser, Hannes, y Minor, K.P., 2007, Palaeobiogeographic aspects of Late Barremian to Late Albian coral faunas from northern Mexico (Sonora) and southern USA (Arizona, Texas): *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, v. 245, núm. 2, p. 193-218.
- Mandarino, J.A., y Williams, S.J., 1961, Five new minerals from Moctezuma, Sonora, Mexico: *Science*, v. 133, p. 2017.
- Mandarino, J.A., Mitchell, R.S.; y Hancock, R.G.V., 1975, Mroseite, a calcium tellurite-carbonate from Moctezuma, Sonora, Mexico: *Canadian Mineralogist*, v. 13, p. 286-288.
- Mead, R.D.; Kesler, S.E.; Foland, K.A.; y Jones, L.M., 1988, Relationship of Sonora tungsten mineralization to the metallogenic evolution of Mexico: *Economic Geology*, v. 83, p. 1943-1965.
- McDowell, F.W.; Roldán-Quintana, Jaime; y Amaya-Martínez, Ricardo, 1997, Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with Tertiary extension in Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 15, núm. 2, p. 145-156.
- McDowell, F.W.; Roldán-Quintana, Jaime; y Connelly, J.N., 2001, Duration of Late Cretaceous-early Tertiary magmatism in east-central Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, núm. 4, p. 521-531.
- McGee, W.J., 1896, Expedition to Seriland: *Science*, nueva serie, v. 3, p. 493-505.
- Montané-Martí, J.C., 1989, Juan Bautista de Anza—diario del primer viaje a la California, 1774: Hermosillo, Sociedad Sonorense de Historia en coedición con Reprográficas S. A., 121 p.
- Mulchay, R.B., y Velasco, J.R., 1954, Sedimentary rocks at Cananea, Sonora, Mexico, and tentative correlation with the section at Bisbee and the Swisshelm Mountains, Arizona: *Mining Engineering*, v. 6, p. 628-632.
- Navarro-Martínez, F., y Soto-Contreras, J., 1987, Geología de la carta Tecoripa H12D64, porción central del Estado de Sonora—nuevas contribuciones a la estratigrafía del Paleozoico: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 97 p. (inédita).
- Navarro-Mayer, Antonio, y Ochoa-Landín, Lucas, 1989, Historia geológica y tectónica del distrito minero de Cananea: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 34 p. (inédita).
- Newberry, J.S., 1876, Geological report, in Report of exploring expedition from Santa Fe, New Mexico, to the junction of the Grand and Green Rivers (includes description of Triassic plants from Sonora): U. S. Army, Department of Engineering, p. 141-148.
- Nourse, J.A., 1990, Tectonostratigraphic development and strain history of the Magdalena Metamorphic Core Complex, northern Sonora, in Gehrels, G.E., y Spencer, J.E., eds., *Geological excursions through the Sonoran Desert Region, Arizona and Sonora*: Arizona Geological Survey, Special Paper 7, p. 155-164.
- Ortega-Gutiérrez, Fernando; Mitre-Salazar, L.M.; Roldán-Quintana, Jaime; Aranda-Gómez, J.J.; Morán-Zenteno, D.J.; Alaniz-Álvarez, S.A.; y Nieto-Samaniego, Á.F., 1992, Carta Geológica de la República Mexicana, escala 1:2'000,000, 5.ª ed.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Consejo de Recursos Minerales, mapa con texto explicativo, escala 1:2'000,000, 74 p.
- Ortlieb, Luc, y Malpica-Cruz, V.M., 1978, Reconnaissance des dépôts pleistocènes marins autour du Golfe de Californie, Mexique: *O.R.S.T.O.M.*, v. 10, p. 117-190.
- Ortlieb, Luc, 1986, Néotectonique et variations du niveau marin au Quaternaire dans la région du Golfe de Californie, Mexique: Université d'Aix-Marseille II, Faculté des Sciences de Luminy, disertación doctoral, 779 p. (inédita).
- Ortlieb, Luc, 1991, Quaternary shorelines along the northeastern Gulf of California, geochronological data and neotectonic implications, in Pérez-Segura, Efrén, y Jacques-Ayala, César, eds., *Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America, Special Paper 254*, p. 95-120.
- Oskin, M.; Stock, J.; y Martín-Barajas, Arturo, 2003, Rapid localization of Pacific-North America plate motion in the Gulf of California: *Geology*, v. 29, p. 459-462.
