

Sucesión volcano-sedimentaria del Plioceno superior-Pleistoceno inferior, previa a la erupción de las calderas La Reforma y El Aguajito, Baja California Sur, México

R. Marcela Lira-Beltrán,^{1,*} José L. Macías², Felipe García-Tenorio², Laura García-Sánchez, Susana Osorio-Ocampo, Gerardo González-Barba³ y Tobias Schwennicke⁴

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

² Instituto de Geofísica Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta, C.P. 58190, Morelia, Michoacán, México.

³ Departamento Académico de Ciencias Marinas y Costeras, Museo de Historia Natural, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera al sur km. 5.5, Colonia El Mezquitito, C.P. 23080, La Paz, B.C.S., México.

⁴ Departamento Académico de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Baja California Sur, Carretera al sur km 5.5, Col El Mezquitito, C.P. 23080, La Paz, Baja California Sur, México.

* marcelalirabeltran@gmail.com

RESUMEN

Presentamos los resultados de un estudio estratigráfico de una sucesión volcano-sedimentaria del Plioceno superior-Pleistoceno inferior expuesta alrededor y en la zona de las calderas La Reforma y El Aguajito, al norte de Santa Rosalía, en Baja California Sur, México. Esta sucesión forma parte del sustrato de las calderas y se relacionan con las formaciones sedimentarias descritas en la cuenca de Santa Rosalía. La sucesión tiene nueve unidades litológicas, con rocas volcánicas efusivas y explosivas de ambiente subacuoso-subaéreo y rocas siliciclásticas fosilíferas y carbonatadas. Estas unidades fueron agrupadas en dos sucesiones estratigráficas, con base en estudios anteriores, relaciones estratigráficas, tres nuevas edades obtenidas en circones, edades paleontológicas relativas y correlación regional. En orden estratigráfico, estas sucesiones con sus respectivas unidades son: (1) Formación Infierno, consiste en una sucesión de rocas volcano-sedimentarias con una edad de 2.5 Ma cerca de su base y 1.8 Ma en su cima. Se caracteriza por presentar cuatro capas volcánicas interstratificadas con sedimentos fosilíferos y dos capas sedimentarias las cuales se pueden agrupar en las siguientes unidades: ignimbrita Mesa de Enmedio (depósito de bloque de pómez gigante, Plioceno superior), arenisca fosilífera El Yaqui (Pleistoceno inferior), ignimbrita Cueva Amarilla (2.4 Ma), ignimbrita El Carrizo (1.89 Ma), arenisca fosilífera Cueva de Los Fósiles y lava El Azufre (1.8 Ma). (2) Sucesión volcano-sedimentaria Pre-Reforma, yace discordante sobre la Formación Infierno, con evidencias de depositación subacuosa y compuesta por las unidades: volcano-sedimentaria El Contrabando (1.43 Ma), lava Punta Candeleros (1.36 Ma) y en la cima la unidad volcano-sedimentaria La Zorra (1.35 Ma). En la zona estudiada las unidades sedimentarias pertenecientes a la Formación Infierno se caracterizan por contener abundantes fósiles, siendo los más comunes

bivalvos de la familia Pectinidae. Con base en el contenido fósil se puede concluir que el ambiente de depósito de la formación Infierno fue de aguas tropicales-subtropicales, que variaron desde zonas intermareales y bahías protegidas, a zonas de plataforma interna con menos de 100 m de profundidad.

Palabras clave: Formación Infierno; cuenca de Santa Rosalía; volcano-sedimentario; pectínidos.

ABSTRACT

We present the results of a stratigraphic study of an upper Pliocene to lower Pleistocene volcano-sedimentary succession exposed in and around the La Reforma and El Aguajito calderas, north of Santa Rosalía, Baja California Sur, Mexico. This succession is part of the pre-calderas substrate and is related to the sedimentary formations described in the Santa Rosalía basin. The succession has nine lithological units that includes effusive and pyroclastic deposits accumulated in subaqueous and subaerial settings, that include fossiliferous siliciclastic and carbonate rocks. These units were defined Based on previous studies, our stratigraphic descriptions, a regional correlation and we defined recognized these units were grouped into two stratigraphic successions that are: (1) The Infierno Formation dated 2.5 Ma near its base and 1.8 Ma atop. It is a volcano-sedimentary succession more complex than previously described that includes: Mesa de Enmedio ignimbrite (giant pumice block deposit), El Yaqui fossiliferous sandstone (lower Pleistocene), Cueva Amarilla ignimbrite (2.4 Ma), El Carrizo ignimbrite (1.89 Ma), El Azufre lava (1.8 Ma) and the Cueva de Los Fósiles fossiliferous sandstone. (2) The Pre-Reforma volcano-sedimentary succession that, rests unconformably over the Infierno Formation and consists of three units: El Contrabando

volcano-sedimentary (1.43 Ma), Punta Candeleros lava (1.36 Ma) and the La Zorra volcano-sedimentary unit (1.35 Ma). The sedimentary units of the Infierno Formation contain abundant fossils with predominance of Pectinid bivalves of the Pectinidae family. The fossil record suggests that The Infierno Formation emplaced in tropical-subtropical waters, which varied from intertidal zones and sheltered bays, to inner shelf zones with less than 100 m depth.

Key words: *Infierno Formation; Santa Rosalía basin; volcano-sedimentary; pectinids.*

INTRODUCCIÓN

A partir del Mioceno tardío durante el proceso de apertura del golfo de California (Oskin y Stock, 2003; Bennett *et al.*, 2013) se originó una serie de cuencas sedimentarias, resultado de la etapa de *rifting* y de fallamiento normal dextral oblicuo con dirección NNW (Dorsey y Umhoefer, 2012). Como ejemplos de las cuencas sedimentarias se pueden citar las cuencas marginales de San José del Cabo, Loreto y Santa Rosalía (Figura 1), ubicadas en el borde oeste del Golfo de California (Dorsey y Umhoefer, 2012). La Cuenca de Santa Rosalía (CSR) se localiza en la región centro oriental de la península de Baja California, tiene una extensión aproximada de 80 km desde la localidad de San Bruno en el sur hasta la caldera El Aguajito en el norte (Lira-Beltrán *et al.*, 2020). Dentro de esta cuenca se depositaron sucesiones sedimentarias marinas y continentales, las cuales sobreyacen a los depósitos volcánicos miocénicos de la sierra de Santa Lucía y del Grupo Comondú (Ortlieb y Colletta, 1984; Miranda-Avilés *et al.*, 2005). Las sucesiones sedimentarias fueron descritas y estudiadas con detalle y con base en discordancias y la megafauna marina principalmente bivalvos las dividieron en cuatro formaciones: Boleo, La Gloria (actualmente Tirabuzón), Infierno y Santa Rosalía (Wilson, 1948 y Wilson y Rocha, 1955, Carreño, 1981; Holt *et al.*, 2000). Estos autores centraron sus trabajos en el Distrito Minero del Boleo ubicado en la porción sur de la CSR. Hasta estos estudios la extensión de la Formación Infierno (Pleistoceno) comprendía desde la zona sur de la cuenca en la zona de los arroyos de Santa Águeda y Montado (Wilson, 1948 y Wilson y Rocha, 1955) y hasta las inmediaciones de la Caldera La Reforma (Ortlieb y Colletta, 1984). Sin embargo, no existía ninguna cartografía detallada y por ende ninguna estratigrafía que confirmara estas premisas. Durante los últimos años se inició una serie de estudio de cartografía y estratigrafía de las calderas La Reforma (1.35–sha0.96 Ma) y El Aguajito (1.1 Ma) (García-Sánchez *et al.*, 2019, Osorio-Ocampo *et al.*, 2019; Lira-Beltrán *et al.*, 2020), en donde se describieron sucesiones volcano-sedimentarias del Plioceno-Pleistoceno. Estas sucesiones pueden llegar a tener de 200 m de espesor, lo cual indica que el límite de la CSR podría extenderse hacia el norte (Lira-Beltrán *et al.*, 2020). El presente trabajo se enfoca en el estudio estratigráfico, litológico, paleontológico y cronológico de esta sucesión volcano-sedimentaria del Plioceno superior-Pleistoceno inferior que está relacionada con la Formación Infierno en el sustrato de las calderas.

El trabajo se realizó en 11 localidades ubicadas en las calderas La Reforma y El Aguajito, que se enlistan a continuación: Cuevas Amarillas, cañón El Yaqui, cañón de La Palma, cañón El Álamo, cañón El Morro Prieto, cañón El Gringo, cañón El Azufre, cañón de La Zorra, Santa Ana, Los Tomates y San Alberto (Figura 1). Con la finalidad de definir la edad de la sucesión volcano-sedimentaria y su correlación con la sucesión sedimentaria fueron descritas 40 columnas estratigráficas. La sucesión estudiada presenta por lo menos siete unidades volcánicas y volcano-sedimentarias intercaladas, de las cuales cinco han sido fechados con anterioridad (García-Sánchez *et al.*, 2019;

Osorio-Ocampo *et al.*, 2019). En este trabajo se reportan tres nuevas fechas por el método de U/Pb en circones, que en conjunto con la fauna fósil ayudaron a establecer la edad de la base y cima de la sucesión volcano-sedimentaria en el área de estudio. El estudio a detalle de las relaciones estratigráficas de la sucesión volcano-sedimentaria y las edades fue clave para comprender la evolución del volcanismo durante el Plioceno superior-Pleistoceno inferior en la región y comprender si se trata de la misma Formación Infierno.

ANTECEDENTES

En la CSR y en la zona de las calderas La Reforma y El Aguajito se han realizado trabajos sobre volcanología, paleontología, estratigrafía y geotermia (Wilson 1948; Wilson y Veytia, 1949; Wilson y Rocha, 1955; Ortlieb y Colletta, 1984, Garduño-Monroy *et al.*, 1993, Holt *et al.*, 2000, Ochoa-Landin *et al.*, 2000, García-Sánchez *et al.*, 2019, Osorio-Ocampo *et al.*, 2019; Lira-Beltrán *et al.*, 2020; Ocampo-Díaz *et al.*, 2021). Los primeros trabajos estratigráficos y paleontológicos en la Formación Infierno se han enfocado en la porción central – sur de la CSR (Wilson, 1948; Wilson y Rocha, 1955). Sin embargo, existen reportes que en el borde sur de la caldera La Reforma y en el cañón El Álamo (Figura 1) la Formación Infierno se encuentra interestratificada con depósitos volcánicos (Wilson y Rocha, 1955, Ortlieb y Colletta, 1984, Garduño-Monroy *et al.*, 1993; Lira-Beltrán *et al.*, 2020). En el cañón El Álamo se observa claramente la relación estratigráfica entre los depósitos volcánicos de las calderas La Reforma y El Aguajito por debajo de estos depósitos se localizan capas de coquinas y areniscas probablemente del Plioceno (Garduño-Monroy *et al.*, 1993; García-Sánchez *et al.*, 2019; Osorio-Ocampo *et al.*, 2019).

En el área de estudio las rocas más antiguas se asocian al batolito peninsular de edad Cretácica, que ha sido fechado en 91.2 ± 2.1 Ma (Schmidt, 1975), enclave de granodiorita en 99.1 ± 0.8 Ma (Macías *et al.*, 2012), 97.8 ± 1.5 Ma (García-Sánchez *et al.*, 2019) y 95.1 ± 0.6 Ma (Ocampo-Díaz *et al.*, 2021). Los afloramientos graníticos se localizan en el centro de la caldera La Reforma (García-Sánchez *et al.*, 2019), en localidad de Las Minitas (Schmidt, 1975) y en tres pequeños afloramientos del arroyo El Yaqui (Wilson y Veytia, 1949, Wilson y Rocha, 1955, Schmidt, 1975, Ortlieb y Colletta, 1984, Ochoa-Landin *et al.*, 2000, Del Río Salas *et al.*, 2013; García-Sánchez *et al.*, 2019; Ocampo-Díaz *et al.*, 2021). Sobreyaciendo a las rocas graníticas, se encuentran rocas sedimentarias del Oligoceno-Mioceno inferior (33–23 Ma) pertenecientes a la Formación El Salto (Ocampo-Díaz *et al.*, 2021). Posteriormente aparecen depósitos volcánicos y volcanoclásticos del Mioceno, nombrados como Andesita Sierra Santa Lucía y pertenecientes al Grupo Comondú (Del Río Salas *et al.*, 2013; Avellán *et al.*, 2018). Las Andesitas de la Sierra Santa Lucía tienen más de 1,000 m de espesor y están constituidas por andesitas, basaltos andesíticos, tobas, brechas y areniscas tobáceas de composición principalmente andesítica, con una edad que oscila entre los 24–13 Ma (Sawlan y Smith, 1984, Ochoa-Landin *et al.*, 2000, Conly *et al.*, 2005). Recientemente se ha reportado una edad de 21.59 ± 0.29 Ma para lavas andesíticas en las inmediaciones del Complejo Volcánico de las Tres Vírgenes (Avellán *et al.*, 2018). En los alrededores del poblado de Santa Rosalía aflora una sucesión de rocas volcánicas relacionadas con la transición arco-*rift* que dio origen al Golfo de California. Estas rocas se pueden dividir en tres unidades (Conly *et al.*, 2005; Del Río Salas *et al.*, 2013): (1) rocas calcoalcalinas ricas en K que corresponden a la transición arco-*rift* entre los 12–10 Ma, (2) basaltos toleíticos (basaltos Boleo) relacionados con el *rift* y que fueron extruidos entre los 10–6 Ma y (3) lavas andesíticas ricas en K del Cerro San Lucas (9.5–7.7 Ma). Hacia el S y SO del complejo volcánico de las Tres Vírgenes afloran

basaltos toleíticos (basalto Esperanza), con una edad reportada de 7.64 ± 1.16 Ma (Macías et al., 2012; Avellán et al., 2018).

Sobreyaciendo las rocas volcánicas se encuentran cuatro formaciones sedimentarias del Mioceno superior-Pleistoceno inferior, que describimos en continuación: (1) Formación Boleo (Mioceno superior), corresponde a una gruesa sucesión de conglomerados, calizas fosilíferas, capas de yeso y en menor proporción areniscas fosilíferas, con espesores que varían de 50 a 250 m (Wilson y Veytia, 1949; Wilson y Rocha, 1955). Holt et al. (2000) obtuvieron una edad de 6.57–6.94 Ma por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ para una delgada intercalación de material volcánico conocido como “Cinta Colorada”. Estos autores sugieren una edad probable de 6.93–7.09 Ma para la base y de 6.14–6.27 Ma para la cima de la formación. (2) La Formación Tirabuzón (Plioceno), corresponde a una sucesión de arenisca y conglomerado con espesor promedio de 60 m (Wilson y Rocha, 1955; Carreño, 1981). Se encuentra sobreyacida discordantemente por arenisca fosilífera y conglomerado de la Formación Infierno. En el área de estudio afloran arenisca fosilífera y limolita, que pueden llegar a contener fósiles de dientes de tiburón, que indican una edad de Plioceno y un ambiente de depósito de plataforma interna (Lira-Beltrán et al., 2020). (3) Formación Infierno (Plioceno superior-Pleistoceno inferior), nombrada por Wilson (1948), para arenisca fosilífera y conglomerado con espesores promedio de 50 m expuesta en el arroyo El Infierno, que

sobreyacen discordantemente a la Formación Tirabuzón. La arenisca se acuña tierra adentro y gradan a una facies de conglomerado de origen no marino. En la CSR, los mejores afloramientos se localizan hacia la parte sur en los arroyos de Santa Águeda y Montado, donde las capas son mucho más gruesas (alcanzando hasta 140 m de espesor) que en el NO (espesores de 5 a 50 m). La Formación Infierno es más fosilífera que la Formación Tirabuzón (Wilson y Rocha, 1955) lo cual ayuda a distinguir ambas formaciones. Ortlieb y Colletta (1984) proponen una edad de Plioceno superior–Pleistoceno inferior para la formación, con base en correlaciones paleontológicas con las formaciones Marquer, Borrego y Palm Spring. (4) La Formación Santa Rosalía fue nombrada por Wilson (1948) para un conglomerado calcáreo con espesores ≤ 15 m. Por lo general, se encuentra coronando mesas y sobreyaciendo a la Formación Infierno, en afloramientos localizados en los arroyos El Infierno y El Yaqui sobreyace directamente a la Formación Tirabuzón (Wilson y Rocha 1955). La Formación Santa Rosalía exhibe características litoestratigráficas similares a los depósitos de terrazas marinas, por lo que Ortlieb (1981) y Ortlieb y Colletta (1984) sugirieron descartarla como formación. Finalmente, las rocas volcánicas más recientes están relacionadas con la actividad de las calderas La Reforma (García-Sánchez et al., 2019), El Aguajito (Osorio-Ocampo et al., 2019) y Las Tres Vírgenes (Pleistoceno-Reciente) (Avellán et al., 2018).

