

Respuesta del sistema erosivo fluvial en las cuencas Ameca y Santiago, centro-occidente de México, ante el control tectónico y volcánico

Arturo Godínez-Tamay^{1,*} y Miguel Castillo-Rodríguez²

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

² Estación Regional del Noroeste, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Hermosillo, C.P. 83000, Sonora, México.

* arthur412987@comunidad.unam.mx

RESUMEN

El volcanismo del Mioceno tardío asociado a la Faja Volcánica Trans-Mexicana modificó las rutas de transporte de sedimento proveniente del relieve del Oligoceno tardío-Mioceno temprano del centro-occidente de México. Se hipotetiza que los materiales de la Sierra Madre Occidental hubiesen llegado a la planicie aluvial del Graben de Puerto Vallarta. La actividad volcánica de la Faja Volcánica Trans-Mexicana al sur de la Sierra Madre Occidental posiblemente generó el cambio en el curso de la descarga de sedimentos provenientes de la Sierra Madre Occidental, hacia la planicie fluvial de Nayarit, a través del río Santiago. Este evento frenó el transporte de sedimentos provenientes de la Sierra Madre Occidental al Graben de Puerto Vallarta y la Bahía de Banderas y aisló una porción de relieve que actualmente corresponde a la cuenca del río Ameca, la cual suministra, hoy en día, los sedimentos que conforman la planicie fluvial del Graben de Puerto Vallarta. La distribución de edades de zircones detríticos del Oligoceno tardío al Mioceno temprano en las desembocaduras de las cuencas Santiago y Ameca, indica que ambas cuencas comparten sedimentos originados en la Sierra Madre Occidental.

Palabras clave: sistema erosivo fluvial; zircones detríticos; Faja Volcánica Trans-Mexicana; Sierra Madre Occidental; México.

ABSTRACT

The Late Miocene volcanism related to the Trans-Mexican Volcanic Belt modified the paths of sediment transport from the Late Oligocene-Early Miocene landscape on west-central Mexico. We hypothesize that the ignimbrites from the Sierra Madre Occidental have had reached the floodplain of the Puerto Vallarta Graben. The volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt at the south of the Sierra Madre Occidental, probably changed the sediment discharge from the Sierra Madre Occidental towards the floodplain of Nayarit through the Santiago River. Such event restrained the sediment transport from the Sierra Madre Occidental towards the Puerto Vallarta Graben and Bahía de Banderas isolating a part of the landscape of the Ameca river basin which, nowadays, feeds the sediments that forms the floodplain of the Puerto Vallarta Graben. The Late Oligocene to Early Miocene age distribution of detrital zircons

close to the mouths of Santiago and Ameca rivers support the idea that both rivers share sediments originated from the Sierra Madre Occidental.

Key words: fluvial erosive system; detrital zircons; Trans-Mexican Volcanic Belt; Sierra Madre Occidental; Mexico.

INTRODUCCIÓN

Las investigaciones geomorfológicas han sido impulsadas por técnicas radiométricas que permiten cuantificar las tasas de erosión e incisión del relieve en escalas de miles a millones de años (Moses *et al.*, 2014). Tales técnicas permiten estimar las tasas de exhumación (p. ej. Margirier *et al.*, 2015; Turab *et al.*, 2017), erosión (p. ej. Vanacker *et al.*, 2007) e incisión (p. ej. Leland *et al.*, 1998) de complejos montañosos, así como tasas de acumulación/sedimentación de materiales provenientes de cadenas montañosas (p. ej. Gunderson *et al.*, 2014). No obstante, la distribución de las edades U-Pb de zircones detríticos y su composición química, además de develar su procedencia, se ha empleado como un registro del sistema erosivo en cuencas fluviales que expone las modificaciones acontecidas en espacio y tiempo (p. ej. He *et al.*, 2014; Blum *et al.*, 2017). Lo anterior se traduce en que el análisis de registros sedimentarios puede proveer información sobre el acarreo de materiales de una cuenca vecina por medio de la intrusión de un río, en un proceso denominado captura de drenaje (Davis, 1890), o si existe una conexión que fue interrumpida por un levantamiento tectónico o un episodio volcánico.

El cambio de ruta de sedimentos de una cuenca a otra se ha estudiado en escenarios donde la actividad tectónica erosiona y/o moviliza divisorias. Bracciali *et al.* (2015) mostraron que el registro de las edades de zircones detríticos evidencia que el río Brahmaputra comenzó a incorporar sedimentos de una cuenca vecina a través de una conexión fluvial producida por modificaciones en las divisorias y resultantes de una exhumación que tuvo lugar en el Mioceno. En un caso opuesto, Ingersoll *et al.* (2013) exploraron el caso en el que el registro de zircones detríticos evidencia que la planicie de Colorado, así como la parte sureste de la costa de California, han permanecido aisladas desde el Cretácico tardío. Los casos de estudio citados confirman que las divisorias pueden ser elementos cambiantes o prevalentes en función del control tectónico y/o climático que opere en

el sitio de interés. De tal forma que, el análisis de sedimentos basado en una geocronología con el método de U-Pb en zircones detríticos, es una herramienta con el potencial de esclarecer si hay áreas abastecidas por sedimentos de un complejo montañoso con el cual no tengan una conexión fluvial actual.

El método de U-Pb en zircones detríticos se ha empleado para estimar la procedencia de sedimentos en el sureste de México (p. ej. Armstrong-Altrin *et al.*, 2012; Witt *et al.*, 2012; Tapia-Fernández *et al.*, 2017), el occidente de México (p. ej. Cavazos-Tovar *et al.*, 2020; Lawton *et al.*, 2020), sur de México (Sierra-Rojas *et al.*, 2016; 2020), y nororiente de México (Juárez-Arriaga *et al.*, 2019; 2021). Los resultados de estas investigaciones proveen pistas sobre la paleogeografía y el contexto en el cual, las cadenas montañosas han sido erosionadas y los sedimentos transportados a través de antiguos sistemas fluviales.

A su vez, el estudio de las divisorias de cuencas fluviales se ha centrado en las capturas de drenaje, en las cuales, los ríos con mayor capacidad erosiva (agresores) erosionan las cabeceras y se apropian del drenaje de ríos de cuencas vecinas (víctimas) que tienen una menor tasa erosiva (Davis, 1890; Crosby, 1937; Bishop, 1995) (Figura 1a). Las capturas de drenaje son reconocidas por decapitaciones en los ríos en forma de codos de captura (p. ej. Struth *et al.*, 2015) y canales parcialmente abandonados en divisorias (p. ej. Valdiya, 1996) (Figura 1b); dicho proceso repercute en el registro sedimentológico de las cuencas agresoras que comienzan a transportar materiales provenientes de cuenca(s) víctima(s) (Figura 1b). Sin embargo, existe un escenario distinto, donde la actividad volcánica puede fragmentar las rutas de evacuación de sedimento de una cuenca fluvial, de tal modo que las

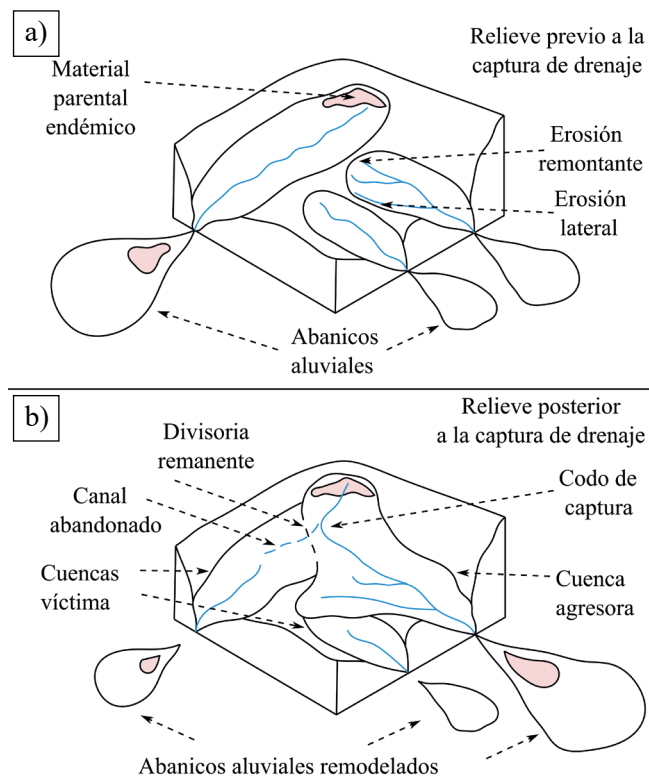


Figura 1. Esquema evolutivo de las cuencas antes de la captura de drenaje (a) y después de la captura de drenaje, cuando las cuencas agresoras empiezan a incorporar materiales de un área vecina (b). Las capturas de drenaje generan rasgos como canales abandonados, divisorias remanentes y codos de captura, los cuales son geo-marcadores útiles en la detección de las capturas de drenaje.

partes inferiores pierden el suministro de los materiales localizados aguas arriba. El registro sedimentológico de cuencas que pierden áreas de abastecimiento se caracteriza por contener sedimentos ajenos al sistema fluvial en el que se encuentran actualmente, este último caso es el que se aborda en la presente investigación.

OBJETIVOS

Para el relieve del centro-occidente de México, la datación U-Pb de zircones detríticos permitiría esclarecer si los sedimentos que provienen de la Sierra Madre Occidental (SMO, Oligoceno tardío-Mioceno temprano) drenaban a la Bahía de Banderas, lo anterior habría sido por medio de una conexión fluvial interrumpida por el emplazamiento de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), a partir del Mioceno tardío (Gómez-Tuena *et al.*, 2007; Ferrari *et al.*, 2012) (Figura 2). Por lo tanto, analizar la distribución de edades y de composición química de los zircones detríticos en los sedimentos del curso bajo de los ríos Ameca y Santiago, en las planicies fluviales de Bahía de Banderas y Nayarit (Figura 2), puede confirmar si la actividad volcánica de la FVTM produjo un cambio en la ruta de evacuación de los sedimentos provenientes de la SMO hacia la planicie de Nayarit a través del río Santiago, y si la FVTM aisló una porción del relieve que actualmente corresponde a la cuenca del río Ameca (Figura 2).

El relieve del sector occidental de la FVTM aún se encuentra sometido a la actividad tectónica extensional (Selvans *et al.*, 2011) (Figura 2), la cual genera una respuesta del sistema fluvial que interactúa con los ríos que inciden en el sector norte del Bloque Jalisco (BJ) y en el sector sur de la SMO. Comprender la interacción mencionada es clave para esclarecer la tendencia evolutiva de la FVTM después de reordenar el relieve centro-occidente de México. Por lo anterior, se realizó un análisis de la evolución del relieve del centro-occidente de México para reconstruir los posibles patrones de disección resultantes del emplazamiento de la FVTM.

GEOLOGÍA DEL CENTRO-OCCIDENTE DE MÉXICO

El relieve del centro-occidente de México está compuesto mayoritariamente por la provincia ígnea de la SMO (Figura 2) que resulta del emplazamiento dividido en dos episodios: (1) un complejo volcánico de ~100 a 50 Ma (McDowell y Keizer, 1977; Ferrari *et al.*, 2007) y (2) grandes volúmenes de ignimbritas emitidas del Oligoceno tardío al Mioceno temprano (Ferrari *et al.*, 2007). Los episodios mencionados son resultado de la etapa final de la subducción de la placa de Farallón bajo la placa de Norteamérica (Ferrari *et al.*, 2018). Durante el Oligoceno tardío al Mioceno temprano, ocurrió un adelgazamiento cortical producto de la extensión, sincrónico al emplazamiento de los materiales ígneos, que derivó en el desarrollo de grábenes y medios grábenes con orientación N-S que conforman el relieve *Basin and Range* al oeste de la SMO (Ferrari *et al.*, 2007, 2013). La reorganización geodinámica que llevó a la apertura del Golfo de California también estuvo acompañada, al sureste, por el desarrollo de fallas normales que conforman al *rift* Tepic-Zacoalco (RTZ) y que controla, desde el Mioceno tardío hasta el presente, el emplazamiento de los edificios volcánicos en el occidente de la FVTM (Gómez-Tuena *et al.*, 2007; Ferrari *et al.*, 2012) (Figura 2).

