

EL CINTURÓN VOLCÁNICO MEXICANO: UN PROYECTO MULTIDISCIPLINARIO

Gerardo J. Aguirre-Díaz¹, Luca Ferrari¹, Stephen A. Nelson², Gerardo Carrasco-Núñez³, Margarita López-Martínez⁴ y Jaime Urrutia-Fucugauchi⁵

¹ Unidad de Investigación en Ciencias de la Tierra, Campus Juriquilla, UNAM

² Tulane University, New Orleans

³ Instituto de Geología, UNAM

⁴ Depto. Geología, División Ciencias de la Tierra, CICESE

⁵ Instituto de Geofísica, UNAM

RESUMEN

El Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) es uno de los arcos volcánicos de margen continental más complejos y variados del mundo. Algunos de los rasgos peculiares de este arco son: su posición oblicua con respecto a su trinchera, la coexistencia en tiempo y espacio de volcanismo alcalino y calcoalcalino, la gran variabilidad de estructuras volcánicas y su composición química, la notable variación en la distribución espacial del volcanismo, la sectorización en un mosaico de varias subprovincias cada una con sus propias características, y la ocurrencia de una tectónica extensional intra-arco contemporánea al volcanismo sin desarrollo de una región de trasarco (backarc) propiamente dicha. Se han publicado un gran número de trabajos sobre el CVM en diferentes disciplinas, sin embargo, hace falta un trabajo que permita visualizar el CVM en su conjunto y que revise algunos de los problemas que aún no han sido explicados de manera satisfactoria. En particular, no se ha definido claramente la extensión en el espacio y en el tiempo del CVM, ya que aún no se tiene una cartografía geológica y estratigrafía regional desarrollada de manera sistemática. En lo que se refiere al límite en el tiempo, se han propuesto varias edades para el inicio de la actividad del CVM, desde el Oligoceno tardío hasta el Cuaternario. La única compilación con carácter geoquímico a todo lo largo del CVM fue publicada hace ya 10 años. De esta compilación queda claro que el CVM varía químicamente en el espacio, pero no existe un compendio que identifique la variación geoquímica del CVM en el tiempo. Es necesario entonces realizar estas tareas, e incluso, generar nueva información geológica, geoquímica, geocronológica y geofísica en donde sea necesario y actualizar la base de datos existente. Se presenta aquí un nuevo proyecto multidisciplinario en el que se desarrollarán diferentes estudios, compilaciones y un mapa geológico escala 1:500,000 del CVM, que será continuamente actualizado.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se define al Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) como una provincia volcánica cenozoica de margen continental localizada en el centro de México que se extiende de costa a costa, con una orientación este-oeste, entre los paralelos 19° y 21° (Figura 1). Sus dimensiones varían entre 20 y 200 km de anchura y aproximadamente 1000 km de longitud. Miles de estructuras volcánicas, tales como conos cineríticos, domos de lava, maars, volcanes escudo, volcanes compuestos y calderas, han sido identificados en esta provincia.

Es generalmente aceptado entre la comunidad científica que el magmatismo de esta provincia está relacionado a la subducción de las placas de Cocos y Rivera a lo largo de la Trinchera Mesoamericana, por debajo del sur de México (Figura 2) (e.g. Molnar y Sykes, 1969; Mooser, 1972; Urrutia-Fucugauchi y Del-Castillo, 1977; Karig et al., 1978; Demant, 1978, 1981a; Moorbath et al., 1978; Menard, 1978; Robin, 1982a; Nixon, 1982; Suárez y Singh, 1986; Urrutia-Fucugauchi y Böhnell, 1987; Pardo y Suárez, 1993, 1995; Nelson, 1997). La trinchera forma, en promedio, un ángulo de 15° con respecto al frente volcánico de la provincia, por lo que la distancia entre ambos varía de 200 km en el extremo occidental a 400 km en el extremo oriental.

Ha existido polémica en torno a la distribución geográfica del CVM, inicio de su actividad volcánica y bajo qué régimen tectónico ha ocurrido. Mucho de este debate es especulativo, por lo que es fundamental determinar, con evidencias estratigráficas, cartografía geológica y edades isotópicas, el límite espacio-temporal del CVM y sus variaciones composicionales desde su origen.

En este trabajo se resumen las características principales del CVM, enfatizando aquellos aspectos que faltan por aclararse para el entendimiento del origen y subsecuente evolución del CVM presentamos un nuevo proyecto multidisciplinario que se aboque precisamente a lograr este entendimiento entre cuyas metas estarán realizar un mapa geológico escala 1:500,000 del CVM, un mapa gravimétrico y otro aeromagnético escala 1:1,000,000 y establecer un banco de datos geocronológicos, geoquímicos y geofísicos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CVM

El CVM es una región con alto flujo de calor (Polyak et al., 1985; Prol y Juárez, 1985), y con fallamiento activo (Suter et al., 1995a, b). El volcanismo en el CVM es predominantemente calco-alcalino y varía en composición desde basáltico a riolítico,