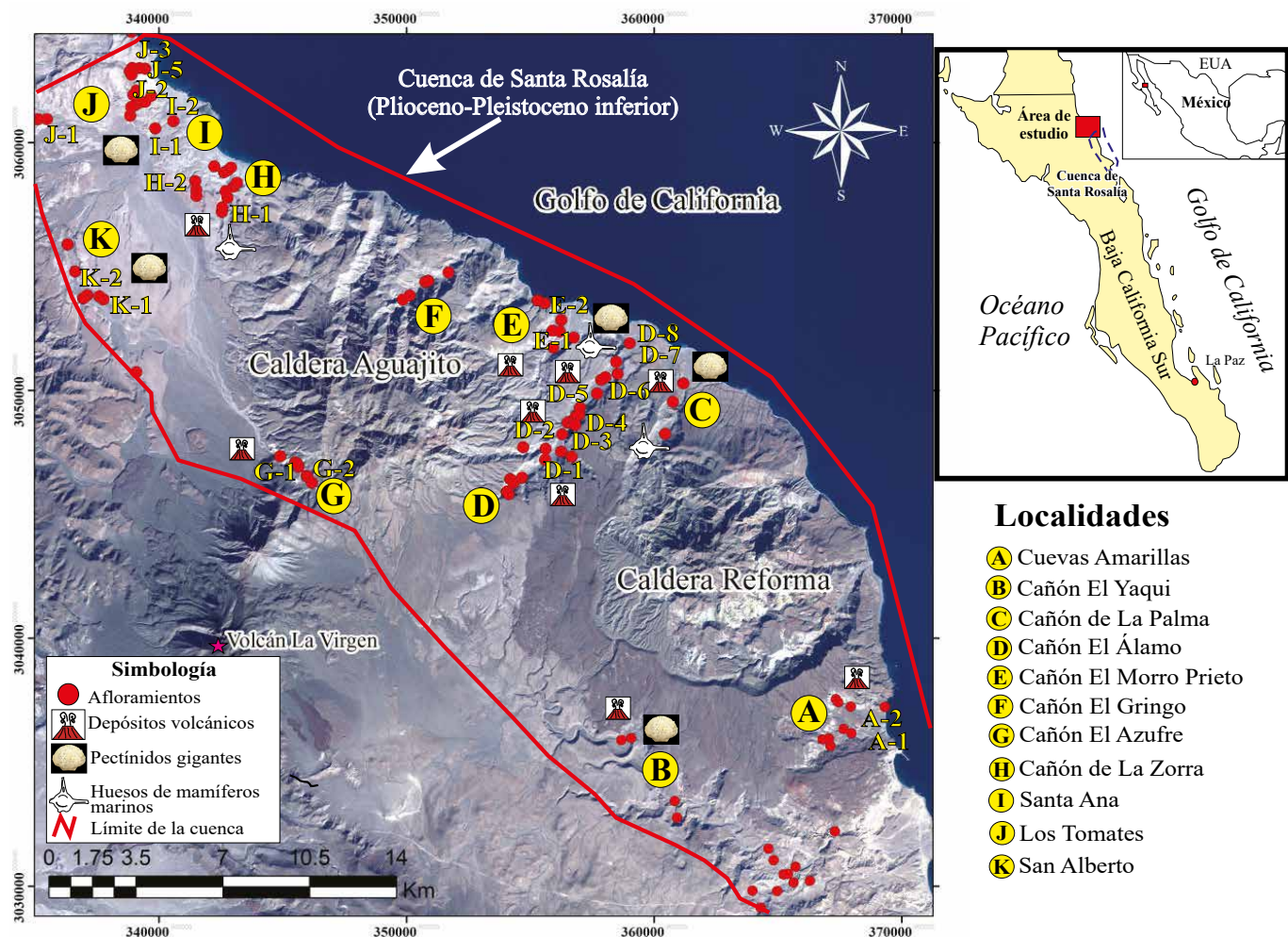


Figura 1. Mapa de localización del área de estudio. La zona comprende las calderas La Reforma y El Aguajito, al norte de Santa Rosalía. Se visitaron once localidades donde se levantaron columnas estratigráficas.

METODOLOGÍA

El trabajo de campo se realizó entre los años 2016-2018. Se visitaron principalmente los cañones que disectan las calderas La Reforma y El Aguajito donde se describieron afloramientos, se midieron y muestrearon 40 secciones en 11 localidades. En las localidades se identificaron nueve unidades litológicas informales (cinco volcánicas, dos sedimentarias y dos volcano-sedimentarias). Asimismo, se realizaron estudios paleontológicos e isotópicos para definir las unidades sedimentarias y volcánicas y su correlación estratigráfica con las formaciones que conforman la CSR. Para los análisis paleontológicos se colectó material fósil, el cual se limpió en el laboratorio de Análisis de Partículas y Separación de Minerales del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México Unidad Michoacán (IGUM-UNAM). La identificación taxonómica se hizo con base en revisión bibliográfica y por la comparación con ejemplares actuales y fósiles de la colección del Museo de Historia Natural de la Universidad Autónoma de Baja California Sur (MHN-UABCS).

Métodos analíticos

Con la finalidad de conocer las edades de los depósitos volcánicos se efectuaron análisis isotópicos en cristales de circonio en el Laboratorio de Estudios Isotópicos (LEI), UNAM, Centro de Geociencias. Se separaron circones de muestras de pómez de cuatro unidades con ayuda de una mesa *Wilfley*, un separador magnético *Frantz* y líquidos pesados. Con microscopio binocular, se seleccionaron 150 cristales de los concentrados minerales, pero solo se consideraron entre 30 y 35 circones de cada muestra debido a la falta de concordancia en las mediciones. Se montaron los cristales devastados y pulidos en resina, para descubrir una de sus caras. Después se inspeccionaron con cátodo-luminiscencia para detectar las zonas a analizar. Una vez montados en resina, los cristales fueron enjuagados con agua 18.2 MΩ en un baño ultrasónico. Posteriormente, la superficie de las muestras se limpió con HNO₃ ultra puro 1 mol L⁻¹ justo antes de ser introducidas a la celda de ablación para eliminar impurezas. Después de ser montados en resina, los circones seleccionados se colocaron en un porta muestras y se insertaron a la celda de ablación. El sistema de ablación laser utilizado corresponde a *Resonetics, Resolution M050 excimer laser* y se encuentra acoplado a un *Thermo iCapQc ICPMS* para la obtención de datos de concentración isotópica. Los puntos analizados tienen un diámetro de 23 μm y los protocolos de medición utilizados son los descritos por Solari *et al.* (2010).

ESTRATIGRAFÍA

En las 11 localidades se levantaron columnas estratigráficas que ayudaron a correlacionar las unidades litológicas en el área de estudio (Figuras 2 y 3). La sucesión volcano-sedimentaria tiene un espesor aproximado de 220 m y en general tiene en la base una arenisca fosilífera con capas enriquecidas en pectínidos y conglomerado fosilífero; en la sección media de la sucesión aparecen capas volcánicas (de carácter efusivo y explosivo) y hacia la cima depósitos de flujos piroclásticos y caídas de pómez intercalados con capas de conglomerado fosilífero y capas enriquecidas en moluscos. Esta serie de rocas se divide en nueve unidades informales, algunas de las unidades volcánicas fueron propuestas por García-Sánchez *et al.* (2019): ignimbrita Mesa de Enmedio, ignimbrita Cueva Amarilla, ignimbrita El Carrizo y lava Punta Candeleros. Por lo tanto, en este trabajo se utilizan los nombres anteriormente asignados exceptuando el de ignimbrita El Contrabando, el cual se propone cambiar por unidad volcano-sedimentaria El Contrabando.

A continuación, se realiza una descripción en orden cronológico de cada una de las unidades.

Unidad ignimbrita Mesa de Enmedio (Depósito de Pómez Gigante) (IgM)

La unidad ignimbrita Mesa de Enmedio corresponde a un depósito de bloque de pómez de composición riolítica que aflora en el cañón El Álamo (Figura 1, Localidad D y Figura 4). Es de color gris claro a beige y tiene 7 m de espesor promedio. El depósito está compuesto principalmente por bloques de pómez soportados en una matriz que varía de ceniza fina a media de color amarillo claro (Figura 4). Los fragmentos de pómez tienen un tamaño promedio de 6 cm (lapilli grueso a bloque fino); sin embargo, suelen encontrarse bloques que llegan a superar los 2 m de diámetro (Figura 4b). En la base del depósito pueden presentarse bloques disgregados y hacia la cima bloques de mayor dimensión (1–2 m) de formas subangulosas a subredondeadas con textura de coliflor. En la localidad D-6 (Figura 2, columna D-6 y Figura 4c-4e), se observó en la cima de la unidad la presencia de fósiles de invertebrados marinos. Ostras bien preservadas de la especie *Pycnodonte cf. erici*, (Figura 4d) se encontraron dentro de la matriz del flujo piroclástico y en algunos bloques de pómez (Figura 4c-4e). Sin embargo, pueden encontrarse pectínidos desarticulados y articulados en menor proporción (Figura 4e). En el contacto de IgM y la unidad arenisca fosilífera El Yaqui se pueden observar estructuras sedimentarias de deformación como huellas de carga (Figura 4a-4b). En la localidad D-7 (Figura 2, sección D-7), el tamaño de la pómez se reduce significativamente a lapilli fino a grueso, es de color gris claro y no se presentan bloques, en esta localidad la unidad presenta 1.7 m de espesor. Este depósito está enriquecido en pómez y líticos volcánicos, que se encuentran en una matriz de ceniza con fragmentos de organismos marinos (bivalvos retrabajados). Hacia la cima es posible encontrar capas interestratificadas enriquecidas en pómez y capas de ceniza fina con estratificación laminar.

Unidad arenisca fosilífera El Yaqui (ArY)

Esta unidad corresponde a una arenisca conglomerática fosilífera bioturbada, arenisca fosilífera, *packstone-wackestone* arenoso con fósiles de pectínidos principalmente que pueden aparecer en capas continuas y biorudita arenosa de pectínidos (Figura 5a-5e). Generalmente las rocas de la unidad presentan una matriz mixta que puede variar de carbonatada a siliciclástica y en menor proporción cementante carbonatado. Los afloramientos de la unidad se extienden a lo largo del área de estudio, sin embargo; los mejores afloramientos se localizan en la localidad cañón El Morro Prieto (Figura 2, columna E-2) y hacia el norte del área de estudio en las localidades de San Alberto (Figura 2, columna K-1), Santa Ana (Figura 2, columna I-2) y Los Tomates (Figura 3, columnas localidad Los Tomates). Las rocas son de color naranja claro a café claro y tienen un espesor promedio de 30 m. No obstante, en la localidad de Santa Ana (Figura 1, Loc. I-2), pueden presentar más de 70 m de espesor (Figura 2, columna I-2). La unidad se caracteriza por alternancias de capas de arenisca conglomerática con intensa bioturbación y *packstone-wackestone* arenoso (acumulaciones de bivalvos en una matriz micrítica-arenosa) a biorudita arenosa de pectínidos muy resistentes a la erosión de color naranja claro y por capas de arenisca fosilífera menos resistente a la erosión de color café a naranja claro (Figura 5b-5c). Las capas de arenisca conglomerática muestran bioturbación intensa, no se distingue estratificación. La roca está bien cementada, con granos en su mayoría de origen calcáreo (fragmentos de moluscos) y en menor proporción líticos de origen volcánico. En algunos afloramientos de las localidades cañón El Álamo, cañón El Morro Prieto, San Alberto, Santa Ana y Los Tomates se llegan a distinguir icnofósiles del género *Thalassinoides*, madrigueras verticales

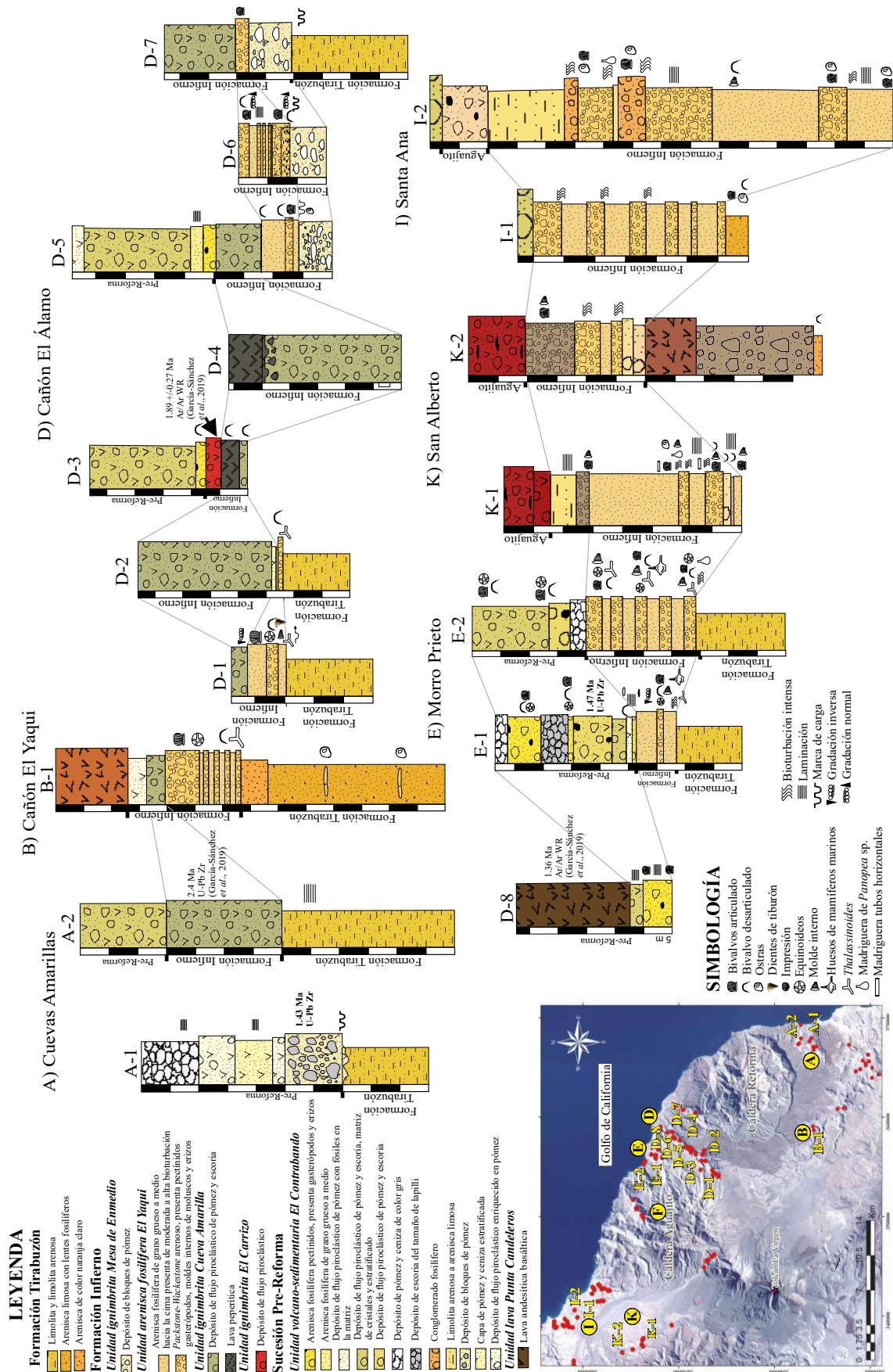


Figura 2. Columnas estratigráficas donde se muestra la correlación de algunas de las unidades litológicas descritas en las localidades de Cuevas Amarillas, cañón El Yaqui, cañón El Álamo, Morro Prieto, San Alberto y Santa Ana.

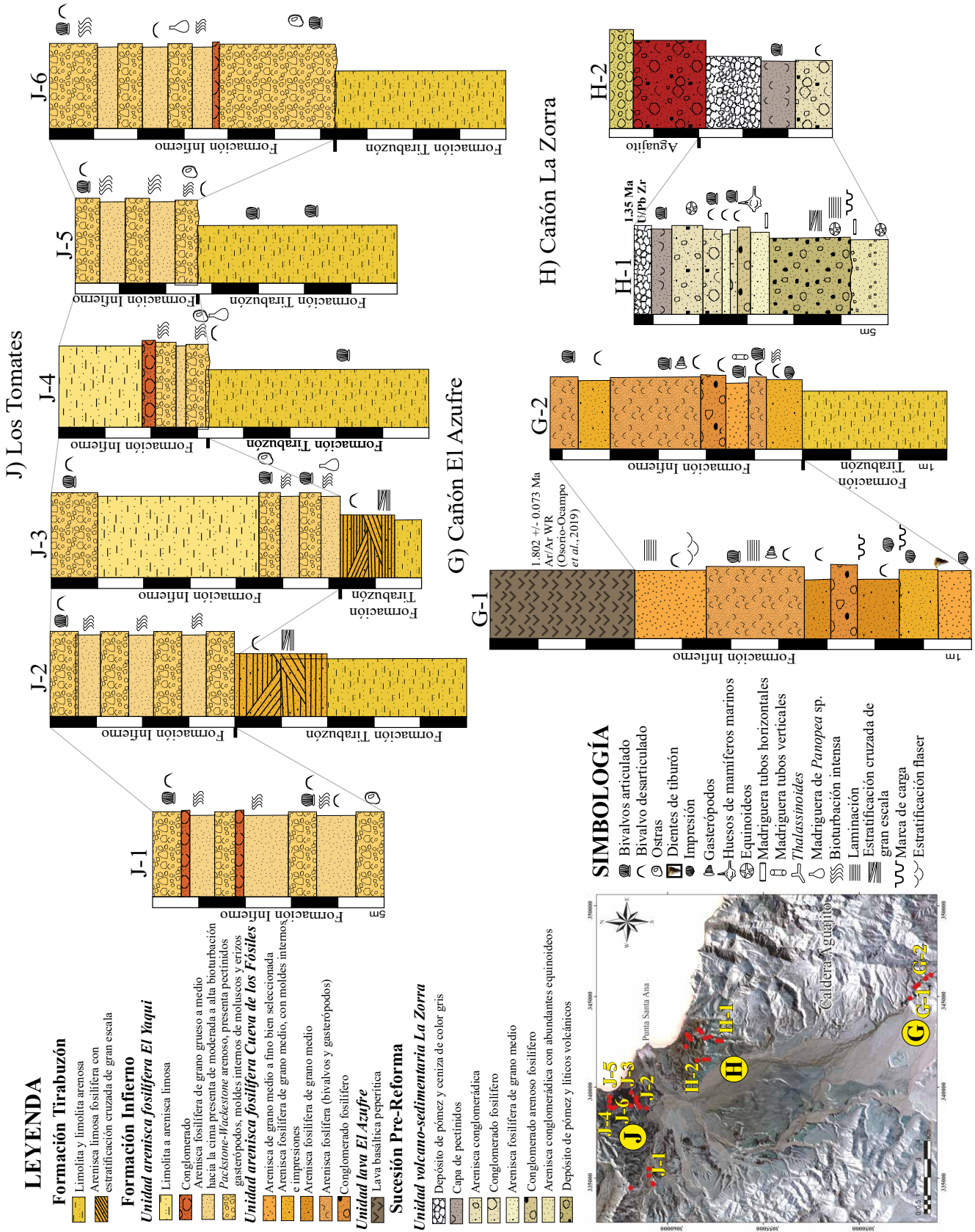


Figura 3. Localización y correlación de columnas estratigráficas de algunas de las unidades litológicas que afloran en lo porción norte del área de estudio: cañón El Azufre, cañón de La Zorra y Los Tomates.