La FVTM limita parcialmente al sur con el BJ (Figura 2), el cual está conformado en su mayoría por el Batolito de Puerto Vallarta (BPV) que tiene una edad de ~85 a 80 Ma. Esta última unidad cortical está compuesta de granito, granodiorita y rocas metasedimentarias (Valencia *et al.*, 2013; Schaaf *et al.*, 2020). Desde el punto de vista

tectónico, el BJ está delimitado al norte por el RTZ, al este por el *rift* de Colima (RC) y al sur por la trinchera mesoamericana (Figura 2). Actualmente, el BJ tiene un movimiento relativo de 2 mm/año con respecto a la Placa de Norteamérica (Selvans *et al.*, 2011) y un levantamiento activo reflejado en las altas tasas de incisión del río Atenguillo para el Plioceno-Holoceno que varían de 0.6 a 5.6 mm/año (Richter *et al.*, 2010). Al occidente del BJ y oriente del Complejo de

Punta Mita (CPM, ~80 y ~160 Ma en U-Pb), compuesto de granitos y rocas metamórficas (Valencia *et al.*, 2013; Schaaf *et al.*, 2020), está localizado el Graben de Puerto Vallarta (GPV) que fue probablemente formado en el Mioceno (Ferrari *et al.*, 1994). Al igual que los grábenes de la SMO del Oligoceno tardío al Mioceno temprano, el GPV habría controlado y preservado parcialmente las vertientes del cañón submarino que se encuentra en Bahía de Banderas (Álvarez, 2002).

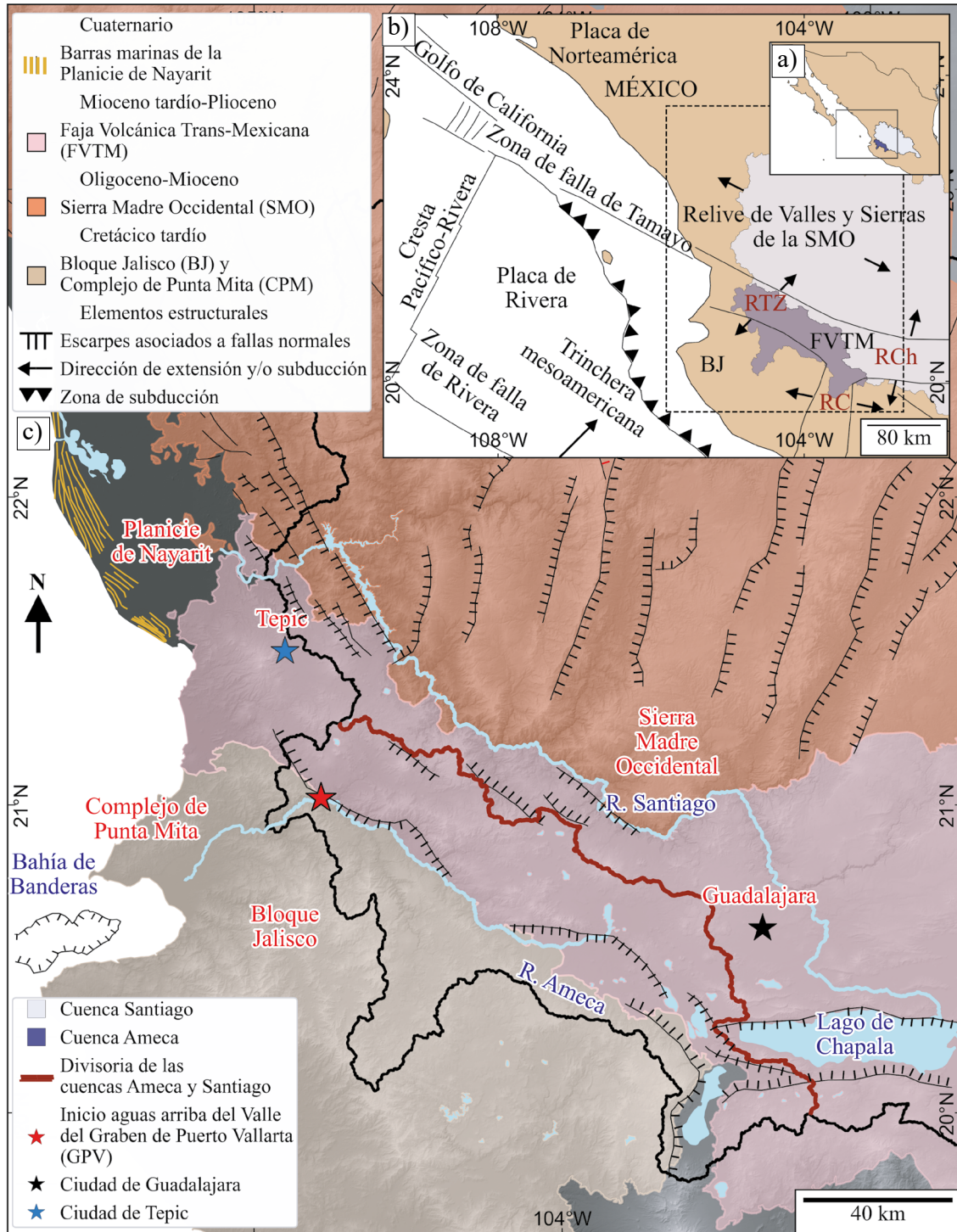


Figura 2. a) y b) Ubicación del área de estudio en su contexto tectónico (Delgado-Granados, 1993), mostrando la influencia del desarrollo del *rift* Tepic-Zacoalco (RTZ), el *rift* de Colima (RC) y el *rift* de Chapala (RCh) y c) el contexto geológico (Ferrari *et al.*, 2007, 2012, 2013, 2018).

Por lo tanto, el GPV pudo haber fungido como la principal vía de descarga de sedimentos provenientes de la SMO, previo a la actividad de la FVTM al occidente como se discutirá más adelante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procesamiento de los zircones detríticos

Las muestras provenientes de las desembocaduras cerca de los frentes montañosos de los ríos Santiago y Ameca (Tabla 1), junto con algunas cuencas tributarias, fueron colectadas en trabajos de campo y posteriormente procesadas y analizadas en el Laboratorio de Estudios Isotópicos del Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), en el campus de Juriquilla, Querétaro. La recolección de muestras se hizo bajo la premisa de que los sedimentos contenidos en los sedimentos del fondo de los canales activos preservan sedimentos previos al emplazamiento de la FVTM a partir del Mioceno tardío, ya que los sedimentos antiguos en el curso bajo de los ríos pueden permanecer sin alteración en reservorios o zonas de amortiguamiento (Allen, 2017).

Las muestras de sedimento colectadas en el lecho de los ríos fueron tamizadas para obtener la fracción de arenas (<500 µm). Cada muestra fue tamizada para obtener la fracción de *circa* 70 µm de la cual se tomó una cantidad de ~15 g para agitarla con agua en un vaso de precipitados. El material en suspensión se removió, mientras que el material depositado en el fondo del vaso, que es más denso y contiene a los zircones, se diferenció de los minerales ferromagnesianos por medio de un separador magnético Frantz. Este material fue guardado en cajas Petri y examinado en un microscopio óptico para extraer un número aproximado de 100 zircones por cada muestra, se procuró seleccionar los zircones sin ningún sesgo de forma o color a fin de obtener una muestra heterogénea (Anexo 1). El proceso de decantación se realizó en distintas porciones de la muestra hasta coleccionar el número deseado de zircones detríticos, ya que la cantidad de estos minerales es variable para la cantidad tomada de cada muestra (Anexo 1).

Los zircones identificados en el microscopio fueron colocados en una cinta adhesiva traslúcida unida a un vidrio. Cada muestra de zircones detríticos fue reposicionada a una resina que fue pulida para obtener una superficie lisa en todos los cristales, lo anterior permitió tomar fotografías por medio de catodoluminiscencia (Anexo 1 y 2) con un luminoscopio ELM-3 que opera a 5 kV a un vacío de 40 mtorr. Los zircones fotografiados con esta técnica son traslucidos, en otro caso corresponden a otro mineral (p. ej. apatitos). Cada muestra tuvo una fotografía de luz natural y una con catodoluminiscencia, las cuales fueron procesadas con el programa GeoStar® (Applied spectra, 2018). El programa mencionado se usó para trazar un mapa que indica el orden que el láser siguió para muestrear las capas externas de los zircones detríticos, y después hacer el fechamiento por U y Pb.

Tabla 1. Localización de las muestras de sedimentos tomadas en las desembocaduras de las cuencas.

Cuencas muestreadas	Norte	Oeste
Santiago	21° 49' 48" N	-105° 7' 1.2" O
Ameca	20° 45' 14.4" N	-105° 13' 26.4" O
Ac15-6	20° 57' 18" N	-104° 40' 4.8" O
Atenguillo	20° 55' 15.6" N	-104° 37' 12" O
Ac15-1	20° 49' 30" N	-104° 23' 27.6" O
Zacoalco	20° 18' 36" N	-103° 35' 56.4" O

Los zircones detríticos en la probeta fueron montados en el sistema *Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (LA-ICP-MS), con lo cual es posible detectar el mapa de muestreo con el programa GeoStar® (Applied spectra, 2018). El sistema LA-ICP-MS está armado con un láser de excímeros (ArF) LPX-Pro con celda de ablación S-155 y un cuadrupolo modelo ICAP Qc, de la marca Thermo. El U y Pb radiogénico de las capas más externas de los zircones fueron liberados con el láser y contabilizados para obtener la edad de la cristalización, a la par, la cantidad de Elementos de Tierras Raras (ETR) presente en las capas externas fue contabilizada para cada zircón, las ETR analizadas corresponden a los elementos La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb y Lu (Taylor y McLennan, 1981; Rudnick y Fountain, 1995; Roy *et al.*, 2010).

Los zircones detríticos fueron filtrados seleccionando sólo aquellos con edad inferior al Cretácico tardío (100 Ma), ya que esa temporalidad comprende los elementos que afloran en el área de estudio. Las edades de los zircones de cada cuenca y subcuenca se graficaron en histogramas para identificar los zircones del Oligoceno tardío-Mioceno temprano. Posteriormente, las concentraciones de las ETR (ppm) en los zircones se compararon con el *test* no paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, el cual permitió identificar semejanzas en la composición química para determinar si los materiales de las cuencas y subcuencas son equiparables entre sí, *i.e.* si los zircones detríticos del Oligoceno tardío-Mioceno temprano identificados son químicamente semejantes y corresponden a la SMO. El *test* Kolmogorov-Smirnov compara la distribución de las frecuencias acumuladas de dos muestras escogidas para obtener la discrepancia máxima (*D*). El valor *D* se compara con la tabla de valores *p* de tal forma que si *p* > 0.05 no se rechaza la hipótesis nula, es decir, la distribución de los valores de una misma variable en las muestras comparadas no es diferente, pero si *p* < 0.05 se acepta la hipótesis alternativa que indica que la distribución de los valores de una misma variable en ambas muestras es diferente. Las pruebas Kolmogorov-Smirnov se realizaron mediante la librería Scipy (Virtanen *et al.*, 2020), disponible en el lenguaje de programación Python.

Las concentraciones de las ETR (ppm) en los zircones detríticos fueron normalizadas con las concentraciones de las ETR registradas en las condritas (Taylor y McLennan, 1981), las concentraciones normalizadas se graficaron por cuenca y subcuenca para visualizar patrones que indiquen semejanzas en composición química.

La geocronología de los zircones de este estudio fue complementada con los datos publicados por Fletcher *et al.* (2007), quienes utilizaron los zircones detríticos en los sedimentos del río Ameca para esclarecer el origen del abanico Magdalena en la península de California. Finalmente, para cada muestra las concentraciones de las ETR y las edades de zircones se analizaron con un escalamiento multidimensional, o *Multidimensional Scaling* (MDS), para esclarecer si hay agrupaciones. El MDS es un análisis de similitud entre las variables de cada elemento de una muestra por medio de una matriz de proximidad o de distancias, de la cual se obtienen dos componentes que, al graficarse en un espacio bidimensional, representan la similitud o lejanía de los elementos de una muestra. El MDS es similar al análisis de componentes principales o *Principal Component Analysis* (PCA), no obstante, la técnica PCA se basa en correlaciones existentes entre variables de los elementos de cada muestra, mientras que el MDS se basa en las diferencias entre variables de los elementos de cada muestra. Por lo tanto, la técnica MDS se empleó para encontrar agrupaciones de zircones detríticos, las cuales estén determinadas por variables tales como los ETR y edad de cristalización calculada de las concentraciones de U y Pb. El análisis MDS se realizó en el lenguaje de programación Python por medio de un código previamente desarrollado y disponible en las librerías del lenguaje.

Debido a que los zircons detríticos disponibles para esta investigación son escasos, los análisis descritos no tuvieron un filtro basado en la discordancia de las edades determinadas con el método U-Pb. No obstante, los diagramas de concordia (Anexo 3) e histogramas (Anexo 4) sí fueron elaborados con los zircons concordantes. Los datos geoquímicos obtenidos de todos los zircons están disponibles en las tablas por muestra del Anexo 5.

Morfometría de los ríos del centro-occidente de México

El análisis morfométrico se elaboró a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 90 m obtenido del sitio OpenTopography (2019), del cual se delimitó la red de drenaje con el programa LSDTopoTools (Land Surface Dynamics Topographic Tools, 2019). Se estableció un área de drenaje mínima de 1 km para obtener la red de drenaje en la que predominan los procesos fluviales sobre los de ladera (p. ej. Montgomery y Foufoula-Georgiou, 1993). De esta forma se delimitaron las cuencas de los ríos Ameca y Santiago, así como sus subcuencas o cuencas internas.