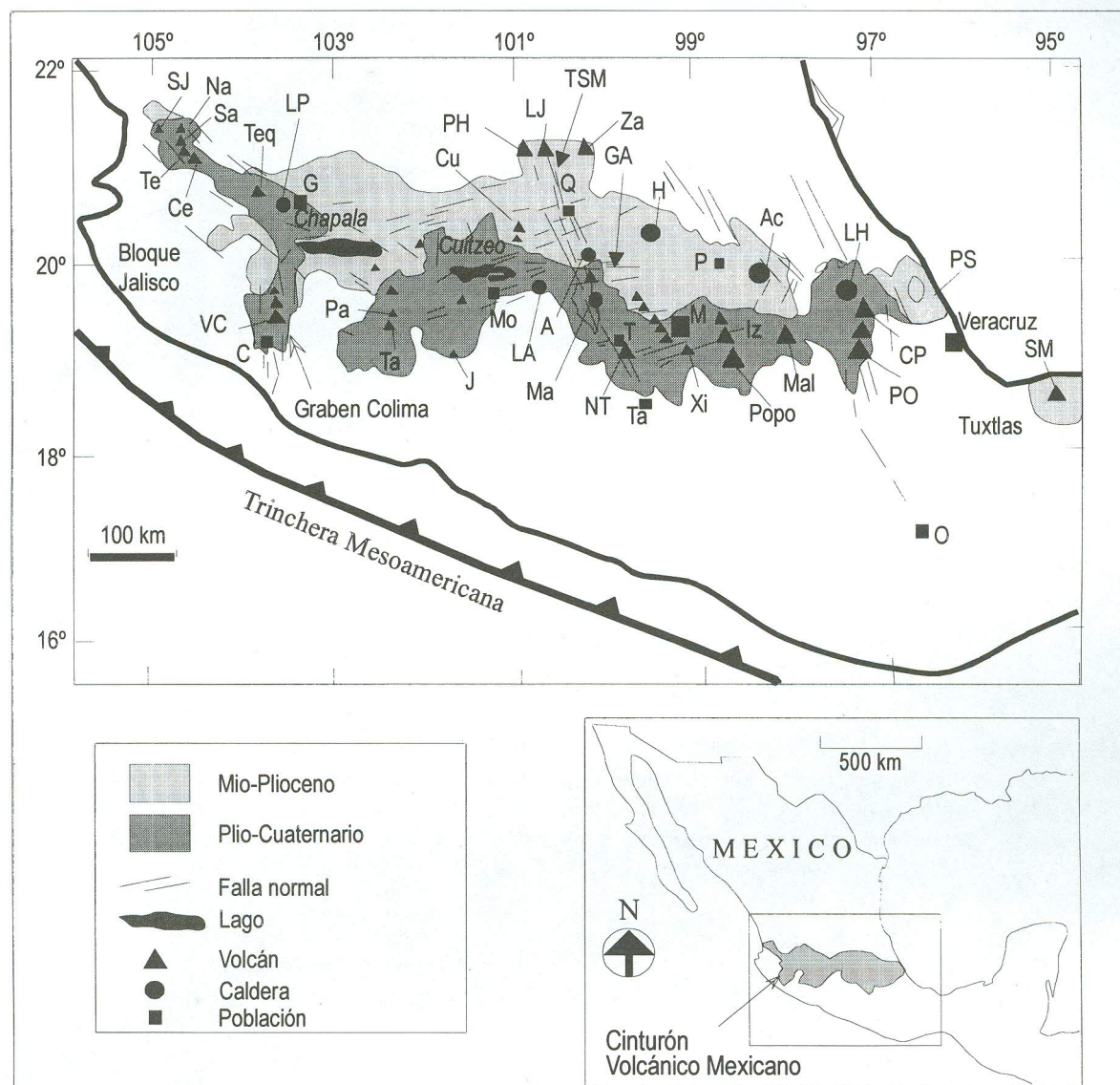


Figura 1. El Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) mostrando el dominio de rocas volcánicas del Mio-Plioceno al norte y el de rocas volcánicas del Plio-Cuaternario al sur (modificado de Nixon et al., 1987). Se muestran los principales sistemas de fallas, TSM: Taxco-San Miguel de Allende con una orientación NW, y el sistema ENE que incluye los grabens de Chapala, Cuitzeo y Acambay (GA), a lo largo del CVM. Los volcanes señalados son: SJ: San Juan, Na: Las Navajas (Nay.), Sa: Sangangüey, Te: Tepetitit, Ce: Ceboruco, Teq: Tequila, VC: Volcán Colima, Pa: Parícutín, Ta: Tancitaro, J: Jorullo, Cu: Culiacán, PH: Palo Huérano, LJ: La Joya, NT: Nevado de Toluca, Xi: Xitle, Popo: Popocatepetl, Iz: Iztaccihuatl, Mal.: Malinche, CP: Cofre de Perote, PO: Pico de Orizaba (Citlaltépetl), SM: San Martín. Las calderas indicadas son: LP: La Primavera, LA: Los Azufres, A: Amealco, Ma: Mazahua, H: Huichapan, Ac: Acapulco, LH: Los Hornos. Las poblaciones señaladas son: C: Colima, G: Guadalajara, Mo: Morelia, Q: Querétaro, T: Toluca, Ta: Taxco, M: Cd. de México, P: Pachuca, O: Oaxaca.