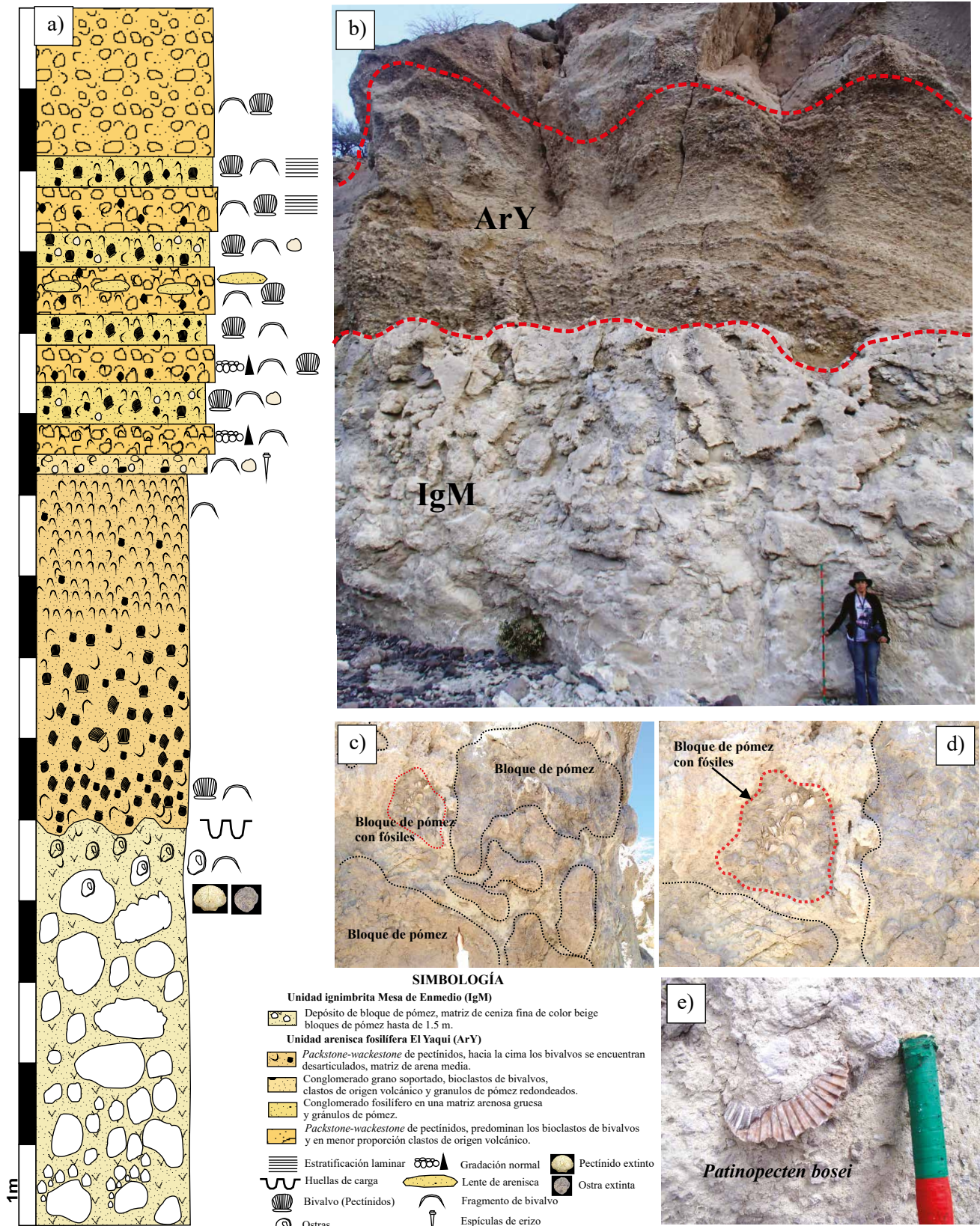


Figura 4. a) Columna estratigráfica detallada de la localidad D-6 en el cañon El Álamo. b) Contacto entre las unidades IgM y ArY. c) El depósito presenta gradación inversa, se pueden observar bloques de hasta 2 m hacia la cima. d) En algunos bloques de pómez se encontraron fósiles de ostras bien preservados. e) Fósil de *Patinopecten bosei* inmerso en la matriz de ceniza.

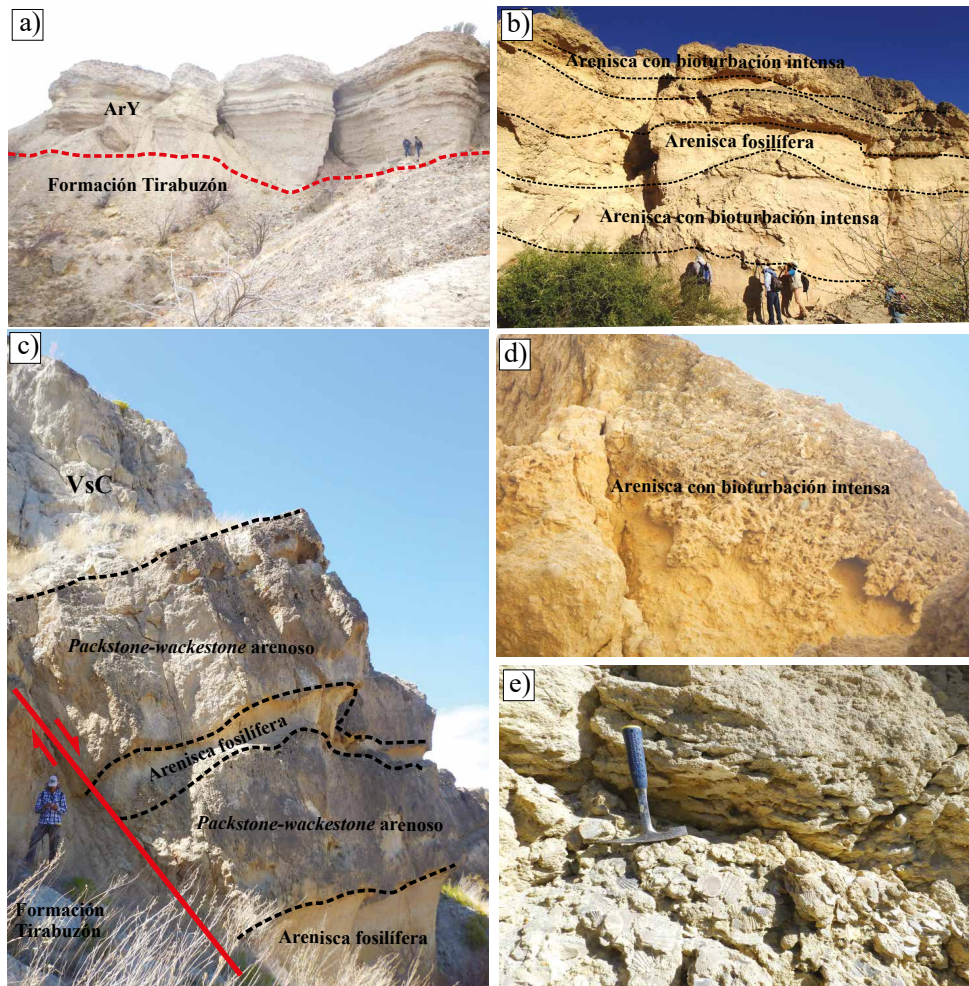


Figura 5. Afloramientos de la unidad arenisca fosilífera El Yaqui. a) Contacto de la unidad con la Formación Tirabuzón del Plioceno (Localidad Los Tomates). b) Localidad de Santa Ana, la unidad se observa como una alternancia de capas fosilíferas y capas con bioturbación intensa. c) Localidad cañón El Morro Prieto, alternancia de arenisca fosilífera y capas altamente fosilíferas. d-e) Localidades de San Alberto y cañón El Morro Prieto, capas con bioturbación intensa.

pertenecientes a bivalvos del género *Panopea* Menard, 1807 y algunas madrigueras cilíndricas horizontales y verticales con diámetros de 1 a 3 cm (Figura 5d-5e; Figura 6a-6b). Las madrigueras de *Panopea* sp. pueden alcanzar hasta 20 cm de longitud (Figura 6c-6e), en algunas se encontraron moldes en posición vital (Figura 5d-5e). En las localidades del cañón El Yaqui y cañón El Álamo es posible observar hasta cuatro capas de *packstone-wackestone* arenoso de pectínidos, las cuales son más resistentes a la erosión (Figura 5c). En general, estas rocas están compuestas por fósiles de bivalvos de la familia Pectinidae (Figura 7b), en algunas localidades como cañón de La Palma, San Alberto, Santa Ana y Los Tomates se recolectaron pectínidos gigantes de los géneros *Patinopecten* Dall, 1898; *Leopecten* Masuda, 1971; y *Nodipecten* Dall, 1898. En general los fósiles de bivalvos pueden encontrarse tanto articulados como desarticulados. En las localidades de cañón El Álamo, cañón de La Palma y cañón El Morro Prieto los fósiles de pectínidos presentan poco retrabajamiento, en algunos afloramientos se encuentran articulados. Esta unidad se caracteriza por ser altamente fosilífera, aparecen fósiles bien preservados de ostras, equinoideos del orden Clypeasteroidea, moldes internos de bivalvos y gasterópodos; y en menor proporción huesos de cetáceos (Figura 7d) y dientes de elasmobranchios. En general, los fósiles están bien preservados y se encuentran dispuestos en forma horizontal (Figura 7a-7b). En las

localidades cañón El Álamo, cañón El Azufre y Los Tomates, dentro del *packstone-wackestone* arenoso se hallaron dientes de tiburón y raya (Figura 7c). En la localidad Los Tomates J-1 (Figura 3, columna J-1), se encontró en la base de la unidad una capa de 1.5 m de espesor compuesta por ostras del género *Crassostrea* Sacco, 1897 (Figura 7e), en esta misma localidad y en Santa Ana es común encontrar capas en las que aparece como fósil predominante ostras del género *Undulostrea* Harry, 1985. En gran parte de los afloramientos aparece hacia la cima una capa de biorudita arenosa de pectínidos de 2 m de espesor promedio. La capa es muy resistente a la erosión, presenta poca matriz arenosa, está compuesta casi totalmente por fósiles de bivalvos (aproximadamente 70 %). En las localidades cañón El Yaqui, cañón El Álamo, cañón El Morro Prieto, Santa Ana y Los Tomates la unidad descansa discordantemente sobre la Formación Tirabuzón del Plioceno (Figura 5a). En la localidad El Yaqui las rocas exhiben un rumbo de 85° NE y una inclinación de 15° NO.

Unidad ignimbrítica Cueva Amarilla (IgCa)

La unidad corresponde a un depósito que puede variar de color verde claro a verde oscuro. En la base se encuentra enriquecido en pómez de composición riolítica y hacia la cima en escoria de composición andesítica. La unidad se extiende desde la localidad de

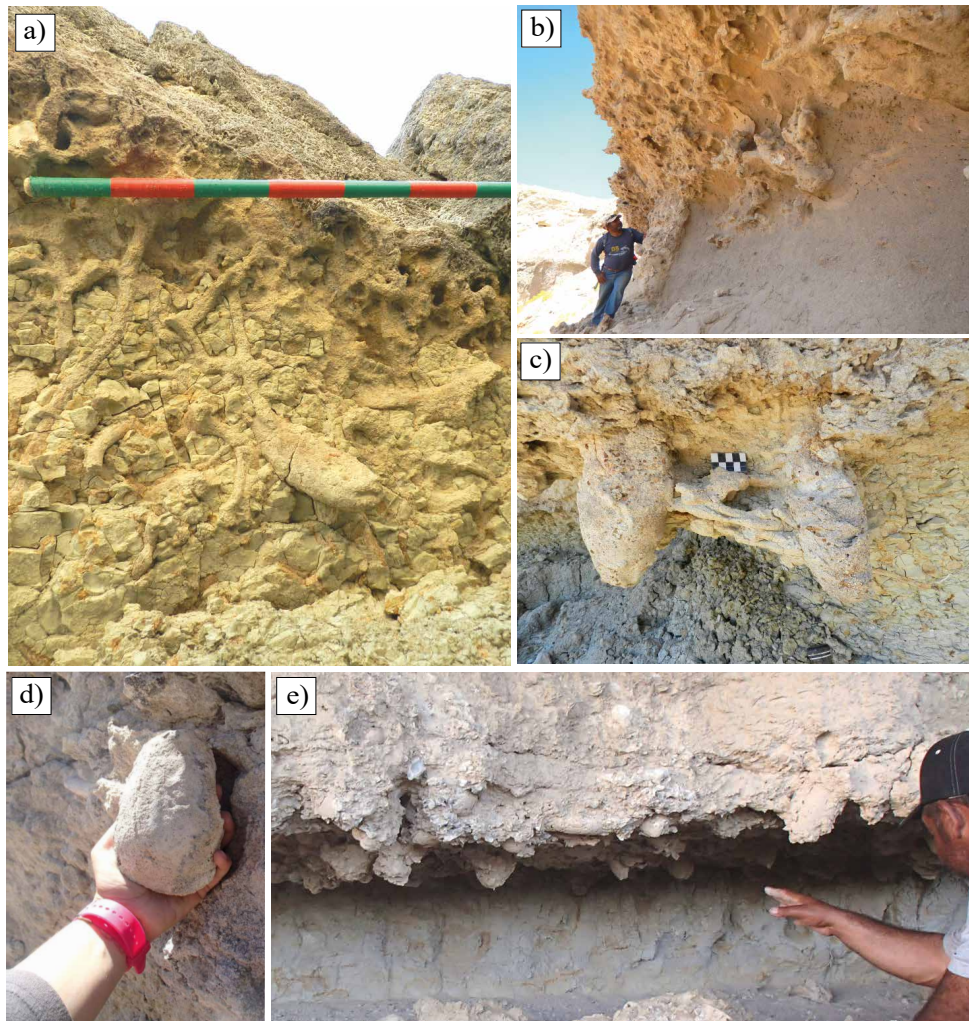


Figura 6. En algunas capas pertenecientes a la unidad ArY se pueden distinguir icnofósiles y madrigueras. a-b) Localidades cañón El Morro Prieto y Los Tomates, en la base de la unidad se distinguieron icnofósiles del género *Thalassinoides*. La escala que se presenta en la figura "a", corresponde a decímetros. c-e) capas con madrigueras y moldes internos en posición vital de bivalvos del género *Panopea* sp., en las localidades de cañón El Morro Prieto y Santa Ana.

Cuevas Amarillas en el borde sur de la caldera La Reforma hasta la localidad de cañón El Álamo. Los mejores afloramientos de la unidad se pueden observar en la localidad Cuevas Amarilla (Figura 8a) y a lo largo del cañón El Álamo donde expone espesores superiores a 25 m (Figura 2, columnas A-2, D-2 y D-4). En la localidad Cuevas Amarillas sobreyace discordantemente a una limolita de color amarillo de la Formación Tirabuzón (Figura 2, columnas A-2 y Figura 8a), la unidad presenta un espesor superior a 40 m y en la localidad cañón El Álamo descansa concordantemente sobre la unidad arenisca fosilífera El Yaqui (Figura 2, columnas estratigráficas Álamo). En la localidad cañón El Álamo la unidad está compuesta por tres subunidades (a) lava Amarilla, (b) ignimbrita Verde (c) lava peperítica Azul, las cuales se describen a continuación:

Subunidad lava Amarilla

Aflora únicamente en el cañón El Álamo (Figura 8b), exhibe un espesor aproximado de 15 m. Se caracteriza por un color gris oscuro en muestra fresca y color amarilla intemperizada. La lava es de composición andesítica, en muestra de mano se observaron cristales de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno. En la base se presentan estructuras de disyunción columnar y hacia la cima en forma de

bloques, también es posible observar estructuras hialoclásticas en bloques con corteza de pan que tienen fracturamiento radial (Figura 8b). Esta lava es sobreyacida por una capa de 60 cm de conglomerado arenoso, rico en bioclastos de bivalvos retrabajados.

Subunidad ignimbrita Verde

Tiene un espesor promedio de 25 m, aflora casi de manera continua a lo largo del cañón El Álamo (Figura 2, columnas estratigráficas Álamo). Este depósito se caracteriza en la base por estar enriquecido en pómez de composición riolítica y líticos volcánicos del tamaño del lapilli fino a bloque fino. Hacia la parte media del depósito se presenta un enriquecimiento en líticos volcánicos y pómez de color gris de tamaño de lapilli y finalmente hacia la cima se enriquece en escoria de color gris oscuro de tamaño de lapilli grueso a bloque fino, con texturas de coliflor (Figura 8c), de composición andesítica. Por lo general, la subunidad tiene estratificación laminar marcada y gradaciones inversas y normales. En la sección media y cima del depósito pueden aparecer algunas capas con fósiles de bivalvos dentro de la matriz de ceniza (Figura 8d). La ignimbrita verde puede estar sobreyacida por la subunidad peperita Azul, unidad ignimbrita El Carrizo o por la unidad volcano-sedimentaria El Contrabando (VsC).