La extracción de la red de drenaje se usó para explorar la movilidad de divisoria del sector occidental de la FVTM. Los cambios y ajustes en las divisoria se han planteado como respuestas del sistema fluvial ante controles ejercidos en su mayoría por la tectónica (Willet *et al.*, 2014; Whipple *et al.*, 2017). Estas respuestas son desequilibrios que tienden hacia un estado de balance donde las tasas de erosión sean equiparables en todo el sistema fluvial (Whipple, 2001). Para el caso de las divisoria, la migración horizontal, la cual es una erosión remontante, tiende a compensar el área de drenaje y el gradiente de las vertientes (Willet *et al.*, 2014). El desequilibrio de las vertientes puede ser analizado mediante la métrica de Gilbert (p. ej. Forte *et al.*, 2018) o a través de la linealización de perfiles fluviales e integrando el área de drenaje expresada en valores denominados χ de tal forma que (Perron y Royden, 2013):

$$\chi = \int_{x_0}^x \left(\frac{A_0}{A(x)} \right)^m dx \quad (1)$$

Donde x es la distancia desde la desembocadura de la cuenca principal, A corresponde al área de drenaje, m y n son variables cuya relación determina el cambio de los valores χ a lo largo del perfil, m/n tiene un valor de referencia aproximado a 0.45 (Whipple y Tucker, 1999) y que se considera como la concavidad, el valor $A_0 = 1 \text{ km}^2$ se utiliza como el área crítica donde predominan los procesos fluviales (cf. Montgomery y Foufoula-Georgiou, 1993). Los valores χ representan las diferencias en incisión, de tal modo que relieves en desequilibrio muestran una asimetría en las gráficas de los valores χ versus elevación de las vertientes (Willet *et al.*, 2014) (Figura 3a), donde los ríos con mayor pendiente en la regresión lineal χ versus elevación son más erosivos e incentivan la erosión remontante de las cabeceras, y en consecuencia corresponden a vertientes 'agresoras'. La migración ocurre hacia áreas donde la pendiente de los perfiles χ es menor, el equilibrio ocurre hasta que la pendiente en ambas vertientes es similar (Figura 3b). Los desequilibrios en los valores χ de las vertientes muestran que aquellas con mayor pendiente tienen valores χ menores respecto a las laderas con menor pendiente, de tal suerte que la migración de las divisoria es de los valores χ menores a los mayores (Figura 3). La migración de divisoria está también afectada por las características del sustrato rocoso, en los que influye la dureza y porosidad, así como la distribución de fracturas y fallas. En algunos casos, los flujos subterráneos, también favorecen el desgaste y la consecuente migración de las divisoria (Crosby, 1937; Bishop, 1995). Para esta investigación sólo se consideró identificar qué vertiente es más 'agresiva', sin considerar de qué forma influye la variabilidad litológica en la erosión de las vertientes y en la tasa de movilidad de las divisoria.

Los valores χ se calcularon con LSDTopoTools, aquellos que están en la vertiente norte de la FVTM (cuenca del río Santiago) fueron cartografiados y usados para hacer una regresión lineal con los valores de elevación. El proceso anterior se repitió para la vertiente sur de la FVTM (cuenca del río Ameca). Con los datos obtenidos se compararon ambas vertientes. La comparación de valores χ en las vertientes de la FVTM permitió dilucidar qué vertiente es más erosiva y controla la movilidad de la divisoria principal. El análisis con los valores χ fue complementado por medio de un perfil de barrido (*swath profile*) para el cual se utilizaron rectángulos de 1 km de ancho por 100 km de largo y alineados con los ríos Ameca y Santiago, a fin de cubrir la zona occidental de la FVTM. Para cada rectángulo se calculó la elevación mínima, media y máxima, de tal forma que se represente al relieve local o incisión total de las vertientes (p. ej. Montgomery y Brandon, 2002). Se procuró que dentro del perfil de barrido los ríos Ameca y Santiago fueran muestreados de forma perpendicular para con ello resaltar entre ambos las diferencias principales en términos de incisión. Finalmente, dentro del área del perfil de barrido, se calculó el volumen actual del perfil de los ríos Ameca y Santiago con el fin de estimar y comparar su incisión actual.

Análisis de la preservación del relieve de la SMO

Bajo la hipótesis de que el relieve de la SMO está parcialmente preservado desde el Mioceno temprano, los ríos principales de norte a sur, particularmente los ríos Bolaños y Juchipila, habrían sido parte de la conexión de la SMO con la Bahía de Banderas y posteriormente truncados en el Mioceno tardío por el volcanismo asociado a la FVTM.

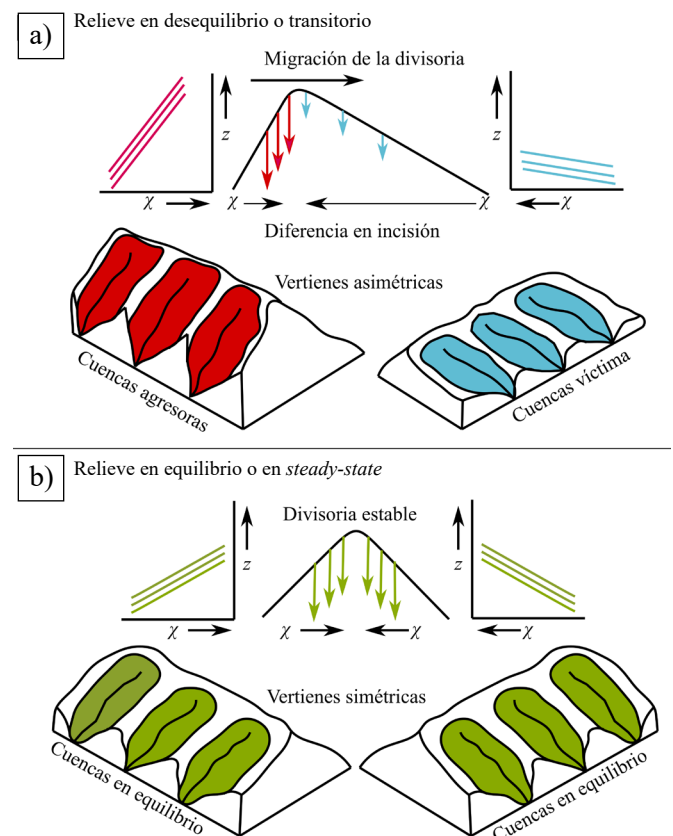


Figura 3. La asimetría en el gradiente de las vertientes está reflejada en los valores χ , el desequilibrio fomenta la erosión remontante y un mayor gradiente (a), lo cual resulta en la migración de la divisoria a fin de alcanzar el equilibrio (simetría) entre las vertientes (b).

Con base en lo anterior, se hizo una reconstrucción aguas abajo de los perfiles de los ríos mencionados para validar si tales ríos vertían a las partes internas de la actual cuenca del río Ameca (Figura 4). La reconstrucción se hizo mediante el planteamiento de Hack (p. ej. Rigon *et al.*, 1996) en el cual:

$$L = CA^H \quad (2)$$

Donde la longitud del canal principal (L), medida desde la cabecera, se incrementa de forma potencial en función del área de drenaje (A); H es el factor de elongamiento de la cuenca y C es la constante de la magnitud del tamaño de la cuenca en A . A fin de

representar de forma más aproximada el área de drenaje existente para los ríos del Mioceno, se omitió el área de drenaje proveniente de algunos sectores adyacentes a las vertientes que correspondiera a capturas de drenaje posteriores al Mioceno temprano (Figura 4). Los ríos Bolaños y Juchipila tienen *knickpoints* en sus transectos próximos al río Santiago, lo cual sugiere que pueden ser producto del levantamiento flexural asociado a la incisión promovida por el RTZ (Montgomery y López-Blanco, 2003) (Figura 4). Los segmentos aguas debajo de los *knickpoints* mencionados tienen una verticalidad pronunciada que no correspondería con la morfología preservada del Mioceno temprano, por lo tanto, fueron omitidos en la proyección de perfiles (Figura 4).

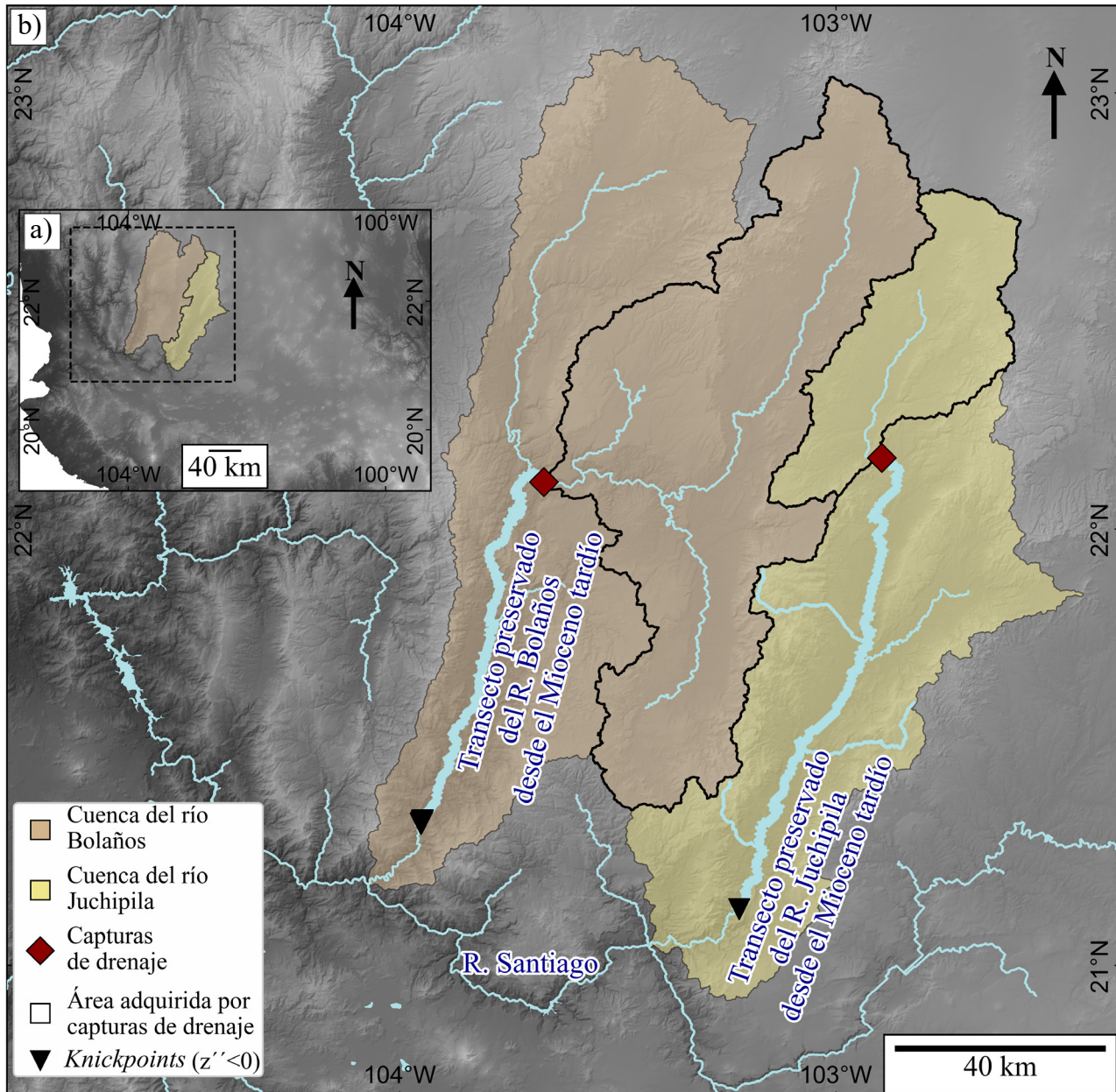


Figura 4. a) Contexto de los ríos Bolaños y Juchipila. b) Mapa de las principales capturas de drenaje en las cuencas de los ríos (R.) Bolaños y Juchipila. Los transectos más gruesos resultan de la remoción del área de drenaje de las capturas, aquella que ya no corresponde al área original drenada por los grábenes. Los *knickpoints* fueron delimitados por medio de la segunda derivada de la elevación (z'') desde aguas arriba y se extrajeron aquellos valores por encima del cuantil 0.99 y debajo del cuantil 0.01, los *knickpoints* $z'' < 0$ corresponden a incrementos de gradiente aguas abajo, *i.e.* el límite del levantamiento más reciente.