aunque las rocas más abundantes son de composición intermedia (Demant, 1978, 1981b; Robin, 1982a; Nixon et al., 1987; Aguilar-Vargas y Verma, 1987). Sin embargo, rocas alcalinas con nefelina normativa y también rocas peralcalinas han sido reportadas, especialmente en los extremos oriental y occidental del CVM (Robin y Nicolas, 1978; Robin, 1982b; Mahood, 1980; Nelson y Carmichael, 1984; Luhr y Carmichael, 1985; Negendank et al., 1985; Nieto et al., 1985; Nelson y Livieres, 1986; Aguilar-Vargas y Verma, 1987; Besch et al., 1988; Nelson y Hegre, 1990; Nelson y González-Cáver, 1992; Nelson et al., 1995). El volcanismo alcalino y calco-alcalino sucede

contemporáneamente en varios lugares a lo largo del CVM (Nelson, 1997). Sin embargo, según Nelson (1997), el volcanismo máfico alcalino presenta también señales de magmatismo generado en zonas de subducción y la diferencia de composición entre ambos se debe probablemente a un menor grado de fusión de manto metasomatizado por los procesos de subducción en la generación de magmas alcalinos con respecto a los calco-alcalinos.

Ha existido polémica sobre los límites geográficos de esta provincia. Generalmente este debate es de carácter



Figura 2. Esquema tectónico regional del CVM indicando algunos de los volcanes más conocidos (1: Ceboruco, 2: Volcán Colima, 3: Parícutín, 4: Jorullo, 5: Xitle, 6: Popocatepetl, 7: Pico de Orizaba, 8: San Martín, 9: El Chichón), e incluyendo la región de Los Tuxtlas (8) y el Arco Volcánico Chiapaneco (9) (modificado de Thorpe, 1977). Se muestra también la distribución aproximada de las otras dos provincias magmáticas de México además del CVM, la Sierra Madre Occidental y la Provincia Alcalina Oriental, según Robin (1976). ZFT: Zona de Fractura de Tamayo, DPO: Dorsal Pacífico Oriental, ZFR: Zona de Fractura de Rivera.

interpretativo. Por ejemplo, se ha discutido si las rocas calcoalcalinas y alcalinas plio-pleistocenas al nororiente del Pico de Orizaba (área de Palma Sola, Veracruz) deben ser o no consideradas como parte del CVM. Algunos autores proponen que las rocas alcalinas de esta región pertenecen a la Provincia Alcalina Oriental y el límite oriental del CVM es la cadena Cofre de Perote-Pico de Orizaba (Robin y Nicolas, 1978; Robin y Cantagrel, 1982). Por otro lado, Thorpe (1977), Damon y Montesinos (1978), Negendank et al. (1985), y Besch et al. (1989) argumentan que el CVM se extiende hasta la costa de Veracruz, y simplemente no reconocen a la Provincia Alcalina Oriental. De hecho, Thorpe (1977), Damon y Montesinos (1978), y Nelson y González-Cáver (1992) incluyen al volcanismo de Los Tuxtlas, Veracruz en el CVM, donde se localiza el volcán San Martín, cuya última actividad fue en 1773. Además, Damon y Montesinos (1978) consideran que el Arco Volcánico de Chiapas, que incluye al volcán El Chichón, es parte del CVM (Figura 2). Una situación menos polémica se tiene en el occidente y porción central del CVM, donde el límite espacial y temporal del CVM con la Sierra Madre Occidental y con el Bloque Jalisco están más claramente definidos.

El CVM es una provincia geológica compleja. Esto se debe en parte a que es un mosaico de varias subprovincias, cada una con sus propias características, morfológicas, estructurales y/o químicas (Demant, 1978, 1981a; Pasquaré et al., 1987, 1988; Aguilar-Vargas y Verma, 1987). El origen de estos sectores o subprovincias ha sido atribuido a una respuesta tectónica variable de los bloques del basamento, que están cubiertos por el CVM y a la evolución del campo de esfuerzos que ha ocurrido desde hace 30 Ma (Pasquaré et al., 1987). Es decir, el CVM fue desarrollado sobre un complejo basamento constituido por varias

provincias geológicas que generalmente coinciden con bloques corticales discretos con edad, estratigrafía y espesor cortical propios. En su parte norte, el CVM cubre parcialmente, de oeste a este, a la Sierra Madre Occidental, a la Provincia de Sierras y Cuencas (incluye parte de la Mesa Central), a la Sierra Madre Oriental (incluye otra parte de la Mesa Central), y a las secuencias del Mesozoico y Cenozoico de la planicie costera del Golfo de México. Xenolitos de la base de la corteza y del manto encontrados en basaltos miocenos y maars de la Mesa Central, indican la presencia de un basamento precámbrico y paleozoico en esta zona (Schaaf et al., 1995). El CVM cubre en su parte sur a la Sierra Madre del Sur, cuyo origen es actualmente interpretado como terrenos de varias edades y composiciones que fueron acrecionados durante el Paleozoico y Mesozoico (Coney y Campa, 1984; Ruiz et al., 1988), y que posteriormente fueron afectados en su parte sur por plutonismo cuya edad es progresivamente más joven de oeste a este, desde 100 Ma en lo que corresponde al Bloque Jalisco hasta 20 Ma cerca del Istmo de Tehuantepec (Schaaf et al., 1995). Algunos de estos terrenos se extienden al norte del CVM (Coney y Campa, 1984; Ruiz et al., 1988), pero en su mayor parte están cubiertos por rocas del Mesozoico tardío y Cenozoico. Lo interesante que cabe resaltar es que el CVM se ubica precisamente en donde todas estas provincias confluyen.