- Paz-Moreno, F., 1987, Geología de los campos basálticos de Moctezuma y Huépari, Moctezuma, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Departamento de Geología, tesis profesional, 57 p. (inédita).
- Pedrazzini-de Schlaepfer, Carmen, 1961, Estudio geológico y petrológico de las pegmatitas de El Batamote, en la sierra de Aconchi, municipio de Baviácora, estado de Sonora: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis de Ingeniero Geólogo, 90 p. (inédita).
- Peiffer-Rangin, Françoise, 1979, Les zones isotopiques du Paléozoïque inférieur du nord-ouest mexicain, témoins du relais entre les Appalaches et la cordillera ouest américain: *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, t. 288, Serie D, p. 1517-1519.
- Pérez-Segura, Efrén, 1985, Carta metalogenética de Sonora—una interpretación de la metalogenia de Sonora, escala 1:250,000: Hermosillo, Dirección de Minería, Geología y Energéticos del Gobierno del Estado de Sonora, Publicación 7, 45 p.
- Pérez-Segura, Efrén, y Jacques-Ayala, César, eds., 1991, *Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper 254*, 130 p.
- Pérez-Segura, Efrén, 1992, The Au-Te mineralogy of the San Francisco deposit, Sonora, Mexico, in Clark, K.F.; Roldán-Quintana, Jaime; y Schmidt, R., eds., *Geology and mineral resources of northern Sierra Madre Occidental, Mexico: El Paso Geological Society, Field Conference Guidebook*, núm. 24, p. 223-230.
- Pesquera-Velázquez, Rubén, 1960, Geología y exploración de los depósitos de carbón de la región de San Marcial, estado de Sonora, México: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México), Boletín 59, 39 p.
- Pfefferkorn, Ignaz, 1795 (1984), Descripción de la Provincia de Sonora, libro primero, primera edición en alemán, traducido al español por Armando Hopkins: Hermosillo, Gobierno del Estado de Sonora, 177 p.
- Polzer, W.Ch.; Romero, J.; Olvera, J.; y Bufkin, D., 1981, Eusebio Kino, S. J. Padre de la Pimería Alta: Hermosillo, Gobierno del Estado de Sonora, 59 p.

- Poole, F.G., y Amaya-Martínez, Ricardo, 2000, Silurian and Devonian carbonate-shelf rocks and Lower Jurassic sequence near Rancho Placeritos, west-central Sonora: University of Sonora, Fourth symposium on the geology of northwest Mexico and adjacent areas, Hermosillo, Field guide (March 4, 2000) y Field Trip 2 (March 6-8, 2000), 24 p.
- Pubellier, M.; Rangin, C.; Rascón, B.; Chorowics, J.; y Bellon, H., 1995, Cenomanian thrust tectonics in the Sahuaripa region, Sonora—implications about northwestern Mexico megashear, in Jacques-Ayala, César; González-León, C.M.; y Roldán-Quintana, Jaime, eds., Studies on Mesozoic of Sonora and adjacent areas: Geological Society of America Special Paper 301, p. 111–120.
- Radelli, Luigi, 1985, Scheelite deposits of central Sonora, Mexico: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 2, núms. 1 y 2, p. 65–73.
- Radelli, Luigi; Menicucci, S.; Mesnier, H.Ph.; Araux-Sánchez, Elizabeth; Calmus, Thierry; Amaya-Martínez, Ricardo; Barrera, M.E.; Domínguez-Perla, J.E.; Navarro-Martínez, Luis; y Soto, C.L., 1987, Allochthonous Paleozoic bodies of central Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 2, II Época, v. 3, p. 1–15.
- Rangin, Claude, 1977a, Sobre la presencia de Jurásico Superior con amonitas en Sonora septentrional, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 1, p. 1–4.
- Rangin, Claude, 1977b, Tectónicas sobrepuestas en Sonora septentrional: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 1, p. 44–47.
- Rangin, Claude, 1978, Consideraciones sobre la evolución geológica de la parte septentrional del estado de Sonora, in Roldán-Quintana, Jaime, y Salas-Pizá, G.A., eds., Libro-guía del Primer Simposio sobre la Geología y Potencial Minero en el Estado de Sonora: Hermosillo, Universidad Nacional Autónoma de México, Estación Regional del Noroeste, p. 35–56.