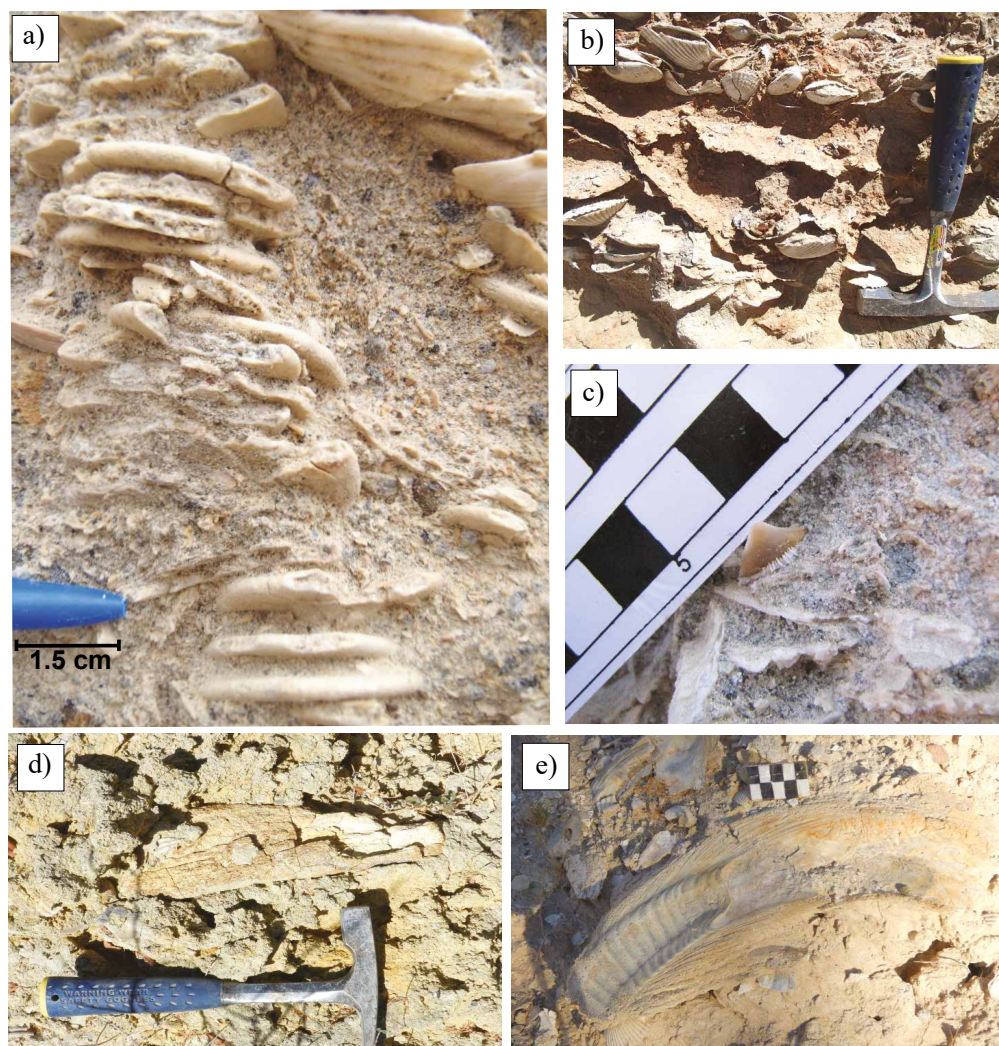


Figura 7. Fósiles encontrados en la unidad ArY. a-c), Localidad cañón El Álamo, equinoideos de la familia Clypeasteroidea (galletas de mar), bivalvos de la familia pectinidae y diente de tiburón del género *Carcharhinus* sp. d-e) Localidad Los Tomates, hueso de cetáceo y una ostra gigante del género *Crassostrea* sp.

Subunidad lava Peperítica Azul

Al igual que la subunidad lava Amarilla, solo aflora en el cañón El Álamo (Figuras 1, D-3 y D-4), corresponde a una lava de color oscuro azulado de composición riolítica de 20 m de espesor. En la localidad D-4 del cañón El Álamo, la subunidad se introduce dentro de la subunidad ignimbrita Verde (Figura 2, sección D-4 y Figura 8e). La lava se observa en bloques con textura hialoclastítica como fracturamiento poligonal-radial y corteza de pan (Figura 8e). A simple vista se pueden distinguir fenocristales de plagioclasa, en menor proporción anfíboles y piroxenos.

Unidad ignimbrita El Carrizo (IgCz)

Corresponde a una ignimbrita de color rojizo de composición riolítica, que solo aflora en la localidad cañón El Álamo. Muestra un espesor máximo de 6 m y sobreyace a la unidad ignimbrita Cueva Amarilla (Figura 2, columna D-3 y Figura 9a y 9c). En la base de la ignimbrita presenta color rosado, poco soldada; sin embargo, hacia la cima se observa soldada con *fiammes* de color rojizo oscuro. Se caracteriza por ser heterolitológica con pómez de color gris, líticos negros, grises, cristales de plagioclasa, piroxeno y anfíbol. En la localidad d-2 (Figura 1) entre la unidad ignimbrita Cueva Amarilla y la

ignimbrita El Carrizo, se aprecia una capa de material volcanoclástico de 1.6 m de espesor. Esta capa está conformada por fragmentos líticos volcánicos y bioclastos (principalmente fragmentos de bivalvos), la capa presenta estratificación paralela marcada (Figura 9b).

Unidad arenisca fosilífera Cueva de Los Fósiles (ArCf)

La unidad se caracteriza por una alternancia de capas de arenisca fosilífera con presencia de moldes internos e impresiones de moluscos y conglomerado fosilífero de color rosa a rojizo violeta (Figura 10a), que aflora de manera discontinua a lo largo del cañón El Azufre (Figura 1, localidad G y Figura 3 columnas cañón El Azufre). En conjunto la unidad tiene 7 m de espesor máximo. La arenisca fosilífera es de grano medio a grueso de origen bioclastico y en menor proporción líticos de origen volcánico y cristales de plagioclasa en una matriz carbonatada. Muestra una estratificación laminar marcada a difusa, en algunos horizontes se llegan a distinguir icnofósiles del género *Thalassinoides* con diámetros de 3–4 cm y algunas madrigueras cilíndricas horizontales y verticales con diámetros de 2–3 cm, además moldes internos de bivalvos del género *Panopea* (Figura 10e). Presenta fragmentos de bivalvos y en menor proporción pectínidos articulados. El conglomerado fosilífero está compuesto principalmente por bivalvos de la familia Pectinidae

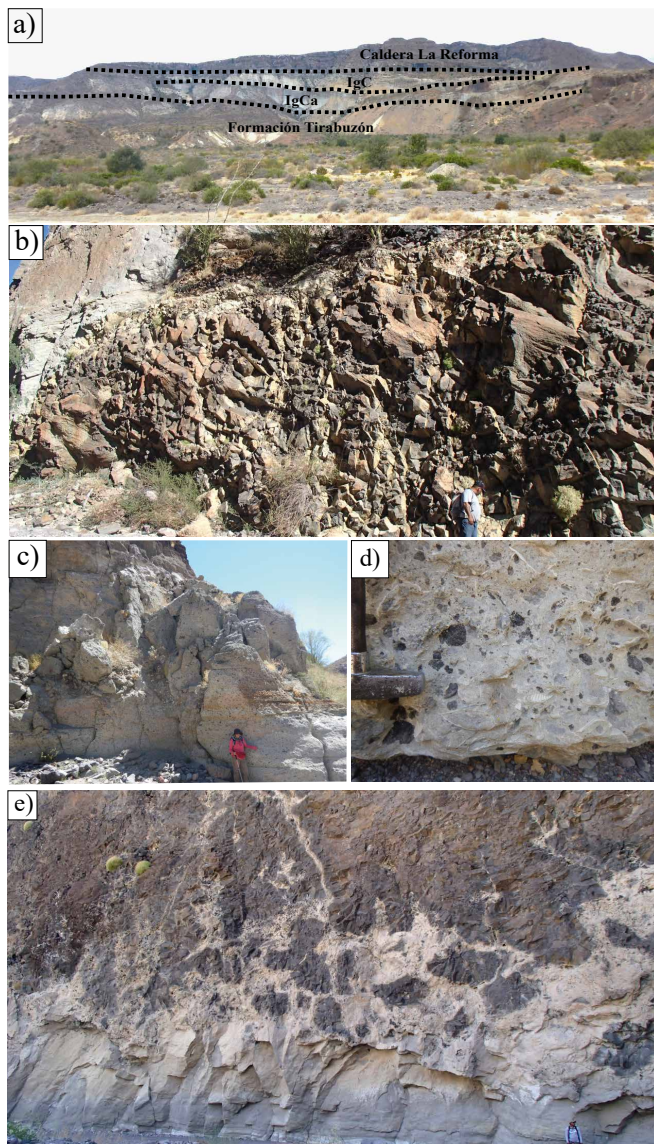


Figura 8. Unidad ignimbrita Cueva Amarilla. a) Localidad Cuevas Amarillas, donde la unidad IgCa sobreyace a la Formación Tirabuzón del Plioceno. b) Subunidad lava Amarilla, la roca presenta textura hialoclástica. c) Subunidad ignimbrita Verde. d) En la unidad se pueden presentar capas donde aparecen fragmentos de bivalvos en una matriz de ceniza. e) Subunidad lava peperítica Azul.

los cuales se pueden encontrar articulados (Figura 10b), pero también aparecen en menor proporción gasterópodos bien preservados de los géneros *Cerithium* Bruguière, 1789; *Turritella* Lamarck, 1799; *Oliva* Bruguière, 1789; *Natica* Scopoli, 1777; *Strombus* Linnaeus, 1758; y *Conus* Linnaeus, 1758. También se encontraron dientes de tiburón del género *Carcharhinus* sp. (Figura 3, columna D-1 y Figura 10d). El conglomerado también puede contener fragmentos de bivalvos y clastos de origen volcánicos subredondeados del tamaño de gránulos a guijas, en una matriz arenosa gruesa. En la localidad G-I, es sobreyacida por la unidad lava El Azufre y en la localidad G-2 sobreyace a la Formación Tirabuzón (Figura 3, columnas cañón El Azufre).

Unidad lava El Azufre (LaAz)

Corresponde a un depósito de lava de color gris oscuro de composición basáltica que aflora discontinuamente en el cañón El

Azufre (Figura 3, sección G-1). Tiene 6 m de espesor promedio. Puede presentarse con estructura columnar y en bloques (Figura 10f), en algunos puntos del cañón puede observarse con estructura peperítica en el contacto con la unidad arenisca fosilífera Cueva de Los Fósiles (Figura 10g-10h).

Unidad volcano- sedimentaria El Contrabando (VsC)

La unidad corresponde a depósitos ricos de pómez en una matriz de cristales de plagioclasa, capas de pómez, líticos y escoria, ceniza laminada y capas de arenisca y conglomerado fosilífero de color amarillo claro a gris claro que aflora desde la localidad de Cuevas Amarillas hasta el cañón El Gringo (Figura 1). Los mejores afloramientos se pueden encontrar en las localidades Cuevas Amarillas, cañón El Álamo y cañón El Morro Prieto. En las localidades de Cuevas Amarillas y cañón El Álamo sobreyace discordantemente a la unidad ignimbrita Cueva Amarilla, donde presenta un espesor aproximado de 20 m (Figura 2, columna D-6 y Figura 11a). En la localidad cañón El Morro Prieto sobreyace discordante a la unidad arenisca fosilífera El Yaqui, con un espesor de 25 m (Figura 2, columnas Morro Prieto). La unidad presenta en la base una capa de pectínidos (biorudita arenosa), conglomerado fosilífero y arenisca fosilífera de color amarillo (Figura 11b), esto se puede observar en las columnas D-3, D-5 y E-1 (Figura 2, Localidades cañón El Álamo y El Morro Prieto). La capa compuesta de pectínidos tiene un espesor de 1.2 m, está conformado por fósiles de bivalvos de la familia Pectinidae, los cuales se pueden encontrar articulados y desarticulados, fragmentos de bivalvos y líticos de origen volcánico en una matriz de arena gruesa de color amarillo claro. En general, los fósiles de pectínidos son de menor tamaño que los observados en la unidad arenisca fosilífera El Yaqui. La capa de conglomerado fosilífero esta soportado por matriz de arena gruesa de color amarillo claro a naranja, con clastos subangulosos a subredondeados de tamaño de grava a bloque de origen volcánico. Contiene abundantes fragmentos de bivalvos desarticulados, además espículas de erizos. La arenisca de color amarillo claro es de grano medio a grueso con estratificación paralela marcada. Sobreyaciendo a las capas sedimentarias se encuentra un depósito enriquecido en pómez y cristales de plagioclasa de color amarillo. En la localidad cañón El Morro Prieto se pueden distinguir dos depósitos enriquecidos en pómez y escoria, que se encuentran separados por un conglomerado fosilífero y capas ricas en fósiles marinos como pectínidos y equinoideos. En la localidad de Cuevas Amarillas aflora un depósito de bloques de pómez de composición riolítica, el cual por las relaciones estratigráficas corresponde con la unidad VsC. Los depósitos pertenecientes a esta unidad fueron agrupados en tres subunidades que se describen a continuación:

Subunidad ignimbrita Amarilla (IgC)

En la base se distingue un depósito de pómez y líticos volcánicos en una matriz rica en cristales tabulares de plagioclasa y ceniza, con estratificación paralela marcada a difusa y gradación inversa. La pómez es de composición riolítica. Hacia la sección media se enriquece de líticos volcánicos, pómez y escoria del tamaño de lapilli fino a grueso en una matriz rica en cristales de plagioclasa (Figura 11c-11d). Hacia la cima, presenta líticos volcánicos y escoria del tamaño de lapilli a bloque fino, en una matriz de ceniza y cristales, se observa masivo, sin estratificación aparente. La pómez y escoria muestran texturas de coliflor.

Subunidad ignimbrita Morro Prieto (IgMP)

Se caracteriza por contener en la base una capa de pómez y escoria de tamaño de lapilli bien seleccionada. La pómez es de composición riolítica. Más arriba se puede presentar un depósito de pómez y escoria del tamaño de lapilli grueso a bloque fino contextura de coliflor inmerso

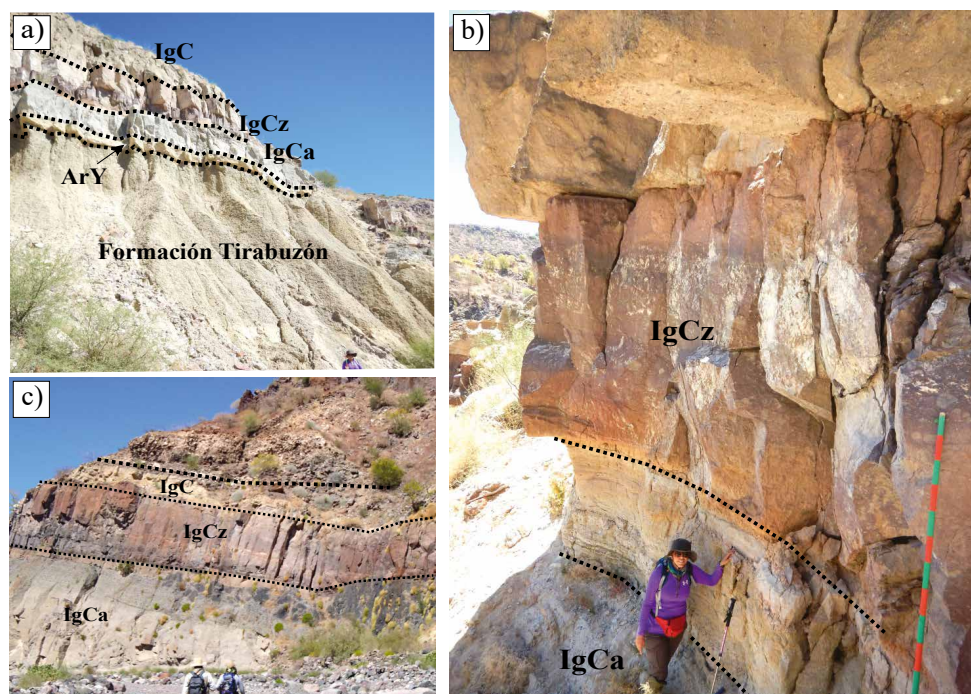


Figura 9. Unidad ignimbrita El Carrizo en la localidad cañón El Álamo. a) Relaciones estratigráficas entre la Formación Tirabuzón y las unidades ArY, IgC, IgCz y VsC (subunidad IgC). b) Entre las unidades IgCa e IgCz puede aparecer una capa de material volcanoclástico. c) La unidad puede sobreyacer a las subunidades ignimbrita Verde y lava peperítica Azul.

en una matriz de ceniza de color gris. Dentro de la matriz se pueden encontrar fósiles de bivalvos y equinoideos (Figure 11e).

Subunidad ignimbrita La Cueva (PgC)

Es un depósito enriquecido en bloques de pómez interestratificado con capas de ceniza y capas de pómez de color amarillo claro a beige. La unidad aflora sobre la línea de costa actual de la localidad Cuevas Amarillas y puede presentar un espesor de 35 m. La unidad sobreyace discordantemente a una limolita amarilla de la Formación Tirabuzón (Figura 11f). Esta unidad consiste en la base de un depósito de pómez con tamaño de lapilli grueso a bloque en una matriz de ceniza de color gris claro. Los bloques por lo general son subangulosos en una matriz de ceniza de color gris claro con textura de coliflor. Algunos bloques pueden alcanzar un diámetro superior a 2 m (Figura 11f-11g). Hacia la cima se presentan capas laminadas de ceniza y capas enriquecidas en pómez tamaño lapilli.

Unidad lava Punta Candeleros (Lpc)

Corresponde a una lava de composición andesítica-dacítica de color gris oscuro con textura afanítica y con algunos fenocristales de plagioclasa y piroxeno. Presenta un espesor aproximado de 40 m y solo aflora en la localidad cañón El Álamo, donde sobreyace de forma erosiva a la unidad volcano-sedimentaria El Contrabando. Los afloramientos de la unidad se restringen a la margen derecha del cañón, localizados aproximadamente a 1 km de distancia de la línea de costa actual. En la base de la unidad se tiene una estructura brechada escoriácea y hacia la cima exhibe disyunción columnar marcada.