Se ha documentado que el volcanismo del CVM migró hacia el sur a partir del Plioceno (Robin y Cantagrel, 1982; Hasenaka y Carmichael, 1985; Nixon et al., 1987; Delgado-Granados et al., 1995). Estos estudios se han desarrollado a escala de sector o de una cadena volcánica particular (e.g. Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, Cofre de Perote-Pico de Orizaba), pero aún falta documentar otros sectores del CVM para visualizar esta migración a todo lo largo del CVM desde el Mioceno tardío y explicar sus causas. Esto permitirá inferir cuáles fueron los cambios geodinámicos que estuvieron relacionados con el desarrollo del CVM.

ORIGEN DEL CVM

Se han propuesto varias edades para el inicio de la actividad del CVM, desde el Oligoceno tardío (Mooser, 1972; Negendank, 1972), Mioceno (Nixon et al., 1987), Plioceno tardío (Robin, 1982a), o el Cuaternario (Demant, 1978; 1981a). Basándose en una recopilación de las edades isotópicas disponibles a la fecha, Ferrari et al. (1994, 1997), proponen que el CVM se desarrolló de manera gradual desde el Mioceno medio. Como otros autores (Nixon et al., 1987; Pasquaré et al., 1988; Ferrari et al., 1994), inferimos que el volcanismo Oligoceno es propio de la Sierra Madre Occidental, y que hubo una etapa de transición entre el arco de la Sierra Madre Occidental y el del CVM (entre el Oligoceno y el Mioceno medio), presumiblemente debido a cambios importantes en la geometría de las placas Pacífico, Farallón (y su posterior segmentación), Cocos, Rivera y Norteamérica, ya existiendo un arco orientado E-W a partir del Mioceno tardío (Nixon et al., 1987; Ferrari et al., 1994, 1997).

En los últimos 30 años se han propuesto varios modelos para explicar el origen del CVM y su posición oblicua con respecto a la trinchera. Por ejemplo, se ha relacionado al CVM con una zona de debilidad cortical que resultó de un sistema de fallas laterales de grandes dimensiones también conocidas como megacizallas (Gastil y Jensky, 1973; De Cserna, 1958, 1976). También se ha postulado que el CVM es la extensión continental de la falla transformante oceánica Clarion (Mooser y Maldonado, 1961). Por último ha sido considerado una zona de geosutura entre dos bloques continentales (Mooser, 1968, 1972). Sin embargo, el modelo más ampliamente aceptado es el que explica al CVM como una provincia volcánica de margen continental relacionada a la subducción a lo largo de la Trinchera Mesoamericana (e. g. Molnar y Sykes, 1969; Urrutia-Fucugauchi y Del Castillo, 1977; Thorpe, 1977; Menard, 1978; Moor bath et al., 1978; Dean y Drake, 1978; Demant, 1978, 1981a, Nixon, 1982; Robin, 1982a, 1982b; Negendank et al., 1985; Hasenaka y Carmichael, 1985; Luhr et al., 1985; Urrutia-Fucugauchi y Böhnell, 1987; Pardo y Suárez, 1993, 1995). La posición oblicua de la trinchera con respecto a la faja volcánica es atribuida por Nixon (1982) y Urrutia-Fucugauchi y Böhnell (1987) al resultado de cambios en el ángulo de inclinación de la placa subducida. Otros modelos combinan la zona de debilidad cortical con la subducción. Johnson y Harrison (1990) y Pasquarè et al. (1986, 1988) proponen que el CVM tuvo su origen en un régimen tectónico de transtensión lateral izquierdo, que desarrolló una zona de extensión continental y que, a su vez, ha controlado el magmatismo generado en la zona de subducción para finalmente formar una cadena volcánica oblicua con respecto a su trinchera.

La geometría detallada de la zona de Benioff por debajo de México ha sido recientemente reconstruida por Pardo y Suárez (1993, 1995). De acuerdo con estos autores, la placa Rivera subduce con un ángulo de aproximadamente 45° , mientras que en el extremo occidental de la placa de Cocos el ángulo es de aproximadamente 30° , disminuyendo su inclinación hacia el oriente hasta ser subhorizontal en el segmento correspondiente al estado de Guerrero y aumentando su inclinación a 20° cerca del Istmo de Tehuantepec. Pardo y Suárez (1995), sugieren que casi todo el frente del CVM se ubica sobre la cota de 100 km de profundidad del plano de Benioff. De este modo, estos autores confirman la idea de que las placas oceánicas presentan diferentes ángulos de subducción, lo que explica la oblicuidad del CVM con respecto a la trinchera, sin necesidad de invocar una zona de debilidad cortical por debajo del CVM.

VARIACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL CVM

Otro tema importante que no ha sido desarrollado hasta la fecha es el estudio de la variación en el espacio y en el tiempo de la tasa de efusión magmática y del grado de diferenciación magmática observados en el CVM, así como sus relaciones con la evolución del sistema de subducción. De hecho, el CVM es uno de los pocos arcos en el mundo producido por la subducción

de dos diferentes placas (Nixon, 1982). Estudios más recientes han demostrado que la separación entre las placas de Rivera y Cocos fue un proceso complejo que ocurrió durante varios millones de años contemporáneamente al desarrollo del CVM (DeMets y Stein, 1990; Bandy, 1992; Lonsdale, 1995; Kostoglodov y Bandy, 1995; Bandy et al., 1995). Estos importantes cambios geodinámicos deben haber afectado la tasa de producción magmática y, considerando a las variaciones de las características de la corteza por donde ascendió el magma, deben haber influido en la variación del grado de diferenciación magmática a lo largo del CVM. Lo anterior fue confirmado de manera preliminar por Nelson (1997).

La única compilación con carácter geoquímico a todo lo largo del CVM fue publicada ya hace 10 años por Aguilar-Vargas y Verma (1987). De esta compilación queda claro que el CVM varía químicamente en el espacio, pero no existe un compendio que identifique la variación geoquímica del CVM en el tiempo. Es necesario entonces realizar esta tarea, e incluso, generar nueva información geoquímica en donde se necesite. De esta manera, se actualizará la antigua compilación de Aguilar-Vargas y Verma (1987) y además se tratará de que esta nueva base de datos incluya elementos traza y mayores para determinar ambientes geodinámicos. Al respecto, Nelson (1997) hace mención a una nueva base de datos químicos de rocas máficas que incluyen elementos mayores, traza e isótopos y, por otra parte, Ferrari et al. (1997) presentan una versión preliminar de la variación química del CVM en el tiempo.

PLANTEAMIENTO DEL NUEVO PROYECTO CVM

El objetivo principal de este nuevo proyecto es lograr un mejor entendimiento del origen y evolución volcánica del CVM, así como de la evolución geodinámica de las placas relacionadas a la formación y evolución del CVM durante el Neogeno. Para ésto, es fundamental contar con una cartografía geológica a escala regional (e.g. 1:500,000), y con una base de datos geocronológicos, geoquímicos y geofísicos lo más amplia posible. Ya existe abundante información que será necesario recopilar, filtrar e integrar. Sin embargo, aunque existen datos geológicos, geocronológicos, geoquímicos y geofísicos del CVM, será necesario recabar más información.

Una vez integrada toda la información, podremos determinar las relaciones importantes entre subducción y volcanismo, las variaciones geoquímicas en el espacio y tiempo y las tasas de efusión y su relación con la geodinámica. La integración de esta información también permitirá relacionar los cambios en la geología y geoquímica superficial con cambios en la estructura de la corteza a escala regional, ya que aparentemente el CVM se desarrolla sobre varios tipos de basamento.

En el marco del proyecto se preveé la realización de las siguientes metas:

- 1) *Carta geológica.*- Realización de una carta geológica del CVM en cuatro hojas escala 1:500,000 con los siguientes límites (Figura 3): Hoja occidente: entre el Golfo de California y la margen oriental de la Laguna de Chapala (106° - 102°30'). Hoja centro: entre la margen occidental de la Laguna de Chapala y la Sierra de Las Cruces (103° - 99°30'). Hoja oriente: entre las fallas Taxco-San Miguel de Allende y el Golfo de México (100° - 96°30') y la Hoja Los Tuxtlas (95°30' - 94°45').
- 2) *Geocronología.*- Realización de un banco de datos de edades isotópicas para las rocas Cenozoicas de la provincia geológica CVM.
- 3) *Geoquímica.*- Realización de un banco de datos de análisis geoquímicos para las rocas del CVM y establecer la variación geoquímica y petrológica del CVM en el espacio y en el tiempo.
- 4) *Geofísica.*- Realización de un mapa gravimétrico y aeromagnético del CVM, escala 1:1,000,000.

SISTEMA DE INFORMACIÓN VIRTUAL

El proyecto se desarrollará a través de diferentes metodologías, que incluyen, cartografía geológica, geocronología, geoquímica y geofísica. Sin embargo, las diferentes disciplinas estarán constantemente integradas por medio de un sistema informático accesible por red (Internet). De esta manera se pretende contar con archivos actualizados, tanto de mapas como de base de datos que se manejarán mediante un sistema de información geográfica (GIS). Para este fin contamos con una estación de trabajo (*SparcStation Sun*), una tableta digitizadora (90 x 120 cm) y una impresora a color para impresión de mapas (90 x 90 cm).

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM que, por medio de su programa PAPIIT, financia parte de este proyecto con número IN108196; a la Comisión Federal de Electricidad por su apoyo para este estudio. Asimismo, agradecemos al Ing. Jorge Nieto Obregón (Facultad de Ingeniería, UNAM) y al Dr. Dante