A partir de los *knickpoints* que truncan a los ríos Bolaños y Juchipila, se extrapolaron aguas abajo los valores L en función de la distancia diagonal de los píxeles del DEM con resolución de 90 m (*i.e.* 120 m) hasta una distancia donde hipotéticamente estaría el GPV, y los coeficientes del intercepto y la pendiente de la función potencial de Hack se usaron de forma inversa para estimar el área de drenaje en cada punto de las distancias aguas abajo extrapoladas. Simultáneamente, se probó la ley de Flint (1974) en la cual:

$$S = k_s A^{-\theta} \quad (3)$$

Donde S es la pendiente del canal (m/m), A el área de drenaje, k_s el índice de verticalidad y θ corresponde a la relación que describe parámetros hidráulicos del canal y que conforman la concavidad. Ya que los valores S y la primera derivada de la elevación (z') tienen una correlación cercana a 100 %, los últimos valores se emplearon porque permiten una reconstrucción de la elevación mediante una sencilla discretización de los valores y sin necesidad de omitir datos como ocurre si se muestrea S . Los coeficientes de la función potencial de Flint se usaron en los valores de área de drenaje predicha para estimar los valores z' , estos últimos fueron sumados de forma acumulativa, desde la parte más distal de los perfiles extrapolados y restados al valor de elevación correspondiente al *knickpoint* que limita el relieve preservado del Oligoceno-Mioceno temprano. Lo anterior permitió una reproyección parcial aguas debajo de los perfiles y reconstruir una posible configuración de los perfiles previa al emplazamiento de la FVTM.

RESULTADOS

Cronología de los zircones detríticos de las cuencas Ameca y Santiago

Las edades de los zircones detríticos en el curso bajo de las cuencas del occidente de México (Figura 5a y 5b) muestran que para la cuenca Santiago, la mayoría de las edades está en un intervalo de ~30 a 20 Ma que corresponde al Oligoceno tardío al Mioceno temprano (Figura 5c). Las edades determinadas en este estudio son consistentes con las obtenidas por Fletcher *et al.* (2007) en las porciones sur de la SMO (Figura 5d). Para el caso de la cuenca Ameca, la mayoría de las edades está en un intervalo de ~80 a 60 Ma que corresponde al Cretácico tardío (Figura 5e) y es concordante con la cronología de Fletcher *et al.* (2007) para las porciones norte del BJ (Figura 5f). No obstante, los datos de la cuenca Ameca registran un segundo grupo de edades ubicadas entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano (Figura 5e) y que son más antiguas a la edad establecida para el volcanismo de la FVTM en el Mioceno tardío (Gómez-Tuena *et al.*, 2007). Los ríos que inciden en la parte meridional de la FVTM y alrededor del lago Zacoalco (Figura 5b) también presentan zircones de edades entre el Oligoceno tardío y el Mioceno temprano (Figura 5g, 5h y 5j).

Las pruebas de Kolmogorov-Smirnov utilizadas para comparar la distribución de las ETR de los zircones detríticos del Oligoceno tardío-Mioceno temprano indican que la distribución de las ETR no es distinta para todas las cuencas y ríos tributarios (Tabla 2, valores $p > 0.05$), lo que confirma que son químicamente similares. Sin embargo, las pruebas de Kolmogorov-Smirnov hechas en las ETR de los zircones detríticos y del Paleoceno-Eoceno (Tabla 3) y del Cretácico tardío (Tabla 4) indican que no hay una afinidad química dominante en las ETR, esto último apunta a que los zircones son, de forma general, químicamente diferentes ($p < 0.05$), aunque tengan una temporalidad similar.

Las gráficas de concentraciones normalizadas de las REE muestran que los zircones del Oligoceno tardío-Mioceno temprano tienen una

firma similar en las cuencas y subcuencas (Figura 6). Por otra parte, el análisis del MDS revela que los zircones detríticos correspondientes al Oligoceno tardío-Mioceno temprano tienen una agrupación similar en las cuencas y ríos tributarios muestreados, con excepción de la subcuenca Atenguillo que erosiona al interior del BJ (Figura 7). Lo anterior también sugiere que la composición química de los zircones detríticos es similar. La Figura 7 muestra que los zircones detríticos correspondientes al Cretácico tardío y al Paleoceno-Eoceno no tienen una agrupación similar que apoye una composición química semejante para las cuencas muestreadas.

Dinámica de las vertientes en el sector occidental de la FVTM

El análisis de las divisorias en el relieve occidental de la FVTM, por medio de una relación lineal de los valores χ versus elevación en los ríos, muestra que la vertiente de la cuenca Santiago tiene un gradiente mayor respecto a la del río Ameca (Figura 8), lo cual favorece la erosión remontante con dirección al sur y, por tanto, es el componente de migración de la divisoria (*cf.* Willet *et al.* 2014). El perfil de barrido a lo largo del occidente de la FVTM también resalta que las vertientes que convergen al río Santiago son más incisivas respecto a las que convergen al río Ameca ya que presentan un mayor desnivel, aunque

Tabla 2. Valores p de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov en los ETR de los zircones detríticos del Oligoceno tardío-Mioceno temprano. Los valores $p > 0.05$ (donde la distribución de los ETR no es diferente) están resaltados en negritas.

Cuencas comparadas	ETR (ppm)						
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Santiago Ameca	<0.01	>0.05	<0.05	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Ac15-6	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Ac15-1	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.01	>0.05
Santiago Zacoalco	>0.05	<0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	
Santiago Ameca	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Ac15-6	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Ac15-1	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Zacoalco	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

Tabla 3. Valores p de las pruebas de Kolmogorov-Smirnov en los ETR de los zircones detríticos del Paleoceno-Eoceno. Los valores $p > 0.05$ (donde la distribución de los ETR no es diferente) están resaltados en negritas.

Cuencas comparadas	ETR (ppm)						
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd
Santiago Ameca	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.05	<0.01
Santiago Ac15-6	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	<0.01	>0.05
Santiago Atenguillo	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01
Santiago Ac15-1	<0.05	>0.05	<0.01	<0.01	<0.01	>0.05	<0.05
Santiago Zacoalco	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu	
Santiago Ameca	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05
Santiago Ac15-6	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05
Santiago Atenguillo	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Santiago Ac15-1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Santiago Zacoalco	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05	>0.05

existe mayor variabilidad para la porción de la vertiente sur (Figura 9). Aunado a lo anterior, resalta el hecho que el río Santiago presenta una mayor incisión con respecto al río Ameca, sobre todo si se toma como referencia el área del perfil de barrido y el supuesto de que ambos ríos ya disecaban el relieve desde finales del Mioceno y son previos al emplazamiento de la FVTM. En tal caso, el río Santiago habría tenido un 60% de mayor incisión respecto al río Ameca (Figura 10).

DISCUSIÓN

Procedencia de los materiales del Oligoceno tardío-Mioceno temprano en el centro-occidente de México

Los análisis de los zirrones detríticos de las cuencas y ríos tributarios del occidente de México indican que el material del Oligoceno tardío-Mioceno temprano, presente en la cuenca Santiago,

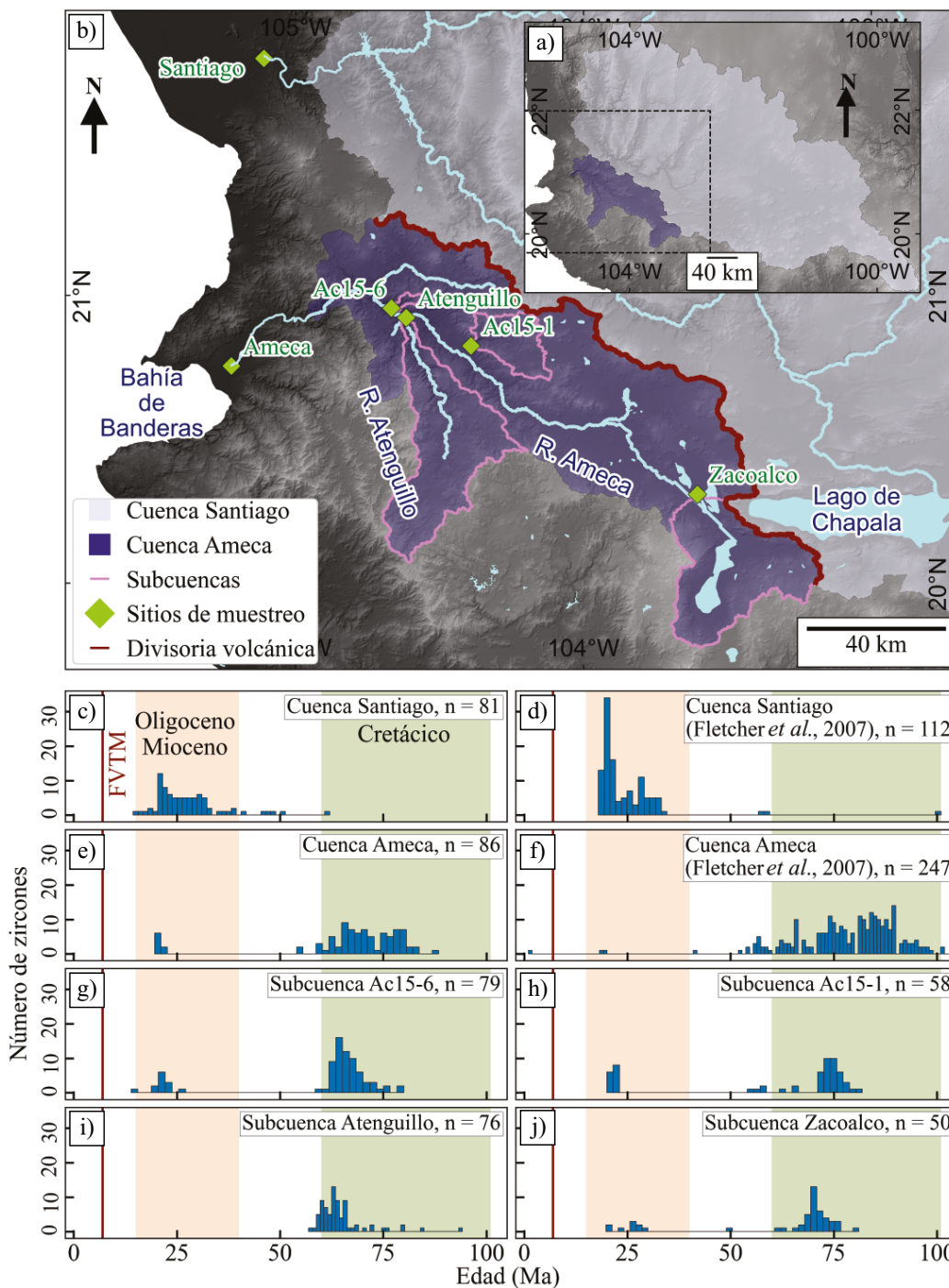


Figura 5. a) Ubicación de las cuencas Ameca y Santiago. b) Sitios de muestreo de las cuencas Ameca y Santiago. c) Distribución de los zirrones detríticos de la SMO usados para este trabajo. d) Distribución de los zirrones detríticos de la SMO del trabajo de Fletcher *et al.* (2007). e) Distribución de zirrones detríticos de la cuenca Ameca y el BJ utilizados para este trabajo. f) Distribución de zirrones detríticos de la parte norte del BJ del trabajo de Fletcher *et al.* (2007). Subcuencas de la cuenca Ameca, g) subcuenca Ac15-6, h) subcuenca Ac15-1, i) subcuenca Atenguillo y j) subcuenca Zacoalco.

es químicamente equiparable al material encontrado en la cuenca Ameca y sus partes internas. En el caso de la cuenca Ameca, el relieve está conformado en su mayoría por rocas volcánicas del Plioceno de la FVTM (Gómez-Tuena *et al.*, 2007) y, en menor grado, por rocas graníticas, metamórficas y sedimentarias del Cretácico tardío-Jurásico en el BJ (Valencia *et al.*, 2013; Schaaf *et al.*, 2020), por tanto, los zircones detríticos del Oligoceno tardío-Mioceno temprano en la cuenca Ameca pudieran corresponder a sedimentos de la SMO.

La interacción del arco magmático del área del BPV durante el Cretácico tardío al Paleoceno-Eoceno (Valencia-Moreno *et al.*, 2021; Schaaf *et al.*, 2020) generó una variabilidad litológica que posiblemente está registrada en los zircones detríticos provenientes de las partes internas de la cuenca Ameca, esta misma variabilidad explica la falta de afinidad química detectable con las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y el MDS (Tablas 3 y 4, Figura 7). Los zircones detríticos del Paleoceno-Eoceno de la cuenca Santiago corresponderían al primer episodio formativo de la SMO (McDowell y Keizer, 1977), este origen

Tabla 4. Valores *p* de las de pruebas Kolmogorov-Smirnov en los ETR de los zircones detríticos del Cretácico tardío. Los valores *p*>0.05 (donde la distribución de los ETR no es diferente) están resaltados en negritas.

