



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

HISTORIA ERUPTIVA DEL VOLCÁN NEVADO DE COLIMA Y SU EVOLUCIÓN DENTRO DEL
COMPLEJO VOLCÁNICO DE COLIMA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS
(SISMOLOGIA Y FISICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA)

PRESENTA
ABEL CORTÉS CORTÉS

TUTOR: DR. JOSÉ LUIS MACÍAS VÁZQUEZ
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

COMITÉ TUTORAL:
DRA. LUCIA CAPRA PEDOL
CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM
DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO M.
UNIVERSIDAD DE SAN NICOLAS DE HIDALGO, MORELIA, MICHOACAN

MÉXICO D.F. SEPTIEMBRE 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Con mucho cariño

A mi familia

Patricia

Eduardo y Alejandra

A mis padres y hermanos

Agradecimientos:

Expreso mi sincero agradecimiento a las siguientes Instituciones y personas:

A La UNIVERSIDAD DE COLIMA, Institución en la cual laboro por haberme dado su apoyo moral y económico para llevar a cabo mis estudios de doctorado.

Al Posgrado en Ciencias de La Tierra del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Al CONACYT por el apoyo económico mediante una beca durante la realización de mis estudios de doctorado

Al Centro Universitario de Estudios e Investigaciones en Vulcanología de la Universidad de Colima. A su Director *Maestro Gabriel Reyes Dávila*, por su buena disposición y apoyo para la conclusión del presente estudio.

A los compañeros y amigos; *Tonatiuh Domínguez Reyes y Carlos Navarro*, por sus comentarios y sugerencias para el mejoramiento del presente trabajo.

A *Eliseo Alatorre Chávez*, por su apoyo técnico desinteresado en cuestiones de Software y computación.

A mi Director de Tesis, *Dr. José Luis Macías* por su apoyo incondicional y dirección para el desarrollo del presente estudio.

A los *Drs. Victor Hugo Garduño M, José Luis Arce Saldaña, Paul Layer y Avto Gogichaishvili*, por haber aceptado ser sinodales del presente trabajo.

De manera especial, a la *Dra. Lucía Capra*, por su minuciosa revisión y sus desinteresados comentarios para el mejoramiento de este trabajo.

A mis compañeros y amigos, Renato, Lilia, Armando+, Denis, por su gran amistad y apoyo incondicional.

A la UNAM, por haberme apoyado con mi formación a este nivel académico.

Al personal del Posgrado en Ciencias de la Tierra, al Coordinador del Posgrado, a Araceli y Mónica, por su amable atención y buena disposición en la tramitación de documentos que el posgrado requiere.

Al personal de la Biblioteca conjunta de Ciencias de la Tierra, por su amable colaboración y oportuna ayuda en la búsqueda de información.

A Sergio Sánchez y José de Jesús Landín, por su buena disposición de acompañarme durante algunas de mis campañas de trabajo de campo.

De manera especial, a mi cuñada, *Adelina e hijos, Laura y Ramsés*, por su comprensión y apoyo moral.

Índice

Relación de figuras.....	i
Relación de tablas.....	ii
Relación de gráficas.....	ii
RESUMEN.....	1
1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes.....	6
1.2 Importancia del presente trabajo.....	7
1.3. Objetivos del presente trabajo.....	7
1.4. Metodología.....	8
1.5. Terminología.....	13
2. Entorno Tectónico y Geológico del Área de Estudio.....	14
2.1. Marco tectónico.....	14
2.2. Marco geológico regional.....	16
2.3. Geología local.....	18
2.3.1. Cretácico.....	18
2.3.2. Formación Encino (Ke).....	18
2.3.3. Formación Tepames (Ktp).....	18
2.3.4. Formación Coquimatlán (Kc).....	19
2.4. Terciario.....	20
2.4.1 Rocas intrusivas (Tigia).....	20
2.4.2 Rocas ignimbríticas (Tigei).....	20
2.4.3 Vulcanismo mongenético.....	21
3. Descripción.....	21
3.1. Morfología del VNC.....	21
3.2. Estratigrafía.....	23
3.2.1 Unidad Domo Las Víboras (DLV).....	27

3.2.2 Miembro Nevado de Colima 1 MN1	28
3.2.2.1 Unidad lava andesítica Telcruz (LAT).....	29
3.2.2.2 Unidad Depósito de Avalancha Alceseca-Atenq.(AVA-Atnq) sector SO-SE.....	31
3.2.3 Miembro Nevado de Colima 2, MN2	33
3.2.3.1 Unidad Lava El Platanillo.....	37
3.2.3.2 Unidad Lava Atenquique (LVA).....	38
3.2.3.3 Unidad Domo Los Núñez (DLN).....	41
3.2.3.4 Unidad Depósito de Avalancha El Zapote.....	41
3.2.4 Miembro Nevado de Colima 3 MN3	49
3.2.4.1 Unidad Lava El Limón.....	49
3.2.4.2 Unidad Lava La Cascada.....	49
3.2.4.3 Unidad Lava El Albergue.....	49
3.2.4.4 Unidad Lava La Tabaquera.....	50
3.2.4.5 Unidad Lava A. Seco.....	50
3.2.4.6 Unidad Lava La Calle.....	51
3.2.4.7 Unidad Lava El Salto.....	52
3.2.4.8 Unidad Domo Los Mazos.....	53
3.2.4.9 Unidad Depósito de Avalancha El Platanar.....	54
3.2.5 Miembro Nevado de Colima 4, MN4	56
3.2.5.1 Unidad Lava Alpizahue.....	57
3.2.5.2 Unidad Lava La Difunta.....	57
3.2.5.3 Unidad Domo Alto.....	57
3.2.5.4 Unidad Lava Bajada Nueva.....	58
3.2.5.5 Unidad Depósito de flujos piroclásticos y flujos de escombros, B. Los Otates.....	59
3.2.5.6 Unidad Depósito de ceniza y flujos de escombros, Arroyo Seco.....	61
3.2.5.7 Unidad Depósito de flujos piroclásticos Alceseca.....	62
3.2.5.8 Unidad Lava Microondas.....	63