- Remond, A., 1866, Notice of geological explorations in northern Mexico: Proceedings of the California Academy of Science, v. 3, p. 244–257.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., 1990, Relaciones estructurales en la parte centro-septentrional del estado de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 9, núm. 1, p. 51–61.
- Rodríguez-Castañeda, J.L., 1999, Cretaceous-Tertiary detachment surface—Cerro El Vigía structural block in the Banamichi-San Antonio region, central Sonora: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 16, núm. 1, p. 63–72.
- Roldán-Quintana, Jaime, 1991, Geology and chemical composition of the Jaralito and Aconchi batholiths in east-central Sonora, Mexico, in Pérez-Segura Efrén, y Jacques-Ayala, César, eds., Studies of Sonoran Geology: Geological Society of America Special Paper 254, p. 69–80.
- Roldán-Quintana, Jaime; Calmus, Thierry; McDowell, F.W.; Amaya-Martínez, Ricardo, y Bellon, H., 2003, Geology of northern Sierra Madre Occidental, eastern Sonora and western Chihuahua, Mexico, in Alcayde, Magdalena, y Gómez-Caballero, J.A., eds., Geologic transects across Cordilleran Mexico, Guidebook for the field trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Publicación Especial 1, p. 33–52.
- Roldán-Quintana, Jaime; Mora-Klepeis, Gabriela; Calmus, Thierry; Valencia-Moreno, Martín; y Lozano-Santa Cruz, Rufino, 2004, El graben de Empalme, Sonora, México—magmatismo y tectónica extensional asociados a la ruptura inicial del Golfo de California: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 21, núm. 3, p. 320–334.
- Roldán-Quintana, Jaime, y Solano-Rico, Baltasar, 1978, Contribución a la estratigrafía de las rocas volcánicas del estado de Sonora: Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 1, núm. 1, p. 19–26.
- Ramírez-Ruvalcaba, José; Osoria, Amador, De la Campa, Genaro; Alarcón-L., Ubaldo; Aguilera, Eduardo; y Velasco-Hernández, Juan, 1973, Investigaciones geológico-mineras sobre cobre en los prospectos de “Los Alisos”, “La Caridad”, “El Alacrán”. Reconocimiento geológico y geofísico regional en el distrito de Nacozari, en el estado de Sonora: Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Boletín 79, 100 p.
- Rubinovich-Kogan, Raúl; Levy-Aguilera, Marcel; De Luna-Moreno, Carmen; y Block-Iturriaga, Carmen, 1991, Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941)—datos biográficos y bibliografía anotada: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología; y Universidad Autónoma de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, 166 p.
- Scott, R.W., y González-León, C.M., 1991, Paleontology and biostratigraphy of Cretaceous rocks, Lampazos area, Sonora, Mexico, in Pérez-Segura, Efrén, y Jacques-Ayala, César, eds., Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper 254, p. 51–67.
- Shepard, F.P., 1950, Submarine topography of the Gulf of California, in 1940 E.W. Scripps Cruise to the Gulf of California: Geological Society of America Memoir 43, parte 3, 32 p.
- Silva-Pineda, Alicia, 1961, Flora fósil de la Formación Santa Clara (Cárnico) del estado de Sonora, in Paleontología del Triásico Superior de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Paleontología Mexicana 11, parte 2, p. 19–37.
- Silver, L.T., y Anderson, T.H., 1974, Possible left-lateral early to middle Mesozoic disruption of the southwestern North American craton margin: Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 6, núm. 7, p. 955–956 (resumen).
- Stewart, J.H., 1988, Latest Proterozoic and Paleozoic southern margin of North America and the accretion of Mexico: Geology, v. 16, p. 186–189.
- Stewart, J.H.; McMenamin, M.; y Morales-Ramírez, J.M., 1984, Upper Proterozoic and Cambrian rocks in the Caborca region, Sonora, Mexico—physical stratigraphy, biostratigraphy, paleocurrent studies and regional relations: U.S. Geological Survey Professional Paper 1309, 36 p.
- Stewart, J.H., y Roldán-Quintana, J., 1991, Upper Triassic Barranca Group; Nonmarine and shallow-marine rift-basin deposits of northwestern Mexico, in Pérez-Segura, E., y Jacques-Ayala, C., eds., Studies of Sonoran geology: Geological Society of America Special Paper 254, p. 19–36.