Cuencas comparadas	ETR (ppm)							
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	
Atenguillo Ameca	> 0.05	> 0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	<0.01	
Atenguillo Ac15-6	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	<0.01	> 0.05	
Atenguillo Ac15-1	> 0.05	<0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	<0.01	> 0.05	
Atenguillo Zacoalco	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	<0.05	> 0.05	<0.01	
	Tb	Dy	Ho	Er	Yb	Lu		
Atenguillo Ameca	<0.01	<0.05	<0.05	<0.01	<0.05	<0.05		
Atenguillo Ac15-6	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05	> 0.05		
Atenguillo Ac15-1	> 0.05	> 0.05	<0.05	<0.01	<0.01	<0.01		
Atenguillo Zacoalco	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		

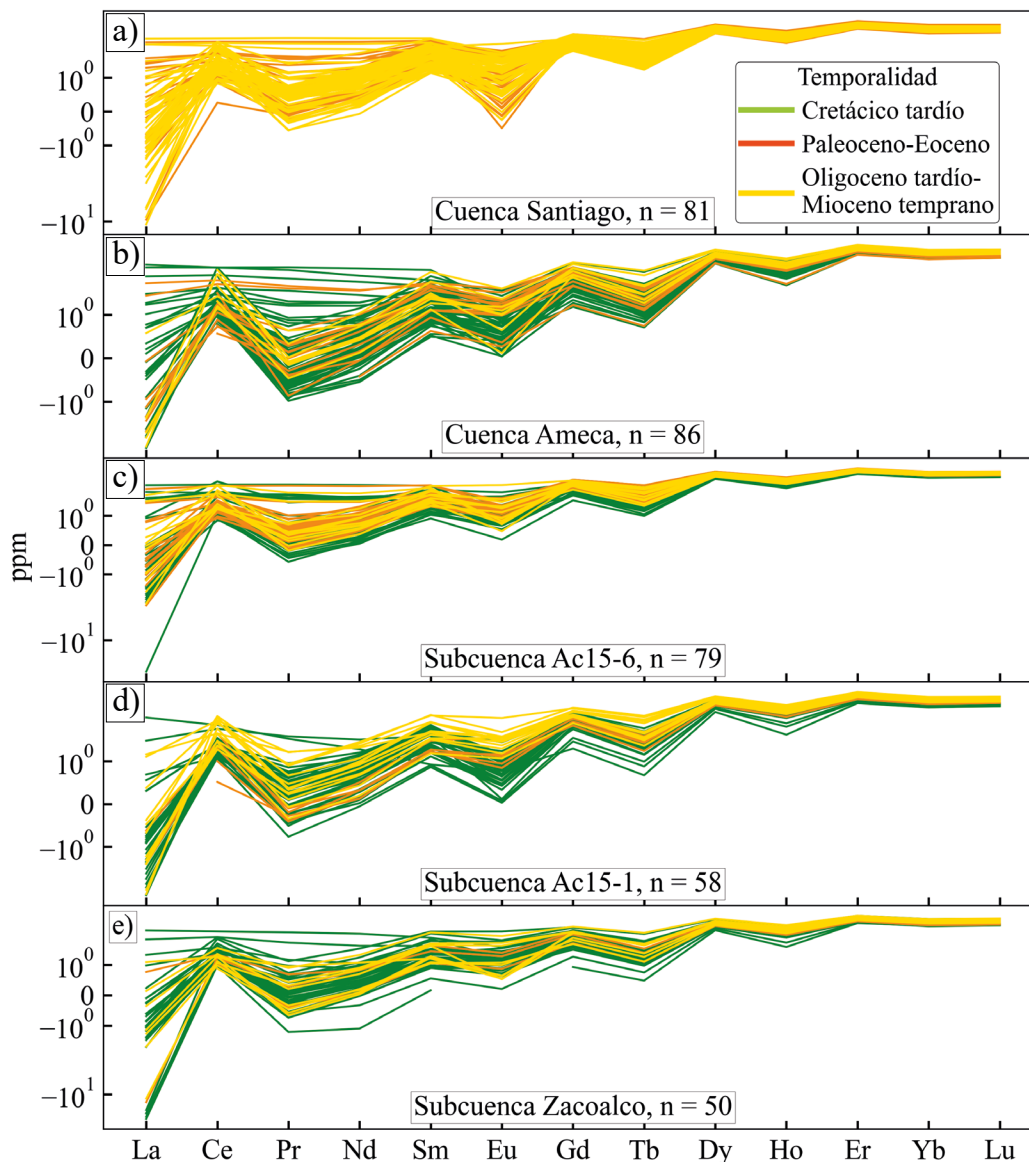


Figura 6. Concentraciones de los ETR normalizadas con las concentraciones de ETR en las condritas (Taylor y McLennan, 1981).

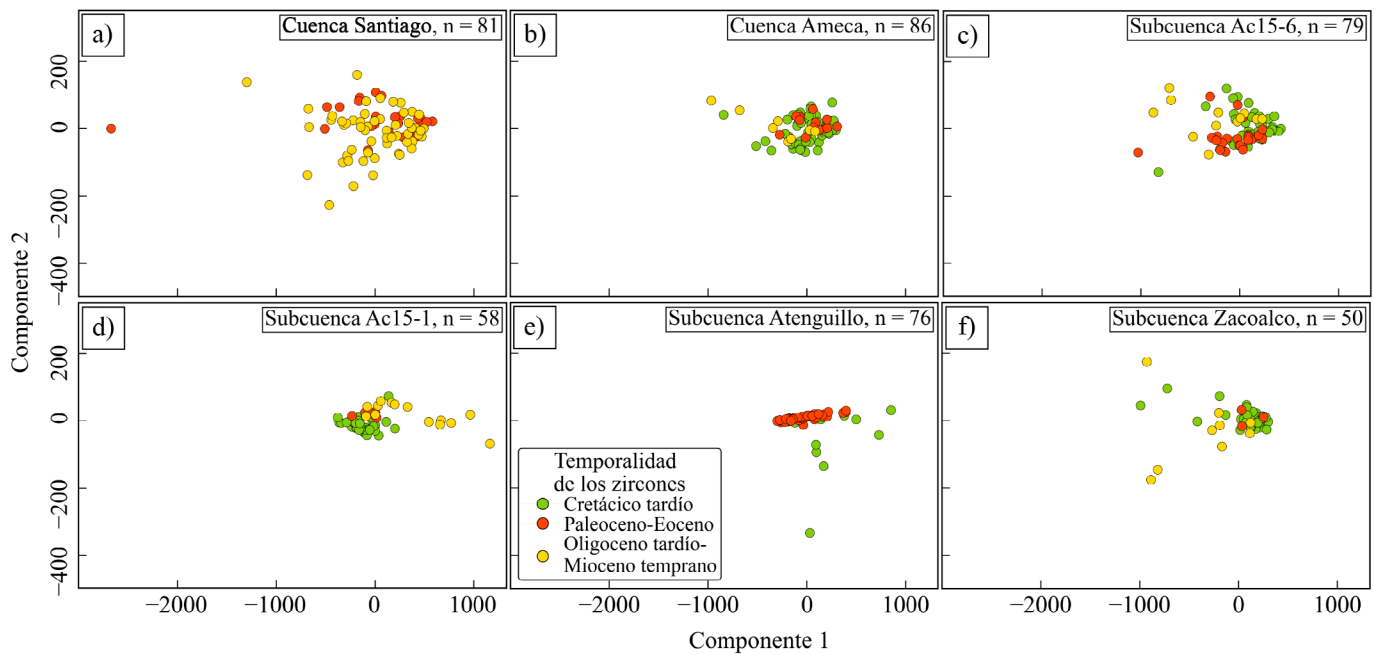


Figura 7. Figura del análisis MDS (*Multidimensional scaling*). El componente 1 es el vector de la matriz de distancia que explica la mayor variación de las ETR, el componente 2 es el vector de la matriz de distancia que explica la segunda mayor variación de las ETR.

es diferente al del arco magmático del BPV (Valencia-Moreno *et al.*, 2021) y es explicativo de la falta de afinidad química con la cuenca Ameca y sus ríos tributarios.

Debido a la limitada disponibilidad de datos geocronológicos, es complicado afirmar concluyentemente una conexión de la SMO hacia la planicie de la Bahía de Banderas; en este sentido, es por ello necesaria una investigación con más sitios de muestreo a fin de confirmar de forma robusta la conexión fluvial antigua durante el Oligoceno tardío-Mioceno temprano.

Efectos del emplazamiento de la FVTM en la movilidad de los materiales de la SMO

El planteamiento de una conexión entre la SMO con la Bahía de Banderas antes del Mioceno temprano implicaría que los ríos Bolaños y Juchipila habrían trasladado material erosionado de las rocas volcánicas emplazadas en el Oligoceno tardío-Mioceno temprano a porciones que hoy corresponderían a la cuenca del río Ameca, para posteriormente ser movilizadas a través del GPV, una vía que ya estaba formada para el Mioceno temprano (Ferrari *et al.*, 1994), y finalmente depositadas en la planicie de la Bahía de Banderas (Figura 11a).

El volcanismo generado al occidente de la FVTM, a partir del Mioceno tardío (p. ej. Gómez-Tuena *et al.*, 2007; Ferrari *et al.*, 2012), formó una barrera topográfica que muy probablemente desvió la ruta de evacuación de los sedimentos transportados por los ríos Bolaños y Juchipila hacia el occidente, por medio del recién formado río Santiago, mismo que ha construido una extensa planicie en la costa de Nayarit con edad estimada en ~6 a 7 ka y con barras formadas hace ~2 ka (Muñoz-Salinas *et al.*, 2018) (Figura 11b). Lo anterior indica que el río Santiago es un elemento muy reciente en el tiempo geológico y que ha generado un cambio en el patrón de la movilidad del sedimento proveniente de la SMO con el límite noroccidental de la FVTM (Figura 2). El relieve volcánico al occidente de la FVTM produjo un arreglo de las estructuras, de tal forma que se formó una nueva divisoria que, muy probablemente, aisló a la cuenca del río Ameca, la cual transportaba material del centro-occidente de México hacia la bahía de Banderas

a través de los semi-grábenes meridionales del RTZ y el GPV (Figura 11a). El suministro de materiales de la cuenca Ameca está actualmente limitado al acarreo de materiales provenientes de la FVTM y del BJ. El marco de circunstancias descrito en el modelo de la Figura 11 podría explicar por qué la planicie de la Bahía de Banderas tiene material del Oligoceno tardío al Mioceno temprano procedentes de las rocas volcánicas de la SMO.

Proponemos que durante el Oligoceno-Mioceno, el BJ habría sido un relieve mayoritariamente granítico-metamórfico cubierto parcialmente por rocas volcánicas del Paleógeno temprano (Valencia-Moreno *et al.*, 2021; Schaaf *et al.*, 2020), sus afluentes drenarían hacia el GPV y la bahía de Banderas, junto con la carga proveniente de la SMO (Figura 11). Posteriormente, el volcanismo de la FVTM durante el Mioceno tardío y el Plioceno (Ferrari *et al.*, 2012) cubrió parcialmente el sector norte del BJ, y terminaría por aislar una porción del relieve que ahora corresponde a la cuenca del Río Ameca (Figura 11b).