Unidad volcano-sedimentaria La Zorra (VsZ)

Corresponde a una sucesión de arenisca fosilífera, conglomerado fosilífero, depósitos de flujo piroclástico removilizado enriquecidos en pómez, capas ricas en pectínidos y capas de pómez, que en total poseen 30 m de espesor (Figura 3, columnas La Zorra). La base de la unidad

está conformada por arenisca gruesa fosilífera que puede variar a conglomerado fosilífero, con estratificación paralela y cruzada marcada. Esta capa presenta fósiles muy bien preservados de equinoideos pertenecientes a la familia Clypeasteroidea, además madrigueras en forma de tubos horizontales y verticales de 2–3 cm de diámetro. El conglomerado contiene fragmentos de pómez re trabajada del tamaño de lapilli fino a medio. Sobreyaciendo a la arenisca y conglomerado se encuentra una capa clastosoportada de pómez y fragmentos líticos del tamaño de lapilli a bloque fino con estratificación paralela marcada que puede tener 8 m de espesor (Figura 12a). Los fragmentos de pómez son de color gris claro, vesiculados y fibrosos, con forma subredondeada. En la base de la capa se pueden encontrar fósiles de equinoideos. Le sobreyace una capa de arenisca conglomerádica fosilífera, donde aparecen huesos de cetáceos (Figura 12b). Continúa en la sucesión una capa de conglomerado polimigítico soportado por clastos. Los clastos son de origen volcánico (fragmentos de pómez, andesita y basalto) de tamaño de gravas y cantos con formas subredondeada a subangulosa, además se pueden encontrar fragmentos de bivalvos y equinoideos (Figura 12c-12d). Posteriormente una capa de fósiles de bivalvos articulas y desarticulados (pectínidos en su mayoría) en una matriz arenosa gravosa. Coronando la sucesión aparece una capa de pómez de color gris claro de tamaño de lapilli grano soportado de 4 m de espesor. Los afloramientos de la unidad se restringen a la localidad del cañón de La Zorra, en el extremo norte de la caldera El Aguajito.

RELACIONES ESTRATIGRÁFICAS

La localidad idónea para observar las relaciones estratigráficas de una gran parte de las unidades descritas en el presente trabajo es el cañón El Álamo (Figura 13). Entre las unidades ignimbrita Mesa de Enmedio, arenisca fosilífera El Yaqui e ignimbrita Cueva Amarilla (subunidades ignimbrita Verde y lava peperítica Azul), se

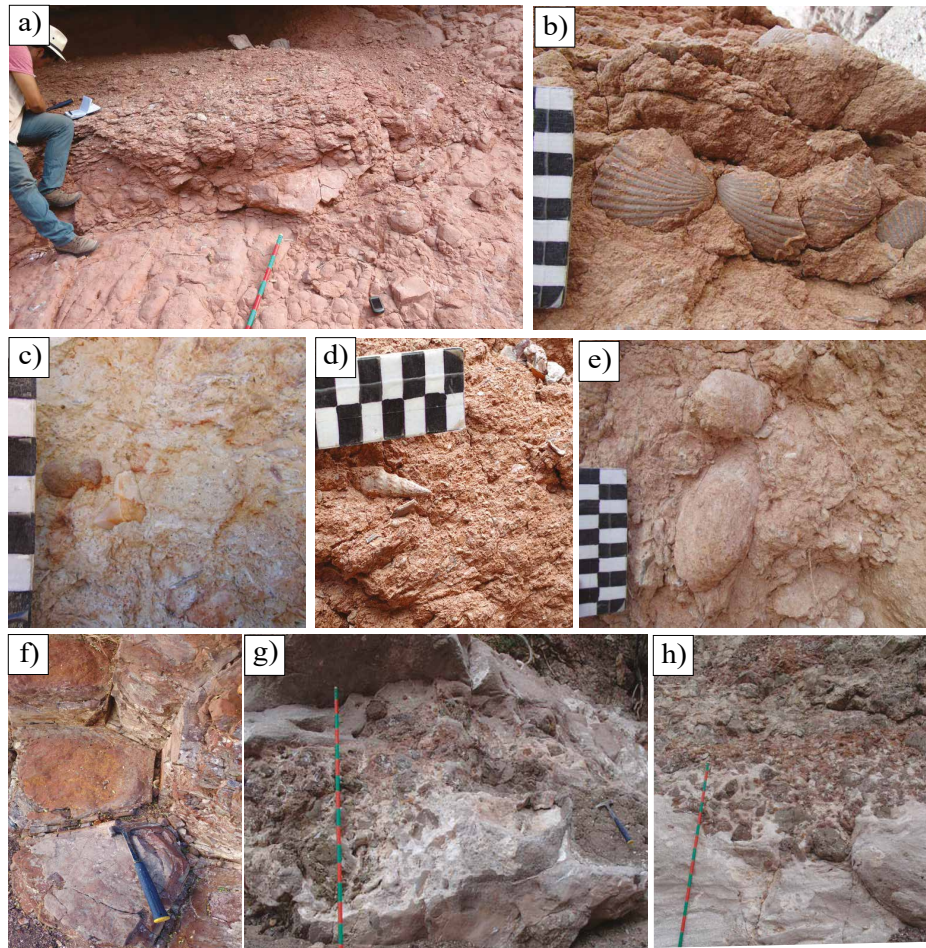


Figura 10. Unidad arenisca fosilífera Cueva de Los Fósiles. a) La unidad se compone de arenisca fosilífera y conglomerado fosilífero. b-e) en las capas se pueden encontrar bivalvos de la familia Pectinidae, dientes de tiburón, gasterópodos y moldes internos de bivalvos del género *Panopea* sp. f) Unidad lava El Azufre, en la localidad G-1 se observa con disyunción columnar. g-h) en el contacto con la unidad con la unidad arenisca fosilífera Cueva de Los Fósiles se puede observar peperítica (bloques de lava en una matriz carbonatada de color rojizo).

pueden observar en el contacto respectivo estructuras sedimentarias de deformación como huellas de carga, estructura en flama y diques clásticos o inyecciones clásticas de gran escala. Las estructuras sedimentarias de deformación son reconocidas como rasgos diagnósticos de importancia en la determinación de los ambientes de depósito (Mills, 1983). La deformación en sedimentos suaves se considera contemporánea al depósito y ocurre generalmente en sedimentos limosos y arenosos de grano fino. Esta deformación puede ocurrir en ambientes subaéreos y subacuáticos, donde estén presentes sedimentos saturados (Mills, 1983). Además, este tipo de estructuras brindan información sobre la deformación temprana de rocas sedimentarias en ambientes tectónicamente activos como sistemas *strike-slip*, cuencas de tipo *Pull Apart* y cuencas sedimentarias afectadas por fallamiento (Snyder y Waldron, 2016). En el contacto entre las unidades IgM y ArY se pueden observar huellas de carga (Figura 13c). Este tipo de estructuras se forman por contraste de densidades y por una carga desigual, donde el material arenoso se hunde en el material menos denso saturado, en este caso la ignimbrita (Snyder y Waldron, 2016). La mayoría de las estructuras de carga descritas se desarrollan en niveles de arena media sobre limo arenoso o arena muy fina. No obstante, en este caso se desarrollaron en material grueso, conformado en la base por un depósito de pómez del tamaño de bloques y en la cima por capas de acumulaciones de bivalvos. Las

huellas de carga son de gran escala pueden presentar arriba de 1 m de ancho. En los afloramientos del cañón El Álamo en el contacto entre las unidades arenisca fosilífera El Yaqui e ignimbrita Cueva Amarilla, se observaron también estructuras como diques clásticos y de flama (Figura 13b), de igual forma desarrolladas en material de grano grueso. Las estructuras de flama pueden alcanzar hasta un metro de ancho; mientras que los diques clásticos o inyecciones clásticas pueden tener 2 m de ancho y extenderse varios metros. La formación de diques clásticos y estructuras de flama puede tener varios tipos de orígenes, entre los que se encuentra la sismicidad (Zeng-Zhao, 2017). Otro tipo de estructuras relacionadas con el volcanismo son la peperitas las cuales se pueden observar en algunas de las unidades conformadas por derrames de lava. En el cañón El Álamo se aprecia muy bien este tipo de estructura entre las subunidades ignimbrita Verde y lava peperítica Azul (Figura 13a). Las peperitas se generan por la mezcla de magma, lava o depósitos piroclásticos (temperatura elevada) con material sedimentario húmedo no consolidado o pobremente consolidado (Busby-Spera y White, 1987; Donaire et al., 1998; Skilling et al., 2002), se pueden presentar texturas clásticas en la que ambos componentes pueden formar parte de la matriz (McPhie, 1993). Las peperitas son clara evidencia de la coetaneidad entre los procesos sedimentarios y los procesos volcánicos, además se relacionan con el volcanismo hidromagmático (Busby-Spera y White, 1987). Todos estos tipos de

estructuras observadas en el cañón El Álamo son evidencia de una probable depositación coetánea o muy próxima temporalmente, entre las tres unidades, en un medio subacuoso donde el material todavía no se encontraba litificado. Debido a la escala y tamaño de grano de las estructuras, su formación muy probablemente está relacionada con la actividad volcánica y sísmica de la región durante ese lapso de tiempo.

CONTENIDO FÓSIL

Para interpretar la cronoestratigrafía y paleoambientes de la ignimbrita Mesa de Enmedio y arenisca fosilífera El Yaqui de la Formación Infierno, en este capítulo se menciona la principal fauna fósil encontrada.

En algunos afloramientos de las unidades ArY y VsC, ubicados en las localidades cañón El Álamo y cañón de La Palma, los fósiles más abundantes corresponden a moluscos bivalvos de la familia Pectinidae (aproximadamente el 70 % del contenido fósil). Sin embargo, también se pueden encontrar ostras, gasterópodos, equinoideos, huesos de cetáceos y en menor proporción dientes de tiburones y rayas.

Unidad ignimbrita Mesa de Enmedio

En las localidades D-5 y D-6 en el cañón El Álamo (Figura 1) se colectaron fósiles de ostras y pectínidos en la cima de la unidad ignimbrita Mesa de Enmedio. En la localidad D-5 se recolectaron pectínidos de las especies *Patinopecten bosei* y *Nodipecten subnudosus* dentro de la matriz de ceniza del depósito (Figura 4e) y en la localidad D-6 los fósiles fueron en su mayoría ostras de la especie *Pycnodonte cf. erici* dentro de bloques de pómez (Figura 4d). A continuación, se hace una breve descripción del material fósil colectado.

Pectinida Gray, 1854

Pectinidae Wilkes, 1810

Patinopecten Dall, 1898

Patinopecten Bosei Hanna y Hertlein, 1927

Ejemplar referido. MHN-UABCS/SR/PB (Figura 14a), una valva asignada a la especie *Patinopecten bosei*.

Localidad y edad. Cañón El Álamo, calderas El Aguajito y La Reforma,

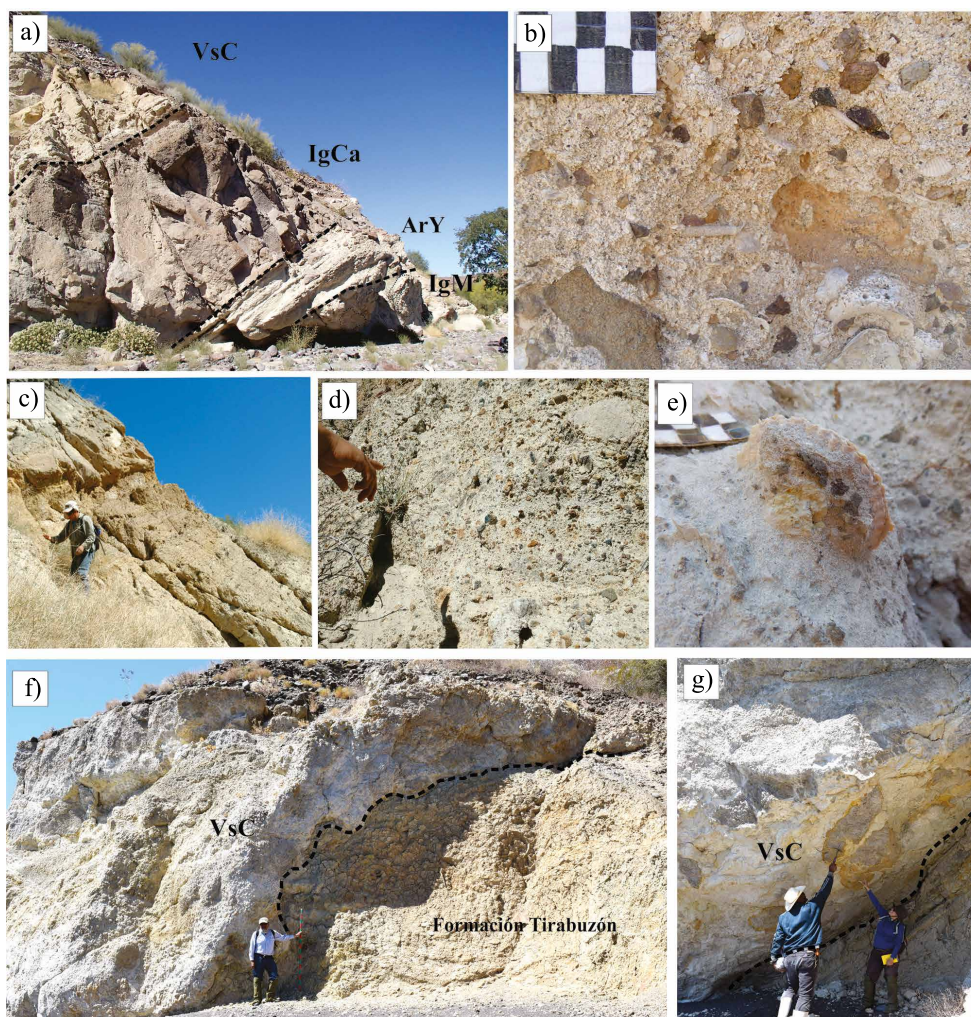


Figura 11. Unidad volcano-sedimentaria El Contrabando. a) Localidad cañón El Álamo, la unidad sobryace a la unidad IgCa. b) Conglomerado fosilífero. c-d) El depósito se observa de color amarillo con laminación marcada y pueden encontrarse capas enriquecidas con líticos volcánicos (Loc. cañón El Álamo). e) Bivalvo de la familia Pectinidae dentro de la matriz de ceniza (Loc. cañón El Morro Prieto). f) Subunidad ignimbrita La Cueva, contacto discordante erosivo con la Formación Tirabuzón en la localidad Cuevas Amarillas. g) Los bloques de pómez pueden superar los 2 m de diámetro.

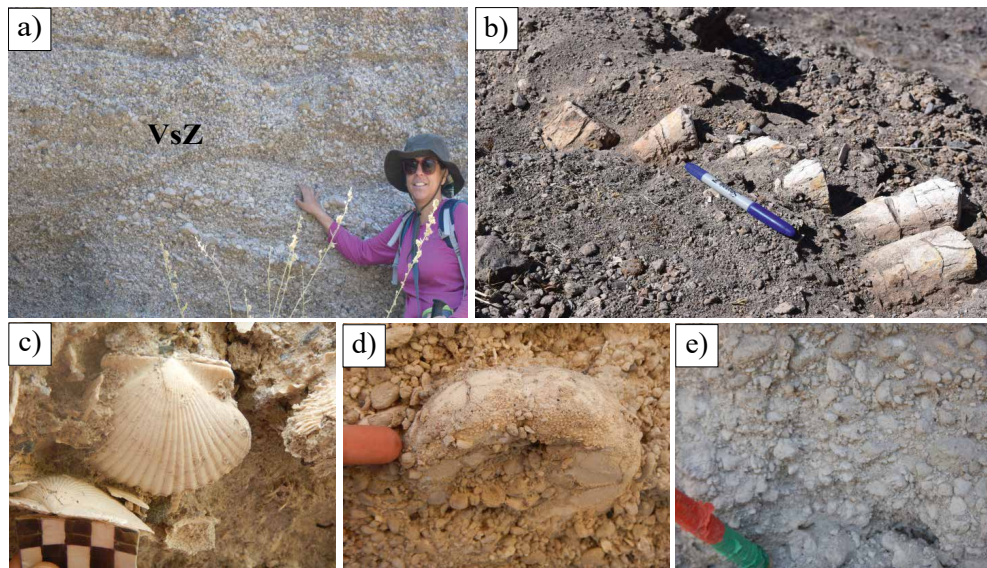


Figura 12. Unidad volcano-sedimentaria La Zorra. a) Capa de pómez y líticas estratificada. b) Capa de arenisca fosilífera con fósiles de cetáceo (costillas). c) Bivalvo fósil de la familia Pectinidae. d) Fósil de erizo en una capa de pómez. e) Depósito rico en pómez.

BCS, México. Unidad ignimbrita Mesa de Enmedio, Formación Infierno (Plioceno superior).

Descripción. MHN-UABCS/SR/PB corresponde a una valva izquierda delgada de 8.2 cm de largo con forma de abanico ligeramente convexa, con 24 costillas radiales.

Observaciones. Especie extinta que ha sido reportada en estratos asignados al Plioceno en la Formación Tirabuzón e Infierno en la zona sur de la cuenca de Santa Rosalía (Quiroz y Perrilliat, 1989).

Pectinida Gray, 1854
Pectinidae Wilkes, 1810
Nodipecten Dall, 1898
Nodipecten subnodosus Sowerby, 1836

Ejemplar referido. MHN-UABCS/SR/NS (Figura 14b), un bivalvo articulado asignado a la especie *Nodipecten subnodosus*.

Localidad y edad. Cañón El Álamo, calderas El Aguajito y La Reforma, BCS, México. Unidad ignimbrita Mesa de Enmedio, Formación Infierno (Pleistoceno inferior).

Descripción. MHN-UABCS/SR/NS corresponde a un bivalvo articulado con forma de abanico de 6.6 cm de largo. La valva izquierda presenta 10 costillas radiales gruesas, de las cuales cuatro presentan nódulos, que tienden a disminuir de tamaño hacia la charnela. La valva derecha presenta 11 costillas radiales. La orilla de las valvas es ondulada.