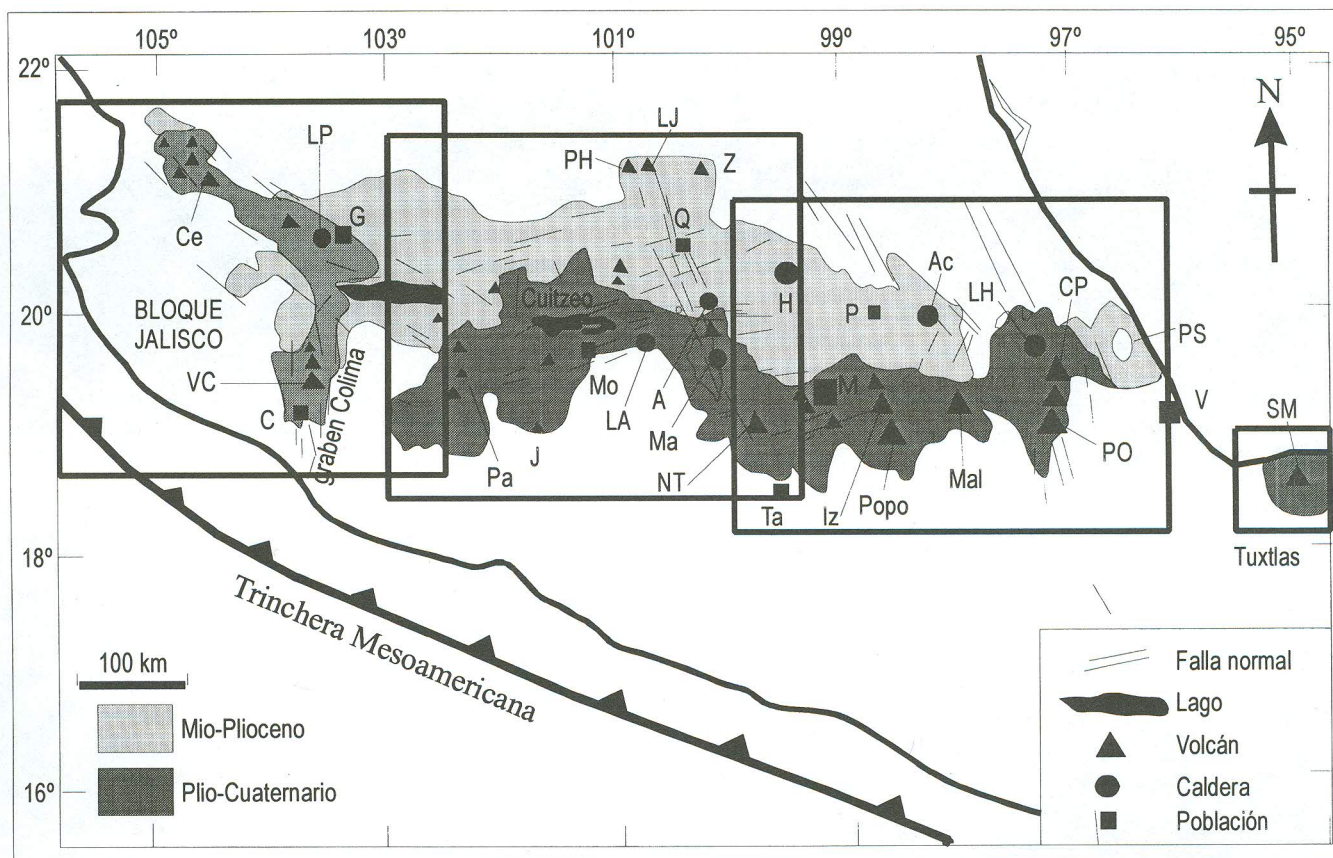


Figura 3. Proyecto CVM que incluye entre sus metas la elaboración de cuatro mapas geológicos escala 1:500,000, cuyos límites se indican en la figura. Los límites de los tres mapas principales se sobreponen por ser conveniente en su manejo, ya sea individualmente o en su conjunto.

Morán Zenteno (Instituto de Geología, UNAM), por haber revisado este trabajo y habernos proporcionado importantes sugerencias y comentarios para mejorarlo.