La actividad volcánica de la FVTM bloqueó drenajes preexistentes situados en las porciones orientales de la cuenca Ameca, los productos volcánicos corresponden a andesitas y basaltos de ~4 a 1 Ma concentrados al occidente del lago de Chapala (Ferrari *et al.*, 2000). El volcanismo, además de interrumpir el aporte de materiales provenientes de la SMO hacia el área de Zacoalco, habría truncado el aporte proveniente del centro de México y generado el represamiento que actualmente corresponde al lago de Chapala (Castillo *et al.*, 2019; Figura 11b), este represamiento y su orientación también estaría favorecido por el Graben de Chapala (RCh) (Figura 2). Posteriormente el lago de Chapala comenzaría a verter su carga al río Santiago, y con ello se conformó la nueva vía de descarga de los ríos provenientes del centro de México (Figura 11b). Alatorre-Zamora *et al.* (2015) indican que los depósitos del lago de Chapala no tienen edades mayores a ~4 Ma. Esto último apoya el argumento de una obstrucción reciente del drenaje entre el Plioceno-Pleistoceno. La formación de las estructuras tectónicas y el emplazamiento del volcanismo de la FVTM generaron barreras topográficas que produjeron el aislamiento de la cuenca del río Ameca, la cual pudo ser parte de un sistema más grande que ero-

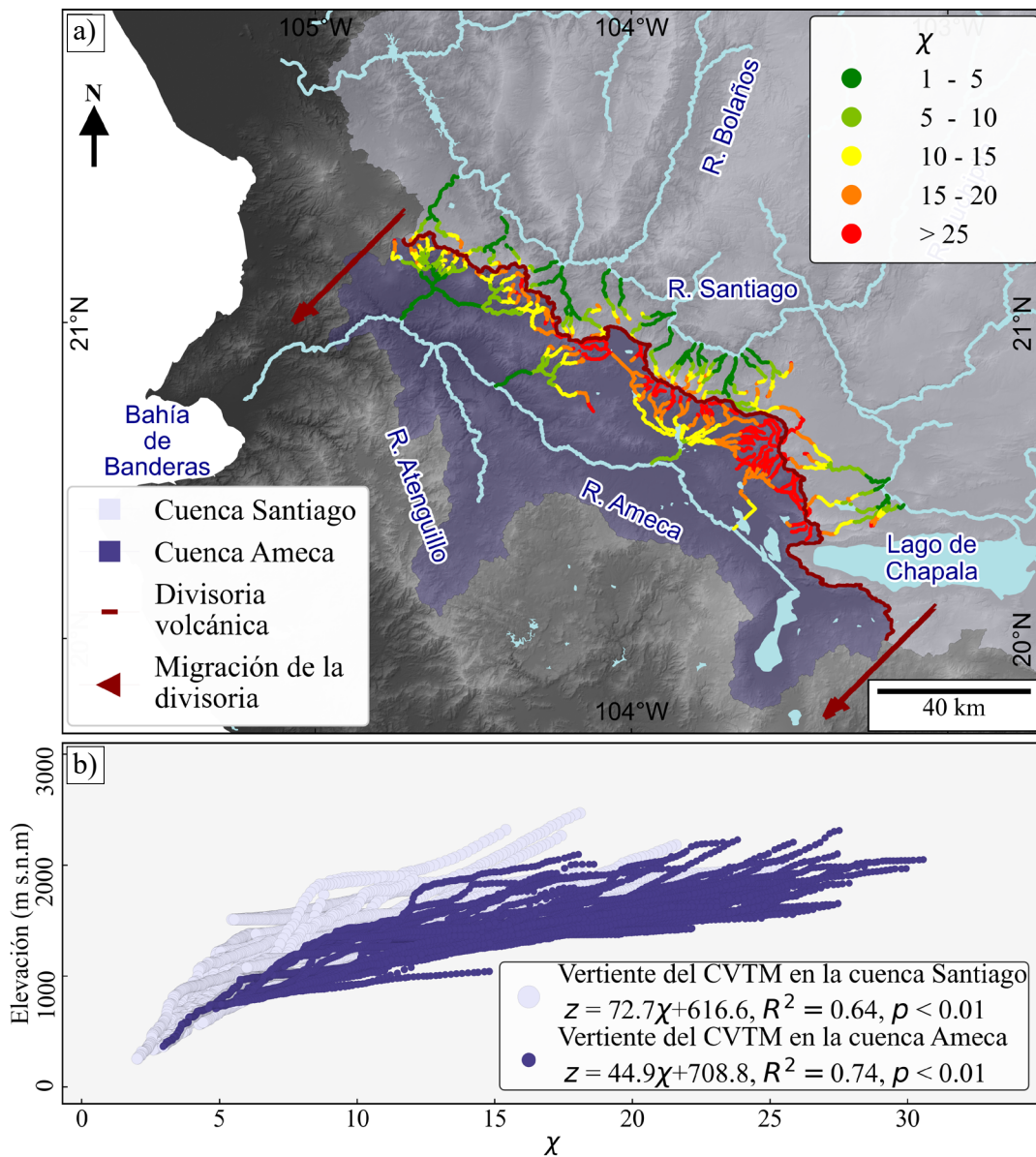


Figura 8. a) Mapa de distribución de los valores χ (integración del drenaje aguas arriba) de las vertientes de la FVTM, b) relaciones lineales χ versus elevación (z) de los ríos de las vertientes de la FVTM. Las relaciones lineales tienen correlaciones (R^2) elevadas con valor de significancia (p) < 0.01 , lo anterior valida el cambio de gradiente en la elevación como una razón de cambio de la integración del drenaje aguas arriba. La pendiente en las regresiones es mayor en la vertiente de la Cuenca Santiago, siendo ésta última más erosiva y la que controla la migración de la divisoria principal hacia el sur.

sionaba y transportaba materiales de la SMO y, muy probablemente, de las partes centrales de México.

Una explicación alternativa a la edad y composición de los zircons sería aquella basada en las investigaciones de Rosas-Elguera *et al.* (1997), Ferrari *et al.* (2003), Frey *et al.* (2007) y Alatorre Zamora *et al.* (2015), quienes indican que hay cantidades menores de ignimbritas de la SMO que subyacen a la FVTM. La presencia de zircons detríticos del Oligoceno tardío-Mioceno temprano en la cuenca del río Ameca podrían ser sólo prolongaciones del relieve y materiales la SMO subyacentes a la FVTM que están siendo erosionados y depositados en la planicie de la bahía de Banderas. Aunque la cuenca Ameca tiene material del Oligoceno tardío-Mioceno temprano, es difícil afirmar de forma concluyente que tal material corresponda a ignimbritas de la SMO transportadas por una antigua conexión fluvial a la bahía de

Banderas. Ya sea la existencia de una paleo-red fluvial o una porción de la SMO subyaciendo a la FVTM, el emplazamiento de la FVTM significó el desarrollo de una barrera topográfica que aisló a la cuenca Ameca, y generó una convergencia de los ríos de la SMO, de la FVTM, y del centro de México hacia lo que actualmente es el río Santiago, por el cual los sedimentos son llevados para alimentar a la planicie de Nayarit (Figura 11).

Preservación del relieve de la SMO y su interacción con el emplazamiento de la FVTM

La orientación y arreglo de la SMO ofreció las condiciones para extrapolar los transectos de los perfiles de los ríos Bolaños y Juchipila, asumidos como remanentes de la red de drenaje del Mioceno temprano (Figuras 4 y 12), y explorar si tuvieron una conexión de alguna forma

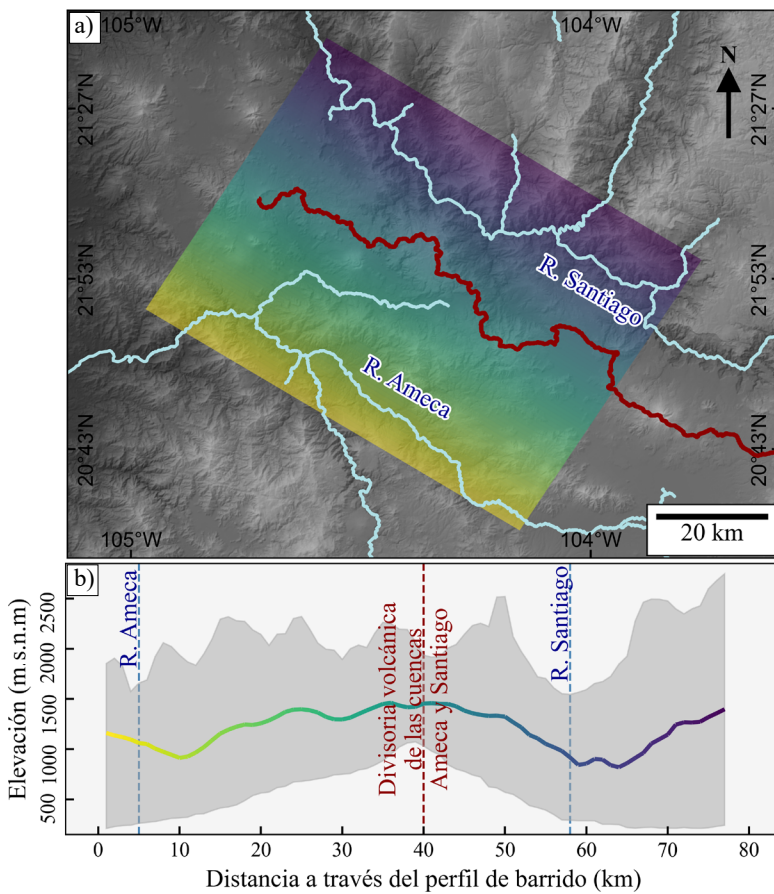


Figura 9. a) El perfil de barrido muestra, b) que la incisión en la vertiente norte es más homogénea y concentrada en el río Santiago. Por otra parte, en la vertiente sur, la incisión, aunque es significativa no está concentrada en el río Ameca. Lo anterior se traduce en una mayor capacidad erosiva por parte del río Santiago.

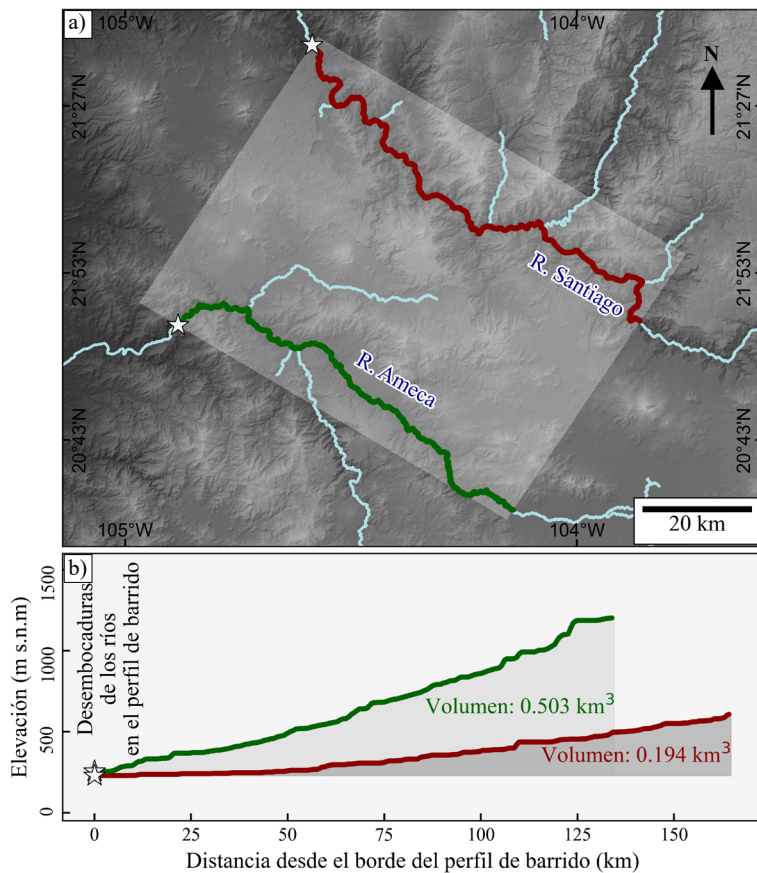


Figura 10. a) Comparación del volumen de los perfiles Ameca y Santiago dentro del perfil de barrido, b) el río Santiago ha incidido ~60 % más que el río Ameca desde el emplazamiento de la FVTM en el Plioceno.

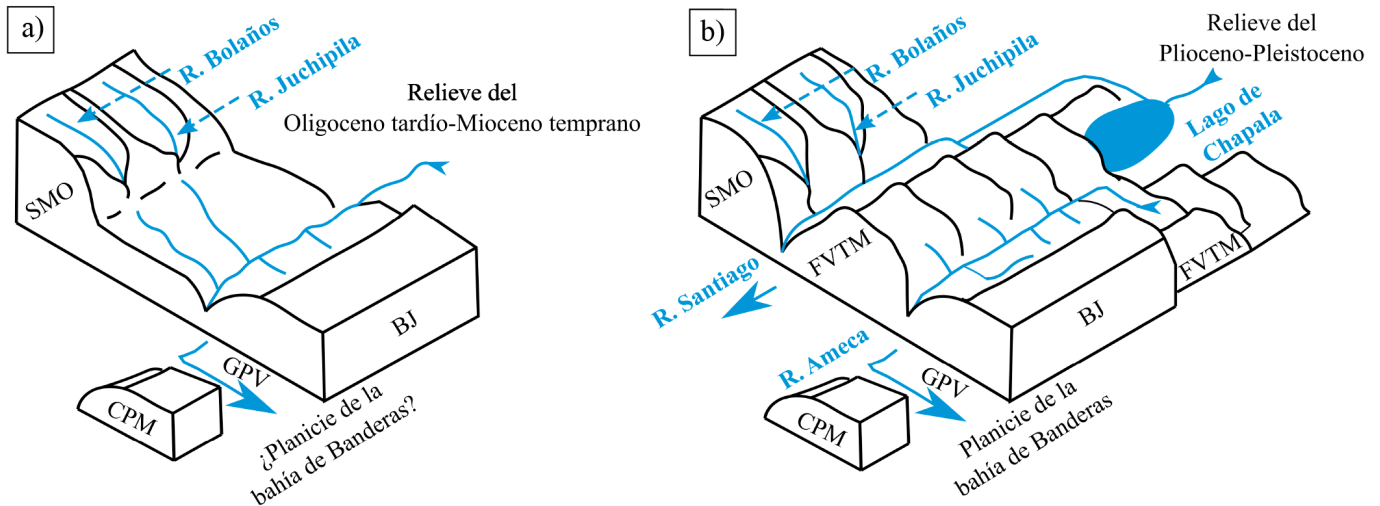


Figura 11. a) Paleorelieve de la SMO con una red fluvial que drenaba a la Bahía de Banderas, b) relieve actual después del emplazamiento de la FVTM, esta última corresponde al partagueas entre la cuenca Santiago y Ameca que redireccionaría los ríos homónimos principales. Los elementos que interactuaron en el reordenamiento del sistema fluvial son la Sierra Madre Occidental (SMO), el Bloque Jalisco (BJ), el Complejo de Punta Mita (CPM), el Graben de Puerto Vallarta (GPV) y la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM).

con el GPV. Las proyecciones lineales de estos ríos aguas abajo tienen una posición aproximada a la parte interna de la FVTM a una altura ligeramente mayor a la del GPV, lo cual apoya parcialmente la idea de que estos ríos habrían tenido una intersección con las fallas normales del RTZ, mismas que a su vez pudieron controlar ríos antiguos que drenaban hacia el GPV (Figura 12).