Observaciones. Este bivalvo puede habitar desde zonas intermareales hasta profundidades de 110 m, llegándose a encontrar en lagunas costeras con fondos fangosos-arenosos (Moore, 1984). Especie reportada en estratos asignados al Plioceno en las formaciones Tirabuzón e Infierno en la zona sur de la cuenca de Santa Rosalía (Quiroz y Perrilliat, 1989).

Ostreida Férussac, 1822
Gryphaeidae Vialov, 1936
Pycnodonte Fischer von Waldheim, 1835
Pycnodonte cf. erici Hertlein, 1929

Ejemplares referidos. MHN-UABCS/SR/OE (Figura 14c) y MHN-UABCS/SR/OE1 (Figura 14d). Dos valvas asignadas a la especie *Pycnodonte cf. erici*.

Localidad y edad. Cañón El Álamo, calderas El Aguajito y La Reforma, BCS, México. Unidad ignimbrita Mesa de Enmedio Formación Infierno (Pleistoceno inferior, Gelasense).

Descripción. MHN-UABCS/SR/OE (Figura 14c) corresponde a una valva de 3.9 cm de alto. MHN-UABCS/SR/OE1 (Figura 14d) corresponde a una valva de 5.6 cm de alto.

Observaciones. Especie extinta reportada en depósitos sedimentarios marinos del Plioceno en Baja California (Durham, 1950; Wilson y Rocha, 1955), sin embargo, su rango estratigráfico se restringe entre los 2.588 – 1.806 Ma (Hendy, 2020).

Unidad arenisca fosilífera El Yaqui

En las localidades de La Palma, Los Tomates y San Alberto (Figura 1), se hallaron afloramientos asociados a la unidad ArY, éstos se distinguen por la presencia de bivalvos gigantes de la familia Pectinidae que pueden tener más de 15 cm de alto. En la columna K-2 de la localidad de San Alberto (Figura 2, columna K-2), se colectaron fósiles de la especie extinta *Leopecten bakeri*, mientras que en las localidades de La Palma y Los Tomates se colectó *Leopecten bakeri diazi*. Además, se recolectaron fósiles del género *Crassostrea* sp. en la localidad de Los Tomates (Figura 4, columna J-1). A continuación, se hace una breve descripción del material fósil.

Pectinida Gray, 1854
Pectinidae Wilkes, 1810
Leopecten Masuda, 1971
Leopecten bakeri Hanna y Hertlein 1927

Ejemplares referidos. MHN-UABCS/SR/PCT (Figura 15a) un bivalvo articulado asignado a la especie *Leopecten bakeri*.

Localidad y edad. San Alberto, BCS, México. Unidad arenisca fosilífera El Yaqui Formación Infierno (Pleistoceno inferior, Gelasense).

Descripción. MHN-UABCS/SR/PCT presenta una valva izquierda de tamaño grande de 15 cm de alto y 17 cm de ancho (Figura 15a), la cual

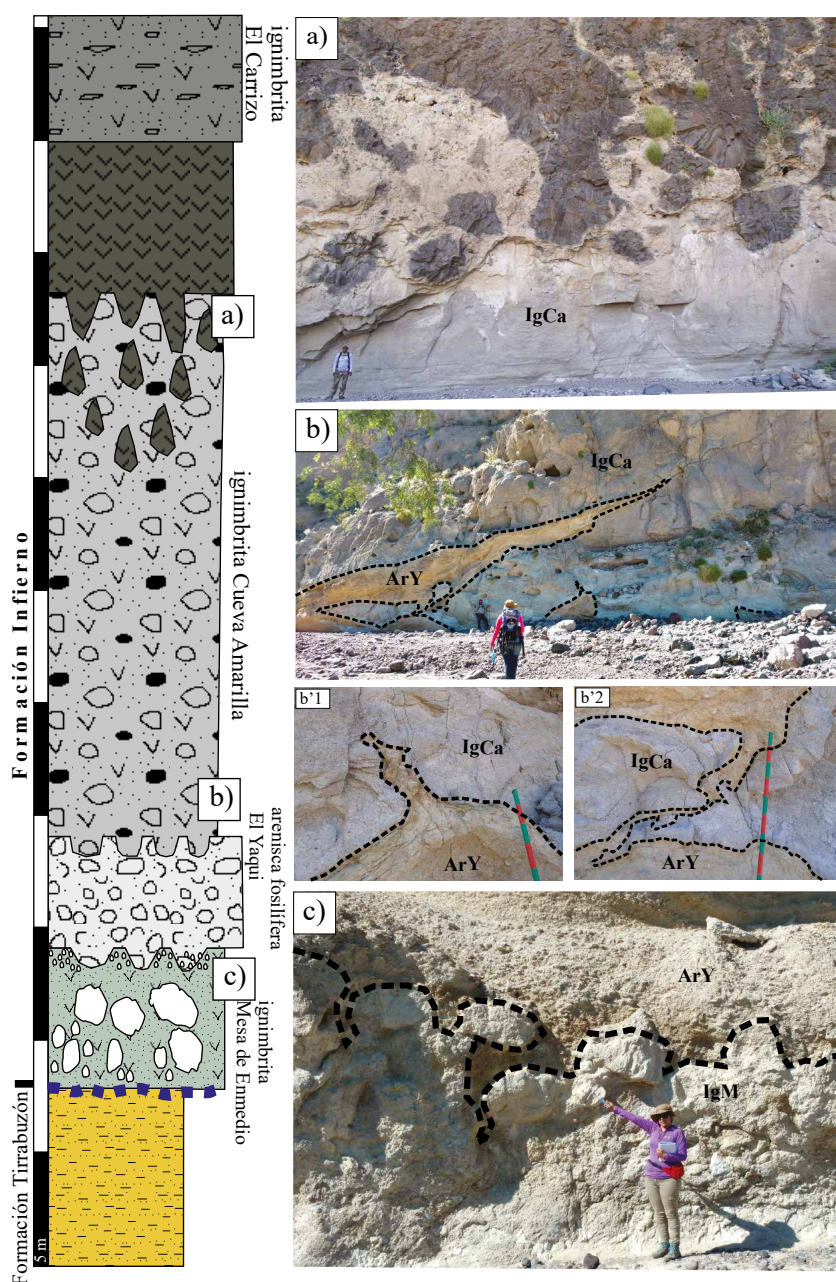


Figura 13. Relaciones estratigráficas observadas entre las unidades ignimbrítica Mesa de Enmedio, arenisca fosilífera El Yaqui, ignimbrítica Cueva Amarilla (subunidades ignimbrítica Verde y lava peperítica Azul), en la localidad cañon El Álamo. a) Contacto entre las subunidades ignimbrítica Verde con la subunidad lava peperítica Azul. b) Dique clástico en el contacto de las unidades ArY y IgCa. B'1, B'2 Estructura tipo flama (escala en decímetros). c) Contacto entre las unidades IgM y ArY.

es aplanada moderadamente convexa con 25 costillas radiales, cada una con 2 a 3 hilos que aparecen hacia la parte superior de la valva. En los interespacios se presentan de 1 a tres hilos. La valva tiene líneas concéntricas de crecimiento. La valva derecha se encuentra incompleta, pero se aprecia que es ligeramente más convexa que la izquierda. No se observan hilos de ornamentación en las costillas, ni en los interespacios.

Observaciones. La especie ha sido descrita para el Plioceno-Pleistoceno inferior (Gelasiano) en el estado de Baja California Sur (Durham, 1950, Moore, 1984; Quiroz y Perrilliat, 1989). El género *Leopecten* probablemente habitaba aguas tropicales a subtropicales (Moore, 1984).

Pectinida Gray, 1854
 Pectinidae Wilkes, 1810
Leopecten Masuda, 1971
Leopecten bakeri diazi Durham, 1950

Ejemplares referidos. MHN-UABCS/SR/PCT1 (Figura 15b), MHN-UABCS/SR/PCT2 (Figura 15c) y MHN-UABCS/SR/PCT3 (Figura 15d), Dos valvas y un bivalvo articulado asignadas a la especie *Leopecten bakeri diazi*.

Localidad y edad. Cañón de La Palma (caldera La Reforma) y Los Tomates, BCS, México. Unidad arenisca fosilífera El Yaqui Formación Infierno (Pleistoceno inferior, Gelasiano).

Descripción. MHN-UABCS/SR/PCT1 (Figura 15b) corresponde a una valva derecha ligeramente convexa de tamaño grande con una altura de 14.2 cm. Presenta 22 costillas radiales de forma cuadrada, donde no se observan hilos de ornamentación. MHN-UABCS/SR/PCT2 (Figura 15c) es una valva derecha ligeramente convexa de tamaño grande con una altura de 16.1 cm, con 22 costillas radiales y líneas concéntricas de crecimiento marcadas. MHN-UABCS/SR/PCT3 (Figura 15d) corresponde a un bivalvo articulado. La valva derecha ligeramente convexa posee una altura de 13.2 cm, con 23 costillas radiales y líneas concéntricas de crecimiento marcadas.

Observaciones. Especie reportada para el Plioceno en las formaciones Tirabuzón e Infierno en la zona sur de la cuenca de Santa Rosalía (Quiroz y Perrilliat, 1989). La subespecie *Leopecten bakeri diazi* fue propuesta por Durham (1950), para diferenciarla de la especie *Leopecten bakeri*, ya que en la subespecie no se aparecen los hilos de ornamentación que pueden estar presentes en costillas y en los interespacios, que suelen ser muy notorios en la valva izquierda.

Ostreida Férussac, 1822
Ostreidae Rafinesque, 1815
Crassostrea Sacco, 1897
Crassostrea sp.

Ejemplares referidos. MHN-UABCS/SR/CSS (Figura 16a) y MHN-UABCS/SR/CSS1 (Figura 16b). Dos valvas asignadas al género *Crassostrea* sp.

Localidad y edad. Los Tomates, BCS, México. Unidad arenisca fosilífera El Yaqui, Formación Infierno (Pleistoceno inferior).

Descripción. MHN-UABCS/SR/CSS (Figura 16a) corresponde a una valva de tamaño grande gruesa y de superficie rugosa con 29 cm de alto. MHN-UABCS/SR/CSS1 (Figura 16b) corresponde a una valva grande gruesa de superficie rugosa incompleta de 24.1 cm de alto.

Observaciones. Las especies recientes pertenecientes al género *Crassostrea* se caracterizan por distribuirse en hábitats de aguas someras como estuarios, lagunas hipersalinas y zonas intermareales

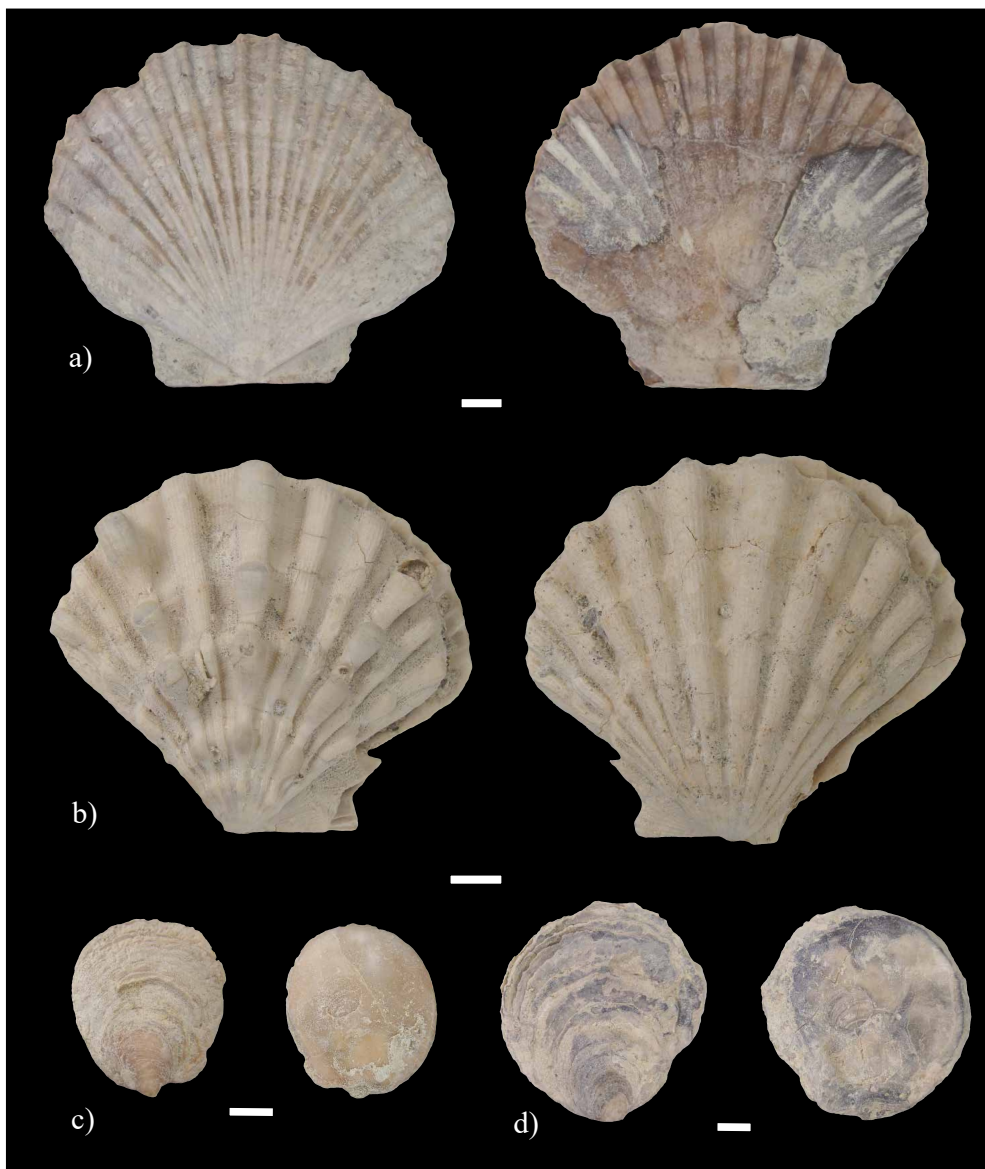


Figura 14. Bivalvos fósiles recolectados en la cima de la unidad ignimbrita Mesa de Enmedio (Localidad cañón El Álamo). a) *Patinopecten bosei* (MHN-UABCS/SR/PB). b) *Nodipecten subnodosus* (MHN-UABCS/SR/NS). c-d) *Pycnodonte* cf. *erici* (MHN-UABCS/SR/OE y MHN-UABCS/SR/OE1). Escala 1 cm.

(Ragaini y Di Celma, 2009). En el registro fósil durante el Cenozoico se encuentran generalmente en depósitos marinos someros tropicales, como ambientes lagunares protegidos hipersalinos (Moore, 1987; Ragaini y Di Celma, 2009). Las especies extintas *C. titan* y *C. californica osunai* han sido reportadas para depósitos marinos del Mioceno y Plioceno en California y Baja California (Moore, 1987).

GEOCRONOLOGÍA

Se realizaron análisis isotópicos en un total de 640 granos de circón correspondientes con productos volcánicos de dos unidades de la sucesión volcano-sedimentaria Pre-Reforma VsC (IgC, PgC) y VsZ. Para el análisis fueron seleccionados y procesados fragmentos de pómez. En promedio se seleccionaron 30 y 35 circones de cada muestra. Las edades modelo fueron calculadas con base en las relaciones isotópicas $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ y $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Los análisis correspondientes para la unidad VsC (subunidad IgC) muestran edades modelo de 1.22 ± 0.14 Ma y 2.17 ± 0.29 , con una edad promedio de 1.47 ± 0.11 Ma de un grupo coherente de 24 circones (Figura 17). Por lo tanto, esta última edad es la que corresponde a la unidad, utilizando como base la posición estratigráfica y la edad isotópica por el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de las unidades superiores. No obstante, se encontraron grupos de circones que arrojan edades entre 4.34 ± 0.39 , 12 ± 1.3 Ma y 44.4 ± 12 , 59.3 ± 3 Ma, probablemente correspondientes a circones heredados de unidades más antiguas. En tanto, para la subunidad ignimbrítica la Cueva se encontraron edades entre 1.28 ± 0.18 Ma y 2.38 ± 0.21 Ma siendo 1.43 ± 0.06 Ma la edad promedio de un grupo coherente de 27 circones (Figura 17). Finalmente, para la unidad VsZ se muestran edades desde 1.0 ± 0.25 Ma hasta 34.7 ± 1.7 Ma con una edad promedio

de 1.35 ± 0.14 Ma de un grupo coherente de 17 circones, para esta unidad es considerada la edad promedio, debido a que es sobreyacida por una ignimbrítica relacionada con la caldera El Aguajito, fechada en 1.1 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (Osorio-Ocampo *et al.*, 2019).

DISCUSIÓN

Recientemente se han realizado trabajos geológicos, cartográficos y estratigráficos detallados del complejo Volcánico de las Tres Vírgenes y las Calderas de La Reforma y El Aguajito, que han permitido conocer detalles de la evolución geológica, volcánica y tectónica de la región durante el Plio-Pleistoceno (Avellán *et al.*, 2018; García-Sánchez *et al.*, 2019; Osorio-Ocampo *et al.*, 2019; Lira-Beltrán *et al.*, 2020; Ocampo-Díaz *et al.*, 2021). Sin embargo, los trabajos mencionados no se han centrado en la estratigrafía detallada de la sucesión volcano-sedimentaria del Pleistoceno inferior que forma parte del sustrato de las calderas de La Reforma y El Aguajito y la correlacionamos con base en evidencias paleontológicas, estratigráficas y cronológicas con la Formación Infierno descrita por Wilson y Rocha (1955) en el sur de la cuenca.