REFERENCIAS

- Aguilar-Vargas, V.H. y Verma, S.P., 1987, Composición química (elementos mayores) de los magmas en el Cinturón Volcánico Mexicano: *Geofísica Internacional*, v. 26, p. 273-290.
- Bandy, W.L., 1992, Geological and Geophysical investigation of the Rivera-Cocos plate boundary: Implications for plate fragmentation: Ph. D. dissertation, Texas A&M University College Station, 195p.
- Bandy, W.L., Morrer-Gutiérrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J., Hilde, T.W.C., 1995, The subducted Rivera-Cocos plate boundary: Where is it, what is it, and what is the relationship to the Colima Rift?: *Geophysical Research Letters*, v. 22, p. 3075-3078.
- Besch, T., Negendank, J.F.W., Emmermann, R., 1988, Geochemical constraints on the origin of calc-alkaline and alkaline magmas of the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, v. 27, p. 641-663.
- Coney, P.J. and Campa, M.F., 1984, Lithotectonic terrane map of Mexico: U.S. Geol. Survey Open-File Report 84-523, p. D1-D14.
- Damon, P.E. and Montesinos, E., 1978, Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff zone in Chiapas, Mexico: *Arizona Geological Society Digest*, v. 11, p. 155-168.
- Dean, B.W. and Drake, C.L., 1978, Focal mechanism solutions and tectonics of the Middle America Arc: *Journal of Geology*, v. 86, p. 111-128.
- Delgado-Granados, H., Urrutia-Fucugauchi, J., Hasenaka, T., Ban, M., 1995, Southwestward volcanic migration in the western Trans-mexican Volcanic Belt during the last 2 Ma: *Geofísica Internacional*, 34, 341-352.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Universidad Nacional Autónoma México, Instituto de Geología, Revista*, v.2, p. 172-187.
- Demant, A., 1981a (1984), Interpretación geodinámica del volcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano: *Universidad Nacional Autónoma México, Instituto de Geología, Revista*, v. 5, p. 217-222.
- Demant, A., 1981b, L'Axe Néovolcanique Trans Mexicain etude volcanique et pétrographique signification géodynamique: Docteur ès Sciences Thèse, Faculté des Sciences et Techniques de St. Jérôme, Université de Droit, d'Economie et des Sciences D'Aix-Marseille, France, 259 p.
- DeMets, C. and Stein, S., 1990, Present-day kinematics of the Rivera plate and implications for tectonics in southwestern Mexico: *Journal Geophysical Research*, v. 95, p. 21,931-21,948.
- De Cerna, Z., 1958, Notes on the tectonics of southern Mexico: in *Habitat of Oil*, American Association Petroleum Geologists, p. 523-532.
- De Cerna, Z., 1976, Geotectonics and mineral deposits: New Mexico Geological Society Special Publication, 6, p. 18-25.
- Ferrari, L., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 1997, Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: Insights from the geochronologic database. IV Simposio sobre tectónica y volcanismo cenozoico en México, II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados, Pachuca, Hgo., 1997, Instituto Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM, Libro de Simposia y Coloquio, sin # p.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G., Tibaldi, A., 1994, Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to Present: *Geofísica Internacional*, v. 33, p. 91-105.
- Gastil, R.G. and Jansky, W., 1973, Evidence for strike-slip displacement beneath the Trans-Mexican Volcanic Belt: In *Proceedings of the conference on tectonic problems of the San Andreas fault system*, Kovach, R.L. and Nur, A., eds., Stanford University Publications, Geological Sciences, v. 13, p. 171-18.
- Hasenaka, T. and Carmichael, I.S.E., 1985, A compilation of location, size, and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, central Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 577-608.
- Johnson, C.A. and Harrison, C.G.A., 1990, Neotectonics in central Mexico: *Physics Earth Planetary Interiors*, v. 64, p. 187-210.
- Karig, D.E., Cardwell, R.K., Moore, G.F., Moore, D.G., 1978, Late Cenozoic subduction and continental margin truncation along the northern Middle America Trench: *Geological Society America Bulletin*, v. 89, p. 265-276.
- Kostoglodov, V. and Bandy, W.L., 1995, Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates. *Journal Geophysical Research*, v. 100, p. 17,977-17,989.
- Lonsdale, P., 1995, Segmentation and disruption of the East Pacific Rise in the mouth of the Gulf of California. *Marine Geophysical Research*, v. 17, p. 323-359.
- Luhr, J.F. and Carmichael, I.S.E., 1985, Contemporaneous eruptions of calc-alkaline and alkaline magmas along the volcanic front of the Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional* v. 24, p. 203-216.
- Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F., Carmichael, I.S.E., 1985, Active rifting in southwestern Mexico: manifestations of and incipient eastward spreading-ridge jump: *Geology*, v. 13, p. 54-57.
- Mahood, G.A., 1980, Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center - Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico: *Journal Volcanology Geothermal Research*, v. 8, p. 199-230.
- Menard, H.W., 1978, Fragmentation of the Farallon plate by pivoting subduction: *Journal of Geology*, v. 86, p. 99-110.
- Molnar, P. and Sykes, L.R., 1969, Tectonics of the Caribbean and Middle American region from focal mechanisms and seismicity: *Geological Society America Bulletin*, v. 80, p. 1639-1684.
- Moorbath, S., Thorpe, R.S., Gibson, I.L., 1978, Strontium isotope evidence for petrogenesis of Mexican andesites: *Nature*, v. 271, p. 437-438.