Los ríos provenientes de la SMO, entre ellos Bolaños y Juchipila, actualmente corresponderían a elementos 'agresores' hacia la FVTM, tales ríos estarían socavando a la FVTM principalmente en las intersecciones con el río Santiago. El proceso descrito estaría adelgazando la FVTM hacia el sur (Figuras 8, 9 y 10), de tal modo que los ríos de la SMO alcanzarían la configuración previa al emplazamiento de la FVTM, es decir, drenar nuevamente hacia la planicie de la bahía de Banderas a través del GPV. Para el caso concreto de los ríos Bolaños y Juchipila, la configuración que tienen es probablemente similar a la que tuvieron en el Mioceno temprano y que estaba orientada hacia el río Ameca y el GPV. La mayor erosión estaría concentrada en las intersecciones de los ríos de la SMO con el río Santiago, ya que las inflexiones de los ríos de la SMO, antes de su intersección con el río Santiago, están parcialmente proyectadas hacia el GPV y el río Ameca, lo que apoya el planteamiento de un desgaste de la FVTM hacia el sur (Figura 12).

La asimetría norte-sur en la incisión del extremo occidente de la FVTM, expresada en los modelos lineales X versus elevación y el perfil de barrido (Figuras 8 y 9), también está determinada, en parte, por la diferencia de tamaño y área de drenaje de las cuencas Santiago y Ameca. La cuenca de los ríos Santiago tiene un área de ca. 132, 536 km², esto es once veces mayor al área de la cuenca del río Ameca que es de ca. 11637 km². En la actualidad, la cuenca del río Santiago capta la escorrentía del centro de México y de la SMO (Figura 4), ello implica que la carga de sedimentos en el río Santiago sea mayor, así como su capacidad de incisión sobre los lechos rocosos (cf. Howard y Kerby, 1983; Howard *et al.*, 1994) (Figura 10). La incisión vertical del río Santiago generaría una inestabilidad en las laderas, posiblemente favorecida por el socavamiento lateral del cambio de rumbo súbito de los ríos que fluyen de la SMO hacia la FVTM. Dicha inestabilidad es posible que haya generado cambios locales en el nivel de base de los ríos y se haya propagado aguas arriba, a través de la migración

de *knickpoints* (cf. Whipple y Tucker, 1999). Esto explicaría la razón por la cual los ríos en vertiente norte de la FVTM tienen una mayor verticalidad con respecto a los tributarios del río Ameca. De forma contrastante, la cuenca del río Ameca, además de tener menor área de drenaje, erosiona un relieve compuesto de estructuras volcánicas del Plioceno con un drenaje menos desarrollado respecto al de la SMO, en consecuencia, el río Ameca tienen en la actualidad una menor capacidad de incisión y erosión.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación apoyan la hipótesis de que el emplazamiento de la FVTM interrumpió una posible conexión fluvial de los grábenes de la SMO hacia bahía de Banderas, esto fue a través del desvío de la ruta de evacuación de sedimentos de los ríos de la SMO hacia la planicie de Nayarit por medio del río Santiago.

Las evidencias geomorfológicas, basadas en la proyección de los paleo-perfiles de los ríos Bolaños y Juchipila, así como la reciente edad (Holoceno) estimada para la planicie de Nayarit son evidencias que apuntan hacia un cambio en los patrones de transporte y acumulación de sedimentos.

Finalmente, los resultados de este trabajo contribuyen a entender escenarios donde la actividad volcánica tiene una gran capacidad de generar nuevos relieves y promover la erosión de divisorias que reorganizan cuencas preexistentes, como ha sido expuesto en el caso concreto de las cuencas Ameca y Santiago previas al emplazamiento de la FVTM.

ANEXOS

Los Anexos 1 a 5 se pueden descargar en la página web de la Revista <www.rmccg.unam.mx>, desde la vista previa de este artículo, estos Anexos se publican tal como fueron enviados por los autores y aceptados por la Revista, no se editaron ni formatearon, por lo que su tipografía o la calidad de las imágenes pueden variar respecto a los del cuerpo del artículo.

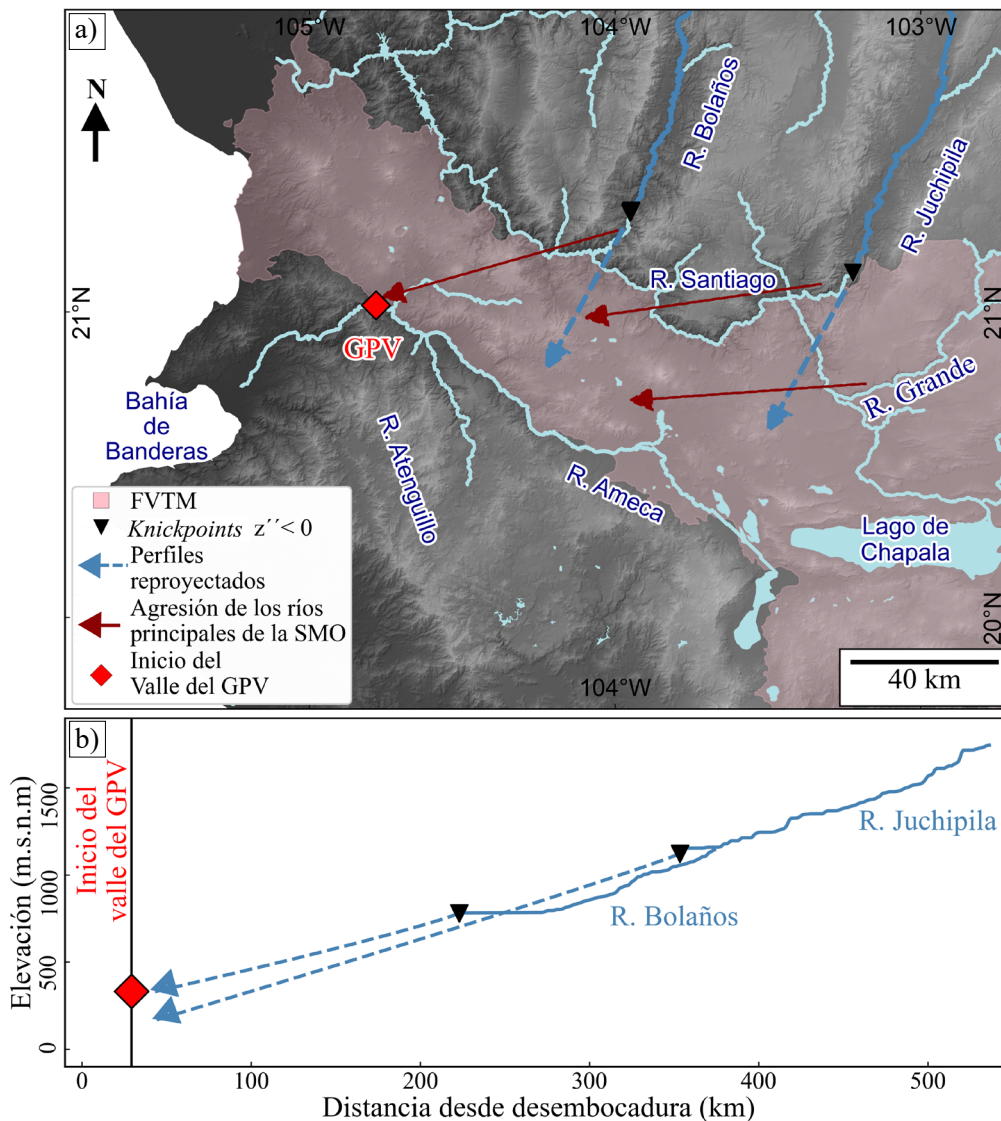


Figura 12. a) Una proyección de las últimas inflexiones de los ríos Bolaños y Juchipila muestra que apuntan hacia el GPV, lo que indica que la tendencia erosiva es oblicua a la actual orientación E-W de la FVTM. b) Los perfiles reconstruidos de los ríos Bolaños y Juchipila proyectan parcialmente al GPV, lo cual sugiere una conexión con el río Ameca.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los fondos CONACYT (CB-2013-01, Ref. 221803) y DGAPA-PAPIIT (Ref. IA103506). Los autores agradecen los comentarios y observaciones de los doctores Fernando Ortega Gutiérrez y Luca Ferrari, los cuales mejoraron la versión temprana del presente manuscrito. También agradecemos los comentarios a dos revisores anónimos cuyas observaciones y cuestionamientos mejoraron la versión final del presente texto. Finalmente, agradecemos el apoyo de la Mtra. Geysler Fernández Cata, quién apoyó en la elaboración de las gráficas con datos de los zircones.

REFERENCIAS

Alatorre-Zamora, M. A., Campos-Enríquez, J.O., Rosas-Elguera, J. G., Peña-García, L., Maciel-Flores, R., Fregoso-García, E., 2015, Chapala

half-graben structure inferred. A magnetometric study: *Geofísica Internacional*, 54(4), 323-342.

Allen, P.A., 2017, *Sediment Routing Systems: The Fate of Sediments from Source to Sink*: New York, Cambridge University Press, 422 pp.

Álvarez, R., 2002, Banderas Rift Zone: A plausible NW limit of the Jalisco Block: *Geophysical Research Letters*, 29(20), DOI:10.1029/2002GL016089

Applied spectra, 2018, GeoStar software, programa informático, disponible en: <https://appliedspectra.com/products/resolution/geostar-software.html>

Armstrong-Altrin, J.S., Lee, Y.I., Kasper-Zubillaga, J.J., Carranza-Edwards, A., García, D., Eby, G. N., Balaram, V., Cruz-Ortiz, N.L., 2012, Geochemistry of beach sands along the western Gulf of Mexico, Mexico: Implication for provenance: *Chemie der Erde*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemer.2012.07.003>

Bishop, P., 1995, Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion: *Progress in Physical Geography*, 19, 449-473.

Blum, M. D., Milliken, K.T., Pecha, M.A., Snedden, J.W., Frederick, B.C., Galloway, W.E., 2017, Detrital-zircon records of Cenomanian, Paleocene, and Oligocene Gulf of Mexico drainage integration and sediment routing: Implications for scales of basin-floor fans: *Geosphere*, 13(6),