Contenido fósil y ambiente de depósito

Los fósiles de la Formación Infierno también permiten diferenciarla de los depósitos marinos de la Formación Tirabuzón del Plioceno (Wilson y Rocha, 1955; Lira-Beltrán *et al.*, 2020). Los fósiles más característicos de la Formación Infierno corresponden a pectínidos y ostras, de los cuales los pectínidos gigantes han brindado información sobre la edad de la sucesión. Los pectínidos gigantes se caracterizan por tener un diámetro superior a los 9.0 cm se encuentran distribuidos en depósitos marinos del Neógeno a lo largo del Pacífico (Addicott, 1974). Durante

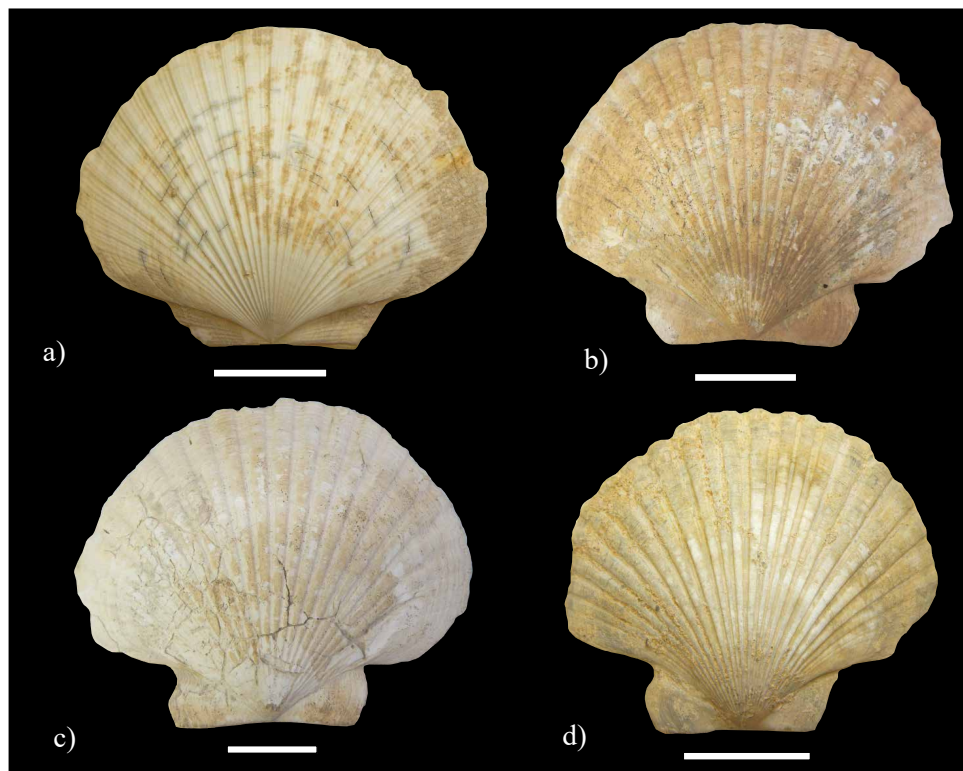


Figura 15. Bivalvos fósiles de la familia Pectinidae recolectados en la unidad arenisca fosilífera El Yaqui. a) *Leopecten bakeri* (MHN-UABCS/SR/PCT). b-d) *Leopecten bakeri diazi* (MHN-UABCS/SR/PCT1, MHN-UABCS/SR/PCT2 y MHN-UABCS/SR/PCT3). Escala 5 cm.

el Plioceno-Pleistoceno superior, el noroeste de México y California se caracterizó por una diversidad taxonómica de pectínidos gigantes, dentro de los cuales sobresalen los géneros extintos *Patinopecten* y *Leopecten* que llegaron alcanzar tallas superiores a los 15 cm, de la misma manera como del género actual *Nodipecten*, (Addicott, 1974; Quiroz y Perrilliat, 1989). Estos géneros de pectínidos han sido reportados para la Formación Infierno en el sur de la CSR (Wilson y Rocha, 1955; Quiroz y Perrilliat, 1989). En este trabajo se encontraron las especies de pectínidos gigantes *Patinopecten bosei* y *Nodipecten subnodosus* en la unidad ignimbrita Mesa de Enmedio en conjunto con la especie de ostra extinta *Pycnodonte cf. erici*. Los fósiles se colectaron en la cima de la unidad, algunos inmersos en bloques de pómez y otros dentro de la matriz de ceniza. Los fósiles están bien preservados, en el caso del ejemplar correspondiente a *Nodipecten subnodosus*, se encontró articulado. Probablemente la fauna fósil perteneciente a esta unidad no estuvo expuesta a un transporte prolongado y muy probablemente la temperatura de la ignimbrita no fue tan elevada, ya que el material no muestra evidencias de calcinación. Además, se reportan las especies extintas *Leopecten bakeri* y *Leopecten bakeri diazi* en la unidad arenisca fosilífera El Yaqui, que sobreyace a la unidad ignimbrita Mesa de Enmedio. No se encontraron fósiles con características similares en unidades estratigráficamente superiores. Actualmente la mayoría de las especies de pectínidos habitan aguas someras con profundidades que oscilan entre 10 a 100 m, donde la dinámica de la circulación mantiene altos los niveles de oxígeno y nutrientes (Quiroz y Perrilliat, 1989). Mientas que la presencia de fósiles de ostras gigantes del género *Crassostrea* sp. dentro de la unidad arenisca fosilífera El Yaqui, sugieren aguas someras como zonas protegidas de baja energía. En las localidades cañón El Morro Prieto, Santa Ana, El Azufre y Los Tomates, en las unidades ArY y ArCf se encontraron madrigueras y moldes internos del género *Panopea* sp. Estos bivalvos suelen habitar en ambientes de energía moderada en fondos arenosos de la zona intermareal hasta los 110 m de profundidad (Hanken et al., 2001; Cortez-Lucero et al., 2014).

Edad

La presencia de varias especies de Pectínidos gigantes ha sido usada para asignar una edad de Plioceno a Pleistoceno inferior a la Formación Infierno (Wilson y Rocha, 1955; Quiroz y Perrilliat, 1989). Sin embargo, considerando la Carta Cronoestratigráfica de la Comisión Internacional de Estratigrafía (Cohen et al., 2013), se puede asignar al Pleistoceno inferior (2.5-1.8 Ma). El contenido fósil para la unidad IgM (base de la sucesión estudiada) indica una edad entre el límite del Plioceno superior y Pleistoceno inferior (Gelasiense) y para la unidad ArY una edad de Pleistoceno inferior (Gelasiense). Hay publicaciones con edades radiométricas de cinco de las unidades litológicas descritas en este trabajo, además una edad para un depósito de lava almohadillada relacionado con la unidad Lpc que aflora en las cercanías de la localidad de Cuevas Amarillas. Estas edades son: 2.4 Ma U/Pb Zr para la unidad IgC, 1.89 Ma Ar/Ar WR para la unidad IgCz, 1.8 Ma Ar/Ar WR para la unidad LaAz, 1.47 Ma Ar/Ar WR para la VsC, 1.42 Ma Ar/Ar WR para el depósito de lavas almohadilladas y 1.36 Ma Ar/Ar WR para la unidad Lpc (García-Sánchez et al., 2019; Osorio-Ocampo et al., 2019). En este trabajo se reportan tres nuevas edades por el método de U/Pb en circones para las unidades VsC (1.47 Ma y 1.43 Ma) y VsZ (1.35 Ma) (Figura 18). Complementando a las fechas radiométricas y relativas, en campo se observó que la unidad arenisca fosilífera El Yaqui descansa discordantemente sobre la Formación Tirabuzón (localidades cañones El Álamo y Morro Prieto). También se publicó una edad pliocénica para la Formación Tirabuzón en la localidad del cañón El Álamo con base en dientes fósiles de tiburones y rayas (Lira-Beltrán et al., 2020). Por lo anterior, se propone una edad máxima de Plioceno superior-Pleistoceno inferior para la base de la sucesión

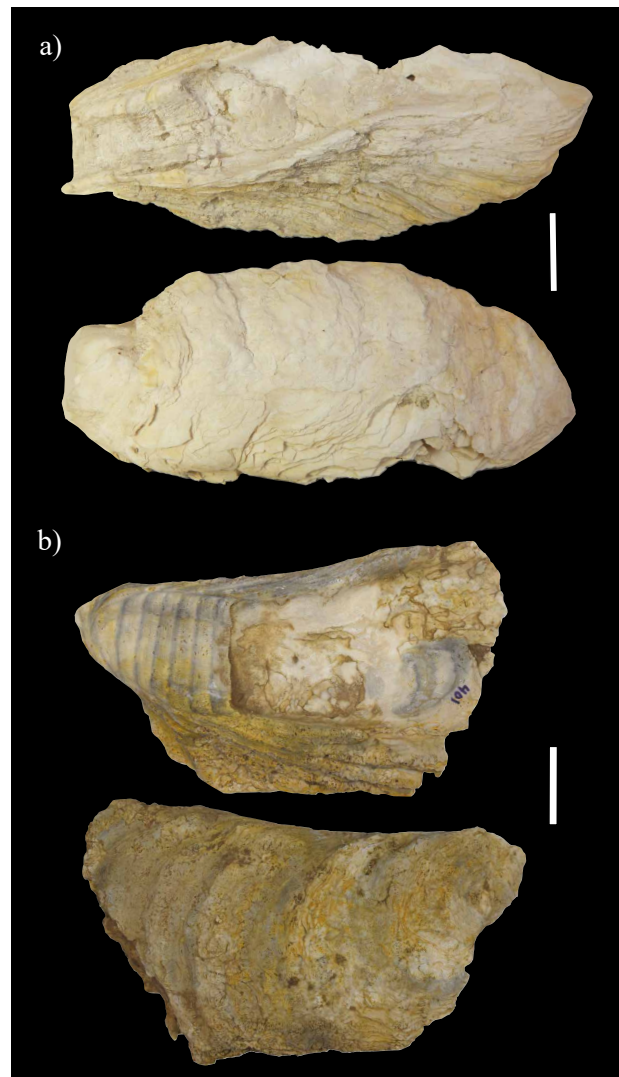


Figura 16. Fósiles pertenecientes al género *Crassostrea* sp. a) MHN-UABCS/SR/CSS y b) MHN-UABCS/SR/CSS1, colectado en la unidad arenisca fosilífera El Yaqui. Escala 5 cm.

estudiada en el área de estudio. La sucesión que relacionamos con la Formación Infierno, la cual comprende las unidades IgM, ArY y IgCa, se depositó en un lapso de tiempo relativamente corto, evidenciado por las estructuras sedimentarias de deformación que se observaron en los contactos. Las fechas radiométricas, las edades relativas y las relaciones estratigráficas entre las unidades IgM, ArY y IgC y con la Formación Tirabuzón del Plioceno (Figura 18) permitieron diferenciar entre la Formación Infierno y una sucesión más joven para la cual se propone en este trabajo el nombre de sucesión volcano-sedimentaria Pre-Reforma (1.47–1.35 Ma). Durante el depósito de la sucesión Pre-Reforma la actividad volcánica aumentó progresivamente, pasando de un ambiente submarino-subaéreo a subaéreo que culmina con la actividad caldérica explosiva de La Reforma (García-Sánchez et al., 2019).

CONCLUSIONES

Con base en edades radiométricas previamente publicadas, nuevas edades U/Pb en circones, la presencia de los géneros extintos: *Pycnodonte cf. erici*, *Patinopecten bosei*, *Leopecten bakeri* y *Leopecten*

bakeri diazi y las relaciones estratigráficas observadas en la localidad del cañón El Álamo proponemos que la sucesión volcano-sedimentaria estudiada alrededor y en la zona de las calderas de La Reforma y El Aguajito se puede dividir en dos sucesiones: (1) Formación Infierno, compuesta por las unidades ignimbrita Mesa de Enmedio, arenisca fosilífera El Yaqui, ignimbrita Cueva Amarilla, ignimbrita El Carrizo, lava El Azufre y arenisca fosilífera Cueva de los Fósiles, con edades de 2.5 Ma cerca de la base y 1.8 Ma para la cima. (2) sucesión volcano-sedimentaria Pre-Reforma integrada por: la unidad volcano-sedimentaria El Contrabando, lava Punta Candeleros y la unidad

volcano-sedimentaria La Zorra, con edades de 1.47 Ma para la base y 1.35 Ma para la cima.

Con base en los resultados del presente estudio se propone que el límite norte de la CSR durante el Pleistoceno inferior se ubicó en las inmediaciones de las localidades de: San Alberto, Santa Ana y Los Tomates. Por último, se infiere que el ambiente de depósito de la Formación Infierno en el área de estudio fue de aguas tropicales-subtropicales poco profundas, que variaron desde zonas intermareales, bahías protegidas a zonas de plataforma interna con menos de 100 m de profundidad.

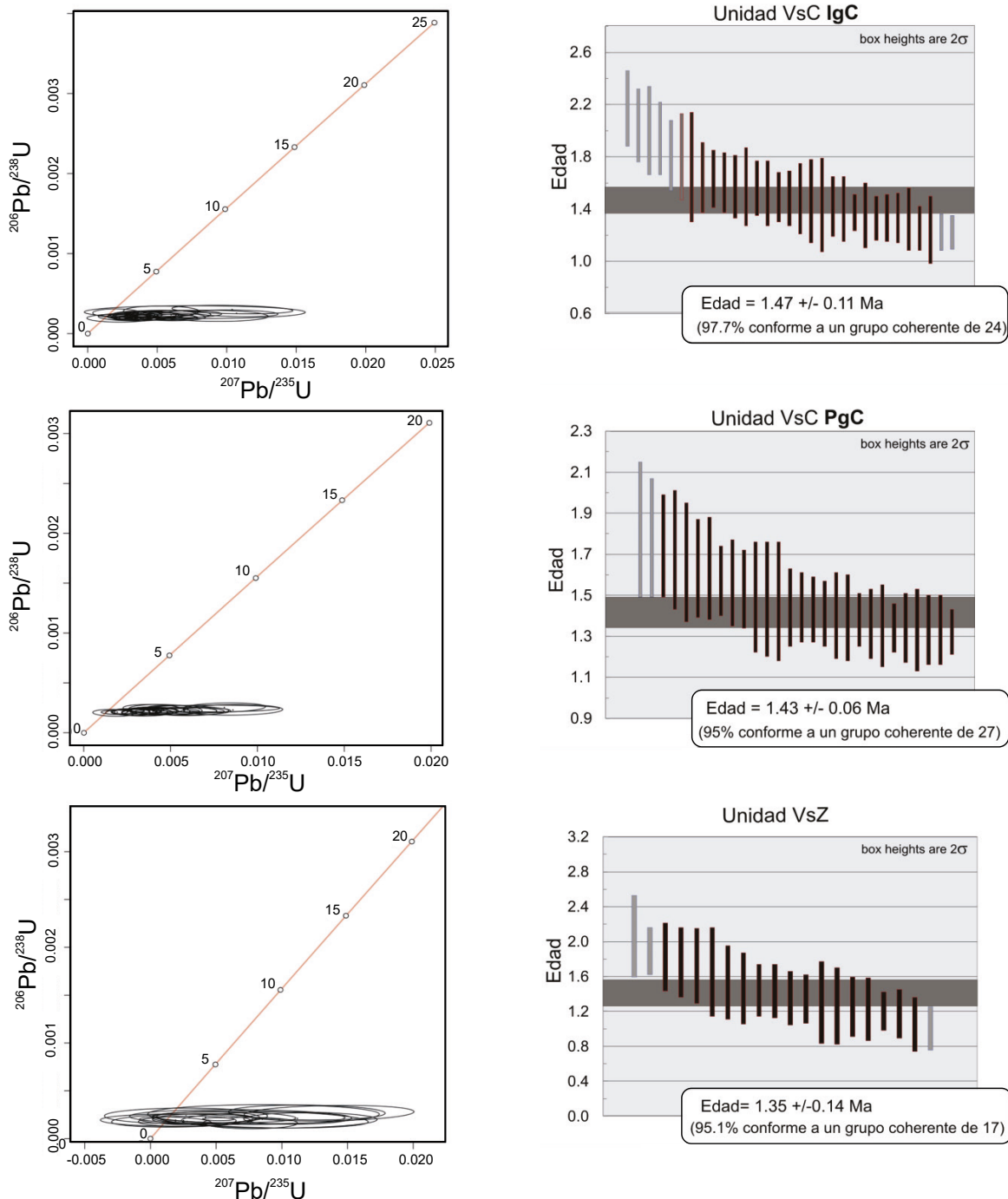


Figura 17. Gráficos de concordia de edades U-Pb donde se muestran los circones más jóvenes e histogramas donde se muestran las edades promedio para un grupo de circones de las unidades VsC (subunidades IgC y PgC) y VsZ.