- Mooser, F., 1968, The Mexican Volcanic Belt structure and development, formation of fractures by differential crustal heating: Mexico, D.F. Pan American Sym. on the Upper Mantle (1968), p. 15-22.
- Mooser, F., 1972, The Mexican Volcanic Belt: Structure and tectonics: *Geofísica Internacional*, v. 12, p. 55-70.
- Mooser, F. and Maldonado, K.M., 1961, Penecontemporaneous tectonics along the Mexican Pacific coast: *Geofísica Internacional* v. 1, p. 1-20.
- Negendank, J.F.W., 1972, Volcanics of the Valley of Mexico: description of some Mexican volcanic rocks with special consideration of the opaques: *N. Jb. Mineral. Abh.*, v. 116, p. 308-320.
- Negendank, J.F.W., Emmermann, R., Krawczyk, Mooser, F., Tobschall, H., Werle, D., 1985, Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 477-575.
- Nelson, S.A., 1997, Spatial and geochemical characteristics of basaltic to andesitic magmas in the Mexican Volcanic Belt: IV Simposio sobre tectónica y volcanismo cenozoico en México, II Convención sobre la Evolución Geológica de México y Recursos Asociados, Pachuca, Hgo., 1997, Instituto Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geología, UNAM, Libro de Simposia y Coloquio, sin # p.
- Nelson, S.A. and Carmichael, I.S.E., 1984, Pleistocene to recent alkalic volcanism in the region of Sanganguey volcano, Nayarit, Mexico: *Contributions Mineralogy Petrology*, v. 85, p. 321-335.
- Nelson, S.A. and González-Cáver, E., 1992, Geology and K-Ar dating of the Tuxtla Volcanic Field, Veracruz, Mexico: *Bulletin Volcanology*, V. 55, p. 85-96.
- Nelson, S.A. and Hegre, J., 1990, Volcán Las Navajas, a Pliocene-Pleistocene trachyte/peralkaline rhyolite volcano in the northwestern Mexican Volcanic Belt: *Bulletin Volcanology*, v. 52, p. 186-204.
- Nelson, S.A. and Livieres, R.A., 1986, Contemporaneous calc-alkaline and alkaline volcanism at Sanganguey Volcano, Nayarit, Mexico: *Geological Society America Bulletin*, v. 97, p. 798-808.
- Nelson, S.A., Gonzalez-Cáver, E., Kyser, T.K., 1995, Constraints on the origin of alkaline and calc-alkaline magmas from the Tuxtla Volcanic field, Veracruz, Mexico. *Contributions Mineralogy Petrology*, v. 122, p. 191-211.
- Nieto, J., Delgado-Argote L., Damon, P.E., 1985, Geochronologic, petrologic and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional*, v. 24, p.623-664.
- Nixon, G.T., 1982, The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere: *Geological Society America Bulletin*, v. 93, p. 514-523.
- Nixon, G.T., Demant, A., Armstrong, R.L., and Harakal, J.E., 1987, K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional* v. 26, p. 109-158.
- Pardo, M. and Suárez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco Block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, v. 20, p. 2391-2394.
- Pardo, M. and Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications: *Journal Geophysical Research*, v. 100, p. 12,357-12,373.
- Pasquarè, G., Garduño, V.H., Tibaldi, A., Ferrari, M., 1988, Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, v. 146, p. 353-364.
- Pasquarè, G., Forcella, F., Tibaldi, A., Vezzoli, L., Zanchi, A., 1986, Structural behaviour of a continental volcanic arc: The Mexican Volcanic Belt: in Wezel, F.C., ed., *The Origin of Arcs, Developments in Geotectonics* 21, Elsevier, p. 509-527.
- Pasquarè, G., Vessoli, L., Zanchi, A., 1987, Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt, *Geofísica Internacional* v. 26, p. 159-176.
- Polyak, B.G., Kononov, V.I., Prasolov, E.M., Sharkov, I.V., Prol-Ledesma, R.P., González, A., Razo, A., Molina-Berbeller, R., 1985, First estimations of terrestrial heat flow in the TMVB and adjacent areas based on isotopic composition of natural helium: *Geofis. Inter.*, v. 24, p. 465-476.
- Prol, R.M. and Juárez, G., 1985, Silica geotemperature mapping and thermal regime in the Mexican Volcanic Belt: *Geofísica Internacional* v. 24, p. 609-622.
- Robin, C., 1976, Présence simultanée de magmatismes de significations tectoniques opposées dans l'Est du Mexique: *Bull. Soc. géol. France*, (7), v. 18, no. 6, p. 1637-1645.
- Robin, C., 1982a, Mexico: in *Andesites*, Thorpe, R.S., ed., John Wiley & Sons, p. 137-147.
- Robin, C., 1982b, Relations volcanologie-magmatologie-geodynamique: application au passage entre volcanismes alcalin et andésitique dans le sud Mexicain (Axe Trans-mexicain et Province Alcaline Orientale): *Annal. Sci. l'Univ. Clermont-Ferrand II*, 30, 503 p.
- Robin, C. et Cantagrel, J.M., 1982, Le Pico de Orizaba (Mexique): structure et evolution d'un grand volcan andésitique complexe: *Bulletin Volcanology*, v. 45, p. 299-315.
- Robin, C. et Nicolas, E., 1978, Particularities geoquimiques des suites andésitiques de la zone orientale de l'axe transmexicain, dans leur contexte tectonique: *Bull. Soc. Geol. France*, v. 20, p. 193-202.
- Ruiz J., Patchet, J.P., Ortega-Gutiérrez, F., 1988, Proterozoic and Phanerozoic basement terranes of Mexico from Nd isotopic studies: *Geological Society America Bulletin*, v. 100, p. 274-281.
- Schaaf, P., Morán-Zenteno, D., Hernández-Bernal, M.S., 1995, Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence. *Tectonics*, v. 14, p. 1339-1350.
- Suárez, G. and Singh, S.K., 1986, Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt- Discussion: *Tectonophysics*, v. 127, p. 155-160.

- Suter, M., Quintero-Legorreta, O., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G., Farrar, E., 1995a, The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt: *Tectonics*, v. 14, p. 1245-1262.
- Suter, M., Carrillo, M., López-Martínez, M., Farrar, E., 1995b, The Aljibes half-graben active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the southern Basin and Range: *Geological Society America Bulletin*, v. 107, p. 627-641.
- Thorpe, R.S., 1977, Tectonic significance of alkaline volcanism in eastern Mexico: *Tectonophysics*, v. 40, p. T19-T26.
- Urrutia-Fucugauchi J, and Böhnel, H., 1987, Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt -Discussion: *Tectonophysics*, v. 138, p. 319-323.
- Urrutia-Fucugauchi J. y Del Castillo, L., 1977, Un modelo del Eje Volcánico Mexicano: *Boletín Sociedad Geológica México* v. 38, p. 18-28.