- 2169-2205, doi:10.1130/GES01410.1
- Bracciali, L., Najman, Y., Parrish, R.R., Akhter, S.H., Millar, I., 2015, The Brahmaputra tale of tectonics and erosion: Early Miocene river capture in the Eastern Himalaya: *Earth and Planetary Science Letters*, 415, 25-37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.022>
- Castillo, M., Arce, J.L., Muñoz-Salinas, E., 2019, Evolución del relieve en las fallas San Marcos, El Madroño y Las Vigas, norte de la junta triple del bloque Jalisco, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 71(3), 631-656, <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2019v71n3a3>
- Cavazos-Tovar, J.G., Gómez-Tuena, A., Parolari, M., 2020, The origin and evolution of the Mexican Cordillera as registered in modern detrital zircons: *Gondwana Research*, 86, 83-103, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.001>
- Crosby, I.B., 1937, Methods of stream piracy: *The Journal of Geology*, 45(5), 465-486.
- Davis, W.M., 1890, The rivers and valleys of Pennsylvania: *National Geographic Magazine*, 1, 183-253.
- Delgado-Granados, H., 1993, Late Cenozoic tectonics offshore western Mexico and its relation to the structure and volcanic activity in the western Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, 32(4), 543-559.
- Ferrari, L., Pasquare, G., Venegas, S., Castillo, D., Romero, F., 1994, Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of the Jalisco block: *Geofísica Internacional*, 33(1), 139-151, [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)023<0751:MSATNB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)023<0751:MSATNB>2.3.CO;2)
- Ferrari, L., Pasquare, G., Venegas-Salgado, S., Romero-Rios, F., 2000, Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block, en Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M. (eds.), *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico*: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 334, <https://doi.org/10.1130/0-8137-2334-5.65>
- Ferrari, L., Petrone, C.M., Francalanci, L., Tagami, T., Eguchi, M., Conticelli, S., Manetti, P., Venegas-Salgado, S., 2003, Geology of the San Pedro-Ceboruco Graben, western Trans-Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), 165-181.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., Bryan, S., 2007, Magmatism and tectonics of the Sierra Madre Occidental and its relationship with the evolution of the western margin of North America: *Geological Society of America, Special Paper 422*, [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(01))
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012, The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone: *Tectonophysics*, 522-523, 122-149, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, M. T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013, Late Oligocene to middle Miocene rifting and synextensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: The beginning of the Gulf of California rift: *Geosphere*, 9(5), 1-40, <https://doi.org/10.1130/GES00925.1>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., López-Martínez, M., Silva-Fragoso, A., 2018, Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift: *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152, <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.04.006>
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G.E., 2007, Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas: *Geological Society of America Bulletin*, 119(11/12), 1313-1336, doi: 10.1130/B26067.1;14
- Flint, J.J., 1974, Stream gradient as a function of order, magnitude and discharge: *Water Resources Research*, 10, 964-973.
- Forte, A.M., Whipple, K.X., 2018, Criteria and tools for determining drainage stability: *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 101-117.
- Frey, H.M., Lange, R.A., Hall, C.M., Delgado-Granados, H., Carmichael, I.S.E., 2007, A Pliocene ignimbrite flare-up along the Tepic-Zacoalco rift: Evidence for the initial stages of rifting between the Jalisco block (Mexico) and North America: *Geological Society of America Bulletin*, 119(1/2), 49-64, doi: 10.1130/B25950
- Gilbert, G.K., 1877, *Geology of the Henry Mountains*: Washington, D.C., United States Geographical and Geological Survey Report, Government Printing Office, Washington, D.C., 214 pp.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., 2007, Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt en Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F. (eds.), *Geology of México: celebrating the Centenary of the Geological Society of México*: Geological Society of America Special Paper, 422, 1-53, [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(05\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(05))
- Gunderson, K.L., Pazzaglia, F.J., Picotti, V., Anastasio, D.A., Kodama, K.P., Rittenour, T., Frankel, K.F., Ponza, A., Berti, C., Negri, A., Sabbatini, A., 2014, Unraveling tectonic and climatic control on synorogenic growth strata (Northern Apennines, Italy): *Geological Society of America Bulletin*, 126(3/4), 532-552, doi:10.1130/B30902.1
- He, M., Zheng, H., Bookhagen, B., Clift, P.D., 2014, Controls on erosion intensity in the Yangtze River basin tracked by U-Pb detrital zircon dating: *Earth-Science Reviews*, 136, 121-140, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.014>
- Howard, A.D., Kerby, G., 1983, Channel changes in badlands: *Geological Society of America Bulletin*, 94, 739-752.
- Howard, A.D., Dietrich, W.E., Seidl, M.A., 1994, Modelling fluvial erosion on regional to continental scales: *Journal of Geophysical Research*, 99(B7), 13.971-13.986.
- Ingersoll, R.V., Grove, M., Jacobson, C.E., Kimbrough, D.L., Hoyt, J.F., 2013, Detrital zircons indicate no drainage link between southern California rivers and the Colorado Plateau from mid-Cretaceous through Pliocene: *Geology*, 41(3), 311-314, doi:10.1130/G33807.1
- Juárez-Arriaga, E., Lawton, T.F., Stockli, D.F., Solari, L., Martens, U., 2019, Late Cretaceous-Paleocene stratigraphic and structural evolution of the central Mexican fold and thrust belt, from detrital zircon (U-Th)/(He-Pb) ages: *Journal of South American Earth Sciences*, 95, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102264>
- Juárez-Arriaga, E., Lawton, T.F., Solari, L.A., Stockli, D.F., 2021, Stratigraphy and origin of Upper Cretaceous wedge-top and proximal foredeep deposits in the Mexican foreland basin, east-central Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 114, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103681>
- Land Surface Dynamics Topographic Tools (LSDTopoTools), Software for topographic analysis and other tools for geomorphology, slope stability, hydrology, and ecology, <https://github.com/LSDtopotools> Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- Lawton, T.F., Sierra-Rojas, M.I., Martens, U.C., 2020, Stratigraphic correlation chart of Carboniferous–Paleogene rocks of Mexico, adjacent southwestern United States, Central America, and Colombia, en Martens, U., 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, 115-142, [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(05\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(05))
- Leland, J., Reid, M.R., Burbank, D.W., Finkel, R., Caffee, M., 1998, Incision and differential bedrock uplift along Indus River near Nanga Parbat, Pakistan Himalaya, from ¹⁰Be and ²⁶Al exposure age dating of bedrocks straths: *Earth and Planetary Science Letters*, 154, 93-107.
- Margirier, A., Robert, X., Audin, L., Gautheron, C., Bernet, M., Hall, S., Simon-Labric, T., 2015, Slab flattening, magmatism, and surface uplift in the Cordillera Occidental (northern Peru): *Geology*, 43(11), 1031-1034, doi:10.1130/G37061.1
- McDowell, F., Keizer, R.P., 1977, Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango city and Mazatlán, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 88, 1479-1487, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<1479:TOMVIT>2.0.CO;2)
- Montgomery, D.R., Brandon, M.T., 2002, Topographic controls on erosion rates tectonically active mountain ranges: *Earth and Planetary Science Letters*, 201, 481-489, [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00725-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00725-2)
- Montgomery, D.R., Fofoula-Georgiou, E., 1993, Channel network source representation using digital elevation models: *Water Sources Research*, 29(12), 3925-3934, <https://doi.org/10.1029/93WR02463>
- Montgomery, D.R., López-Blanco, J., 2003, Post-Oligocene river incision, southern Sierra Madre Occidental, México: *Geomorphology*, 55, 235-247, [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00142-9](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00142-9)
- Moses, C., Robinson, D., Barlow, J., 2014, Methods for measuring rock surfaces weathering and erosion: A critical review: *Earth Science Reviews*, 135, 141-161, <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.006>

- Muñoz-Salinas, E., Castillo, M., Sanderson, D.C.W., Creswell, A., 2018, First luminescence geochronology of the beach-dune ridges of Nayarit strand-plain (west-central Mexico): *Journal of South American Earth Sciences*, 88, 642-648.
- OpenTopography, High-Resolution Topography Data and Tools, <https://opentopography.org/> Fecha de consulta: 11 de marzo de 2019.
- Perron, J.T., Royden, L., 2013, An integral approach to bedrock river profile analysis: *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 570-576. doi: 10.1002/esp.3302
- Righter, K., Caffee, M., Rosas Elguera, J., Valencia, V., 2010, Channel incision in the Rio Atenguillo, Jalisco, Mexico, defined by ³⁶Cl measurements of bedrock: *Geomorphology*, 120, 279-292, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.001>
- Rigon, R., Rodríguez-Iturbe, I., Maritan, A., Giacometti, A., Tarboton, D.G., Rinaldo, A., 1996, On Hack's law, *Water Resources Research*, 32, 3367-3374.
- Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., López-Martínez, M., Urrutia-Fucuguchi, J., 1997, Stratigraphy and tectonics of the Guadalajara region and triple-junction area, Western Mexico: *International Geology Review*, 39, 125-140.
- Roy, P.D., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., Pi. T., Lozano, R., 2010, Rare earth element geochemistry of the Late Quaternary tephra and volcano-clastic sediments from the Pachuca sub-basin, north-eastern Basin of Mexico: *Geofísica Internacional*, 49(1) 3-15.
- Rudnick, R.L., Fountain, D.M., 1995, Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective: *Reviews of Geophysics*, 33(3), 267-309.
- Schaaf, P., Díaz-López, F., Gutiérrez-Aguilar, F., Solís-Pichardo, G., Hernández-Triviño, T., Arrieta-García, G., Solari, L., Ortega-Obregón, C., 2020, Geochronology and geochemistry of the Puerto Vallarta igneous and metamorphic complex and its relation to Cordilleran arc magmatism in northwestern Mexico: *LITHOS*, 352-353, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105248>
- Selvans, M., Stock, J., DeMets, C., Sánchez, O., Marquez-Azua, B., 2011, Constraints on Jalisco Block motion and tectonics of the Guadalajara triple junction from 1998–2001 Campaign GPS Data: *Pure and Applied Geophysics*, 168, 1435-1447, <https://doi.org/10.1007/s00024-010-0201-2>
- Sierra-Rojas, M.I., Molina-Garza, R.S., Lawton, T.F., 2016, The Lower Cretaceous Atzompa Formation in South-Central Mexico: Record of Evolution from Extensional Backarc Basin Margin to Carbonate Platform: *Journal of Sedimentary Research* 86(6), 712-733, <https://doi.org/10.2110/jsr.2016.45>
- Sierra-Rojas, M.I., Lawton, T.F., Martens, U., von-Quadt, A., Beltran-Triviño, A., Coombs, H., Stockli, D.F., 2020, Early Cretaceous to Paleogene sandstone provenance and sediment-dispersal systems of the Cuicateco terrane, Mexico, *en* Martens, U., 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, 251-276, DOI: [https://doi.org/10.1130/2020.2546\(10\)](https://doi.org/10.1130/2020.2546(10))
- Struth, L., Babault, J., Teixell, A., 2015, Drainage reorganization during mountain building in the river system of the Eastern Cordillera of the Colombian Andes: *Geomorphology*, 250, 370-383, <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.09.012>
- Tapia-Fernández, H., Armstrong-Altrin, J.S., Selvaraj, K., 2017, Geochemistry and U-Pb geochronology of detrital zircons in the Brujas beach sands, Campeche, Southwestern Gulf of Mexico, Mexico: *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 346-361, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2017.04.003>
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1981, The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks: *Philosophical Transactions of the Royal Society A301*, 381-399.
- Turab, S.A., Stüwe, K., Stuart, F.M., Chew, D.M., Cogne, N., 2017, Tectonics drives rapid exhumation of the western Himalayan syntaxis: Evidence from low-temperature thermochronometry of the Neelum valley region, Pakistan: *Lithosphere*, 9(6), 874-888, <https://doi.org/10.1130/L626.1>
- Valdiya, K.S., 1996, River piracy, Saraswati that disappeared: *Resonance*, 1(5), 19-28.
- Valencia, V.A., Righter, K., Rosas-Elguera, J., López-Martínez, M., Grove, M., 2013, The age and composition of the pre-Cenozoic basement of the Jalisco Block: implications for and relation to the Guerrero composite terrane: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(3), 801-824, <http://doi.org/10.1007/s00410-013-0908-z>
- Valencia-Moreno, M., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., Calmus, T., Noury, M., Mendivil-Quijada, H., 2021, The Cretaceous-Eocene Mexican Arc: Conceptual framework from geochemical and geochronological data of plutonic rocks: *Earth-Science reviews*, 220, 103721, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103721>
- Vanacker, V., von Blanckenburg, F., Hewawasam, T., Kubik, P.W., 2007, Constraining landscape development of the Sri Lankan escarpment with cosmogenic nuclides in river sediment: *Earth and Planetary Sciences Letters*, 253, 402-414, doi:10.1016/j.epsl.2006.11.003
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T.E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S.J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K.J., Mayorov, N., Nelson, A.R.J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C.J., Polat, I., Feng, Y., Moore, E.W., VanderPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E.A., Harris, C.R., Archibald, A., M., Ribeiro, A., H., Pedregosa, F., van Mulbregt, P., SciPy 1.0 Contributors, 2020, SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python, *Nature Methods*, 17(3), 261-272.
- Whipple, K.X., 2001, Fluvial landscape response time: How plausible is steady-state denudation?: *American Journal of Science*, 301, 313-325.
- Whipple, K.X., Tucker, G.E., 1999, Dynamics of the stream-power model: implications for the height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs: *Journal of Geophysical Research*, 104(B8), 17661-17674, <https://doi.org/10.1029/1999JB900120>
- Whipple, K.X., DiBiase, R.A., Ouimet, W.B. Forte, A.M., 2017, Preservation or piracy: Diagnosing low-relief, high-elevation surface formation mechanisms: *Geology*, 45(1), 91-94, doi:10.1130/G38490.1
- Willet, S.D., McCoy, S.W., Perron, T., Goren, L., Chen, Chia-Yu., 2014, Dynamic reorganization of river basins: *Science*, 343(7), doi: 10.1126/science.1248765
- Witt, C., Brichau, S., Carter, A., 2012, New constraints on the origin of the Sierra Madre de Chiapas (south Mexico) from sediment provenance and apatite thermochronometry: *Tectonics*, 31, TC6001, doi:10.1029/2012TC003141

Manuscrito recibido: noviembre 14, 2021

Manuscrito corregido recibido: marzo 7, 2022

Manuscrito aceptado: marzo 21, 2022