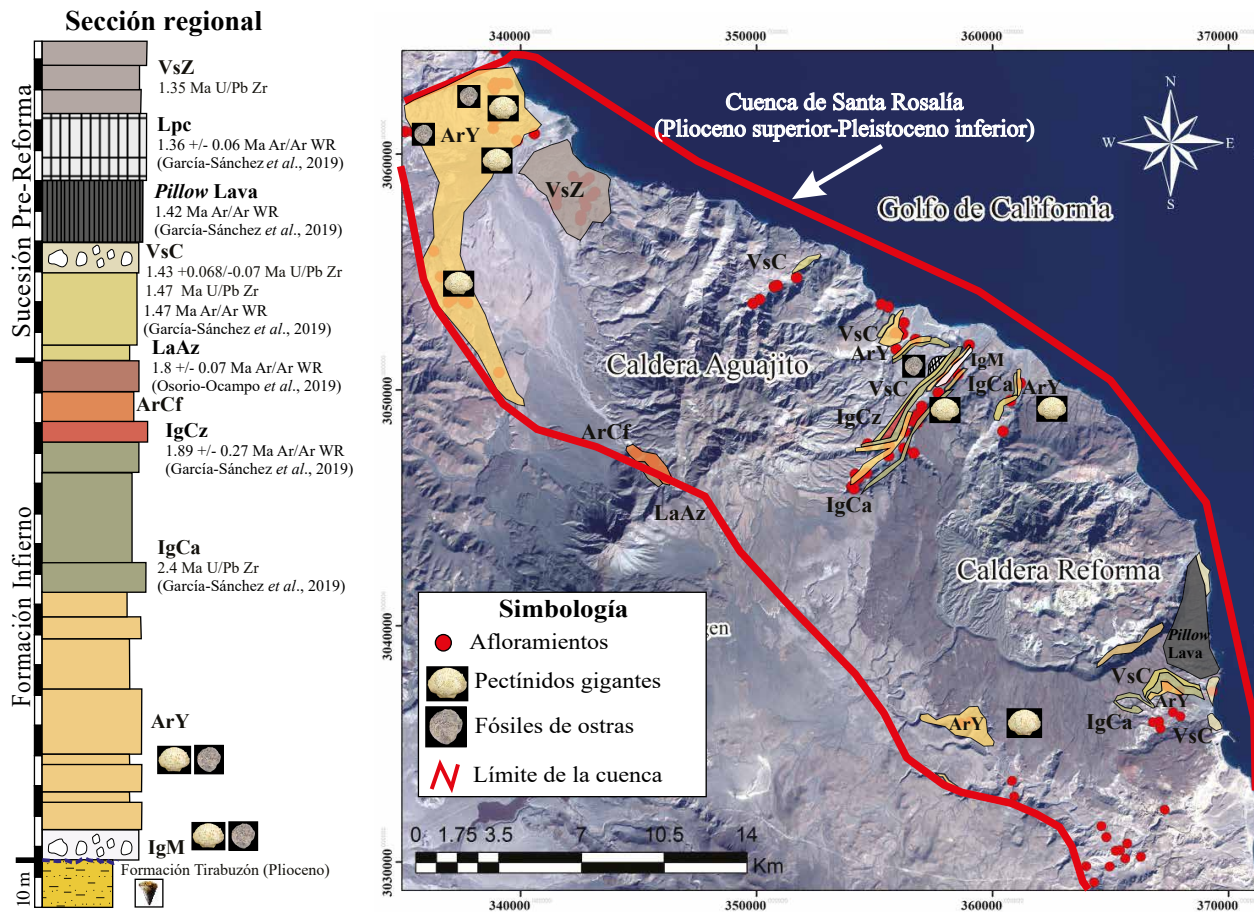


Figura 18. Columna estratigráfica regional, con las fechas radiométricas y fósiles de importancia, la línea discontinua de color azul marca el contacto discordante entre la Formación Tirabuzón del Plioceno y la Formación Infierno del Pleistoceno. Mapa de la ubicación de afloramientos de las unidades litológicas y la extensión norte de la Cuenca de Santa Rosalía.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto P15 del Centro Mexicano de Innovación de Energía Geotérmica (CONACYT 207032 CeMIE Geo). Agradecemos a la Técnica Fabiola Mendiola López por el apoyo brindado en el laboratorio de análisis de partículas y separación de minerales del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México Unidad Michoacán (IGUM-UNAM); al Dr. Luigi Solari, Dr. Carlos Ortega Obregón, Manuel Albarrán Murillo y a la M.C. Irene Pérez del Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México por el apoyo brindado en los análisis isotópicos. Además, a Fernanda Jiménez, Azucena Solís, Erick Iván Pacheco Méndez, Francisco Romero, Alfredo Aviña y a Don Miguel Aguilar por su gran apoyo en las campañas de campo; a Rosa Laura Carillo Soledad por el apoyo de limpieza y separación de fósiles; al Dr. Josué Alonso Yee Duarte y al Dr. Quentin Gendron por la revisión del manuscrito. Por último, agradecemos a los revisores por sus valiosas sugerencias.

REFERENCIAS

- Addicott, W., 1974, Giant Pectinids of the Eastern North Pacific Margin: Significance in Neogene Zoogeography and Chronostratigraphy: *Journal of Paleontology*, 48 (1), 180-194.
- Avellán, D.R., Macías, J.L., Arce, J.L., Jiménez-Haro, A., Saucedo-Girón, R.,

- Garduño-Monroy, V.H., Sosa-Ceballos, G., Bernal, J.P., López-Loera, H., Cisneros, G., Layer, P.W., García-Sánchez, L., Reyes-Agustín, G., Santiago Rocha, V., Rangel, E., 2018, Eruptive chronology and tectonic context of the late Pleistocene Tres Vírgenes volcanic complex, Baja California Sur (México): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 360, 100-125.
- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., 2013, Transensional rifting in the proto Gulf of California near Bahía Kino, Sonora, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 125 (11-12), 1752-1782.
- Busby-Spera, C.J. White, J.D.L., 1987, Variation in peperite textures associated with differing host-sediment properties: *Bulletin of Volcanology*, 49, 765-775.
- Carreño, A.L., 1981, Ostrácodos y foraminíferos planctónicos de la loma del Tirabuzón, Santa Rosalía, Baja California Sur, e implicaciones bioestratigráficas y paleoecológicas: *Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología, Revista*, 5(1), 55-64.
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., Fan, J.X., 2013, The ICS International Chronostratigraphic Chart: *Journal of International Geosciences*, 36, 199-204, <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2013/v36i3/002>
- Conly, A.G., Brenan, J.M., Bellon, H., Scott, S.D., 2005, Arc to rift transitional volcanism in the Santa Rosalia region, Baja California Sur, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 142 (3-4), 303-341.
- Cortez-Lucero, G., Arreola-Lizarraga, J., Chávez-Villalba, J., Aragon-Noriega, E., 2014, Distribución y abundancia de la almeja de sifón *Panopea globosa* (Bivalvia: Hiatellidae), en la región central del Golfo de California, México: *Hidrobiológica*, 24, 167-174.
- Dall, W.H., 1890-1903, Contributions to the Tertiary fauna of Florida with especial reference to the Miocene silex-beds of Tampa and the Pliocene beds of the Caloosahatchie River: *Transactions of the Wagner Free*

- Institute of Science, 3(1), 1-200.
- Del Rio Salas, R., Ochoa-Landín, L., Ruiz, J., Eastoe, C., Meza-Figueroa, D., Zuñiga-Hernández, H., Mendivil-Quijada, H., Quintanar-Ruiz, F., 2013, Geology, stable isotope, and U-Pb geochronology of the Mariquita porphyry copper and Lucy Cu-Mo deposits, Cananea district, Mexico: A contribution to regional exploration: *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 140-154, <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.08.016>
- Donaire, T., Sáez R., Pascual E., 1998, Evidencias petrográficas de interacción entre un magma félsico y un nivel sedimentario rico en radiolarios en la faja peritica Ibérica: *Geogaceta*, 24, 111-114.
- Dorsey, R.J., Umhoefer, P.J., 2012, Influence of sediment input and plate-motion obliquity on basin development along an active oblique-divergent plate boundary: Gulf of California and Salton Trough, *en* Busby, C., Azor, A., (eds.), *Tectonics of Sedimentary Basins Recent advances*: India, Blackwell Publishing, 209-225, DOI: 10.1002/9781444347166.ch10
- Durham, J.W., 1950, Megascopic paleontology and marine stratigraphy, *en* E. W. Scripps, 1940 Cruise to the Gulf of California, pt. II: Geological Society of America Memoir.
- Férussac, 1822, *en* MolluscaBase eds. 2022, MolluscaBase. Ostreida: Accessed through: World Register of Marine Species at: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=1774> on 2022-11-25
- Fischer von Waldheim, G., 1835, Lettre à M. le Baron de Férussac sur quelques genres de coquilles du Muséum-Demidoff et en particulier sur quelques coquilles fossiles de la Crimée: *Bulletin de la Société Impériale des Naturalistes de Moscou*, 8, 99-123.
- García-Sánchez, L., Macías, J.L., Sulpizio, R., Osorio-Ocampo, L.S., Pellicoli, C., Pola, A., Avellán, D., Cisneros, G., García, F., Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Lira-Beltrán, R.M., Saucedo, R., Sánchez-Núñez, J. M., Arce, J.L., Corona-Chávez, P., Reyes-Agustín, G., Cardona, M., Layer, P.W., Benowitz, J., Solari, L., Gropelli G., 2019, Geology of La Reforma caldera complex, Baja California, Mexico: *Journal of Maps*, 15 (2), 487-498.
- Garduño-Monroy, V. H., Vargas-Legdezma H., Campos-Enríquez, J. O., 1993, Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent-type caldera: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 47-58.
- Gray, 1854, *en* Bieler, R., Carter, J.G.; Coan, E.V., 2010, Classification of Bivalve families. Pp. 113-133, *en* Bouchet P., Rocroi J.-P. Nomenclator of Bivalve Families. *Malacologia*, 52(2), 1-184
- Hanna G.D., Hertlein, L.G., 1927, Expedition of the California Academy of Sciences to the Gulf of California in 1921: *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 4th series, 16(6), 137-157.
- Hanken, N.-M., Bromley, R.G., Thomsen, E., 2001, Tracefossils of the bivalve *Panopea fujasi*, Pliocene, Rhodes, Greece: *Ichnos*, 8, 117-130. <https://doi.org/10.1080/10420940109380179>
- Harry, H.W., 1985, Synopsis of the supraspecific classification of living oysters (Bivalvia: Gryphaeidae and Ostreidae). *The Veliger*, 28(2): 121-158. source: World Register of Marine Species Synonym of *Ostrea* Linnaeus, 1758
- Hendy, A.J.W., 2020, Unpublished taxonomic backbone for Eastern Pacific Invertebrate Communities of the Cenozoic (EPICCC), Thematic Collections Network: Paleobiology Database.
- Hertlein, 1929, Ref.: Grant, U.S., IV, Gale H.R., 1931, Catalogue of the Marine Pliocene and Pleistocene Mollusca of California: *Memoirs of the San Diego Society of Natural History*, 1, 1-1036.
- Holt, J.W., Holt, E.W., Stock, J.M., 2000, An age constraint on Gulf of California rifting from Santa Rosalia basin, Baja California Sur, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 112, 540-549.
- Lira-Beltrán, R.M., González-Barba, G., Macías, J.L., Solís-Añorve, A., García-Tenorio, F., García-Sánchez, L., Osorio-Ocampo, S., 2020, Fauna de tiburones y rayas de la Formación Tirabuzón (Plioceno) en el Cañón El Álamo, sierras de La Reforma – El Aguajito, Baja California Sur, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(1), 40-63.
- Macías, J.L., Arce, J.L., Garduño-Monroy, V.H., Avellán, D.R., García-Sánchez, L., Reyes-Agustín, G., Rangel, E., Saucedo, R., Cisneros, G., Navarrete, J.A., 2012, Estudio estratigráfico y geología del Complejo Volcánico Tres Vírgenes, B.C.S: Comisión Federal de Electricidad, reporte interno, DEX-DLG-TV-17-11, 104 pp.
- Masuda, 1971, World Register of Marine Species, MolluscaBase eds. (2022). Descripción original: MolluscaBase. *Leopecten* Masuda, 1971. Accessed through: World Register of Marine Species at: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=393863>
- McPhie, J., 1993, The Tennant Creek porphyry revisited: A synsedimentary sill with peperite margins, Early Proterozoic, Northern Territory: *Australian Journal of Earth Sciences*, 40, 545-558.
- Mills, P.C., 1983, Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures - A review: *Sedimentary Geology*, 35, 83-104, [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(83\)90046-5](https://doi.org/10.1016/0037-0738(83)90046-5)
- Miranda-Avilés, R., Beraldi-Campesi, H., Puy-Alquiza, M.J., Carreño, A.L., 2005, Estromatolitos, tufas y travertinos de la sección El Morro: Depósitos relacionados con la primera incursión marina en la Cuenca de Santa Rosalia, Baja California Sur: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 148-158.
- Moore, E.J. 1984, Tertiary marine pelecypods of California and Baja California: *Propeamussiidae and Pectinidae*: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1228-B, 112.
- Moore, E.J., 1987, Tertiary Marine Pelecypods of California and Baja California: Plicatulidae to Ostreidae: United States Geological Survey Professional Papers, 1228-C, 1-53.
- Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Torres-Sánchez, S.A., Augustsson, C., Macías, J.L., Sosa-Ceballos, G., Cisneros-Máximo, G., García-Sánchez, L., Osorio-Ocampo, S., Avellán, D.-R., Omma, J., Ortega-Obregón, C., Solari, L.A., and González-Barba, G., 2021, Provenance of the El Salto Formation (early Oligocene to early Miocene), southern part of La Reforma caldera, Baja California Sur, Mexico, *en* Martens, U.C., Molina Garza, R.S., (eds.), *Southern and Central Mexico: Basement Framework, Tectonic Evolution, and Provenance of Mesozoic-Cenozoic Basins*: Geological Society of America Special Paper 546, 277-308, [https://doi.org/10.1130/2021.2546\(11\)](https://doi.org/10.1130/2021.2546(11)).
- Ochoa-Landín, L., Ruiz, J., Calmus, T., Pérez, E., Escandon, F., 2000, Sedimentology and stratigraphy of the Upper Miocene Boleo Formation, Santa Rosalia, Baja California, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 17, 83-95.
- Ortlieb, L., 1981, Sequence of Pleistocene marine terraces in Santa Rosalia area, Baja California Sur, Mexico, *en* L. Ortlieb J. Roldán (eds.), *Geology of northwestern Mexico and southern Arizona field guides and papers: Hermosillo, Son., México, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 275-293.
- Ortlieb, L., Colletta, B., 1984, Síntesis cronoestratigráfica sobre el Neógeno y el Cuaternario marino de la Cuenca de Santa Rosalia, Baja California Sur, México, *en* Malpica-Cruz, V., Celis-Gutiérrez, S., Guerrero-García, J., Ortlieb, L. (eds.), *Neotectonics and Sea Level Variations in the Gulf of California Area, a Symposium, Abstracts*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 242-268.
- Oskin, M., Stock, J., 2003, Pacific-North America plate motion and opening of the Upper Delfin basin, northern Gulf of California, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 115, 1173-1190.
- Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Lira-Beltrán, R.M., Macías, J.L., Pola, A., Avellán, D.R., Ocampo-Díaz, Y.Z.E., Gropelli, G., Sulpizio, R., García-Tenorio, F., González-Barba, G., Sosa-Ceballos, G., 2019, Volcanic and marine stratigraphy along the El Álamo Canyon, Santa Rosalia Basin, Baja California Sur, *en* Pearthree, P.A. (ed.), *Geologic Excursions in Southwestern North America*: Geological Society of America Field Guide 55, 187-208, [https://doi.org/10.1130/2019.0055\(08\)](https://doi.org/10.1130/2019.0055(08))
- Quiroz, S., Perrilliat M. C., 1989, Pectinidos del Plioceno del área de Santa Rosalia, Baja California Sur, *Paleontología Mexicana*, 53, 1-79.
- Rafinesque, 1815, *en* MolluscaBase eds. (2022), MolluscaBase. Ostreidae: Accessed through: World Register of Marine Species at: <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=215> on 2022-11-25
- Ragaini, L., Di Celma C., 2009, Shell structure, taphonomy and mode of life of a Pleistocene ostreid from Ecuador. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 48 (2), 79-87.
- Sacco F., 1897, I Molluschi dei terreni terziari del Piemonte e della Liguria, Parte 23 (Ostreidae, Anomiidae, Dimyidae): *Bollettino dei Musei di Zoologia ed Anatomia Comparata della R. Università di Torino*, 12(298), 99-100.
- Sawlan, M. G., Smith, J. G., 1984, Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico, *en* Frizzell, A.V. (ed.), *Geology of the Baja California*

- Peninsula: Tulsa, Oklahoma, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Pacific Section, 39, 237-251.
- Schmidt, E.K., 1975, Plate tectonics, volcanic petrology, and ore formation in the Santa Rosalía area, Baja California, Mexico: University of Arizona, Master thesis, 195 pp.
- Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J., 2002, Peperite: a review of magma-sediment mingling, *en* Skilling, I.P., White, J.D.L., McPhie, J. (eds.), Peperite: Processes and Products of Magma-Sediment Mingling: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 114, 1-17.
- Snyder, M.E., Waldron, J., 2016, Unusual soft-sediment deformation structures in the Maritimes Basin, Canada: Possible seismic origin: Sedimentary Geology, 344, 145-159, <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.03.014>
- Solari, L.A., Gómez-Tuena, A., Bernal, J., Pérez-Arvizu, O., Tanner, M., 2010, U-Pb zircon geochronology with an integrated LA-ICP-MS microanalytical workstation: Achievements in precision and accuracy: Geostandards and Geoanalytical Research, 34(1), 5-18. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2009.00027.x>
- Sowerby, G.B.I., 1835, Characters of and observations on new genera and species of Mollusca and Conchifera collected by Mr. Cuming. Proceedings of the Zoological Society of London.
- Vialov O., 1936, Sur la classification des huitres: Comptes Rendus (Doklady) de l'Académie des Sciences de l'URSS, ser. 2, 4(1), 17-20.
- Wilkes, 1810, *en* Paleobiology Database (2022). The Paleobiology Database. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/zzoyxi> accessed via GBIF.org on 2022-03-30.
- Wilson, I. F., 1948, Buried topography, initial structures and sedimentation in Santa Rosalía area, Baja California, Mexico: Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 32(9), 1762-1807.
- Wilson, I.F., Rocha, V.S., 1955, Geology and Mineral Deposits of the Boleo Copper District Baja California, Mexico: Washington D.C., United States Geological Survey, Professional Paper 273, 134 pp.
- Wilson, I.F., Veytia, M., 1949, Geology and manganese deposits of the Lucifer district northwest of Santa Rosalía, Baja California, Mexico: Washington D.C., United States Department of the Interior, Geological Survey, Bulletin 960-F, 177-231.
- Zeng-Zhao F., 2017, A brief review on 7 papers from the special issue of "The environmental significance of soft-sediment deformation" of the Sedimentary Geology 344 (2016): Journal of Palaeogeography, 6(4), 243-250. DOI:10.1016/j.jop.2017.07.001

Manuscrito recibido: agosto 15, 2022

Manuscrito corregido recibido: noviembre 2, 2022

Manuscrito aceptado: noviembre 4, 2022