- Stewart, J.H., y Roldán-Quintana, Jaime, 1994, Map showing late Cenozoic extensional tilt patterns and associated structures in Sonora and adjacent areas, Mexico: U. S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies, Map MF-2238, scale 1:100,000, mapa con texto explicativo.
- Suter, Max, 2001, The historical seismicity of northeastern Sonora and northwestern Chihuahua, Mexico (28–32°N, 106–111°W): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, p. 521–532.
- Suter, Max, 2006, Contemporary studies of the May 1887, M 7.5 Sonora, Mexico (Basin and Range Province) earthquake: *Seismological Research Letters*, v. 77, núm. 2, p. 134–147.
- Valencia-Moreno, Martín; Ruiz, Joaquín; Barton, M.D.; Patchett, P.J.; Zürcher, Lukas; Hodkinson, D.G.; y Roldán-Quintana, Jaime, 2001, A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico—identification of the southern edge of the North American Precambrian basement: *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, núm. 11, p. 1409–1422.
- Valencia-Moreno, M.; Ruiz, J.; Ochoa-Landín, L.; y Vargas-Navarro, P., 2003, Geochemistry of the coastal Sonoran batholith, northwestern Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 40, p. 819–831.
- Valencia-Moreno, M.; Ruiz, J.; y Roldán-Quintana, J., 1999, Geochemistry of Laramide granitic rocks across the southern margin of the Paleozoic North American Continent, central Sonora, Mexico: *International Geology Review*, v. 41, p. 845–857.
- Valencia, V.A.; Noguez-Alcántara, Benito; Barra, Fernando; Ruiz, Joaquín; Gehrels, George; Quintanar, Francisco; y Valencia-Moreno, Martín, 2006, Re-Os molybdenite and LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology for the Milpillas porphyry copper deposit—insights for the timing and mineralization in the Cananea District, Sonora, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 1, p. 39–53.
- Valentine, W.G., 1936, Geology of the Cananea mountains, Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, v. 47, p. 53–86.
- Vega-Granillo, L., 1992, Estudio hidrogeológico de la cuenca del río Mátape, Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, II Época, v. 9, p. 75–84.
- Vega-Granillo, L., y Macías-Reyes, M., 1993, Medidas para controlar la sobre explotación de acuíferos en el Estado de Sonora: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 10, núm. 2, p. 31–44.
- Vega-Granillo, R., y Araux-Sánchez, E., 1987, Estratigrafía del Paleozoico en el área del Rancho Las Norias, Sonora central: Hermosillo, Universidad de Sonora, Boletín del Departamento de Geología, v. 4, núms. 1 y 2, p. 41–50.
- Vega-Granillo, R., y Calmus, T., 2003, Mazatán metamorphic core complex (Sonora, Mexico)—structures along the detachment fault and its exhumation evolution: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 16, p. 193–204.
- Velasco, J.R., 1956, Geología del mineral de Cananea, Sonora, México: Congreso Geológico Internacional, 20, México, D. F., Excursiones A-1 y C-4, p. 43–51.
- Weber, Reinhard; Cevallos-Ferriz, Sergio; López-Cortés, Alejandro; Olea-Franco, Adolfo; y Singer-Sochet, Silvia, 1979, Los estromatolitos del Precámbrico tardío de los alrededores de Caborca, Estado de Sonora. I. Reconstrucción de *Jacutophyton* Shapovalova e interpretación paleoecológica preliminar: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 3, núm. 1, p. 9–23.
- Weber, Reinhard; Zambrano-García, Ángel; y Amozurrutia-Silva, Flor, 1980, Nuevas contribuciones al conocimiento de la tafoflora de la Formación Santa Clara (Triásico Tardío) de Sonora: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 4, núm. 2, p. 125–137.
- Wiese, J.H., 1946, Tungsten deposits of southern Sonora: U. S. Geological Survey, Bulletin 946-D, p. 103–130.
- Wilson, I.F., y Rocha, V.S., 1949, Coal deposits of the Santa Clara District, near Tónichi, Sonora, Mexico: U. S. Geological Survey, Bulletin 962-A, p. 1–80.
- Wisser, E.H., 1966, The epithermal precious-metal province of northwest Mexico: Nevada Bureau of Mines, Report 13, Part C, p. 63–92.