3.2.5.9 Unidad depósito de flujos de escombros.....	63
3.2.5.10 Unidad Lava Paso del Colimote.....	67
3.2.6. Miembro Nevado de Colima 5, MN5.....	68
3.2.6.1 Unidad Domo El Picacho.....	69
3.2.6.2 Unidad Depósito de flujos piroclásticos Agua Escondida (27.68 ka).....	70
3.2.6.3 Unidad depósito de flujos piroclásticos (<27.05 ka).....	70
3.2.6.4 Unidad depósito de flujos piroclásticos de bloques y ceniza (26.25 ka).....	71
3.2.6.5 Unidad depósito de flujos piroclásticos de ceniza (<23.55 ka).....	71
3.2.6.6 Unidad depósito de flujos piroclásticos de ceniza y pómez (19.99 ka).....	72
3.2.6.7 Unidad depósito de flujos piroclásticos de ceniza y pómez (<19.51 ka).....	73
3.2.6.8 Unidad Secuencias epiclásticas no diferenciadas B. Alceseca.....	74
3.2.6.9 Unidad depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (<13.48 ka).....	74
3.2.6.10 Unidad depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (<6.93 ka).....	76
4. Granulometría de los depósitos de Avalancha.....	77
5. Geoquímica de elementos mayores.....	81
5.1 Geoquímica de elementos traza.....	85
6. Discusión e interpretación.....	89
6.1 Historia eruptiva del Volcán Nevado de Colima y su evolución en el CVC.....	89
6.1.2 Edificio Nevado de Colima MN2 (350-280 ka).....	96
6.1.3 Edificio Nevado de Colima MN3 (280 - <74ka).....	98
6.1.4 Edificio Nevado de Colima MN4 (>73 - 29ka).....	100
6.1.5 Edificio Nevado de Colima MN5 (~ 28ka).....	101
7. Factores de inestabilidad del Volcán Nevado de Colima.....	102
8. Conclusiones.....	105
9. Bibliografía.....	107

Relación de figuras

Figura 1	Mapa generalizado de México que muestra el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano y la ubicación del Complejo Volcánico de Colima dentro del Marco tectónico local.....	5
Figura 2	Modelo digital de elevación que muestra al Complejo Volcánico de Colima (CVC).....	17
Figura 3	Modelo digital de elevación del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores que muestra los remanentes de cráter de colapso (I, II, III, IV), asociados a antiguos edificios volcánicos del Nevado.....	23
Figura 4	Sección estratigráfica compuesta del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores.....	25
Figura 5	Mapa geológico del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores.....	26
Figura 6	Modelo digital de elevación del Volcán Nevado de Colima que muestra la ubicación de las localidades verificadas en campo durante el desarrollo del presente trabajo.....	27
Figura 7	Sección estratigráfica compuesta representativa del MN1, loc.73.....	30
Figura 8	Depósitos de flujos de escombros en las locs.99 y 100, algunos afectados por fallas normales.....	31
Figura 9	Depósito de avalancha subyaciendo a secuencias volcanoclásticas.....	33
Figura 10	Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez intercalados en secuencias volcanoclásticas.....	35
Figura 11	Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez intercalados en secuencias volcanoclásticas, asociados con el MN2.....	36
Figura 12	Secciones estratigráficas representativas del MN2 en el sector SO.....	38
Figura 13	Depósito de avalancha de escombros sobre el lecho de la Barranca Atenquique que subyace a flujo de lava.....	40
Figura 14	Modelo digital que muestra la distribución de los depósitos de avalancha asociados al Nevado de Colima.....	43
Figura 15	Imágenes que muestran las características texturales del segundo depósito de avalancha del Nevado de Colima.....	45
Figura 16	Depósito de avalancha AVZ del MN2 subyaciendo a flujos de lava del Paleofuego a lo largo de barranca Beltrán sector SE y barranca la Lumbre sector SO.....	46
Figura 17	Depósito de avalancha AVZ del MN2, en diferentes localidades, a lo largo de Río Tuxpan-Naranja y Río Salado.....	47
Figura 18	Depósito de avalancha AVZ del MN2, a 70 y 85 km de la fuente.....	48
Figura 19	Flujo de lava datado en 93 ± 6 Ka, loc. 38, que sobreyace a depósitos de flujos piroclásticos.....	51
Figura 20	Flujo de lava datada en 81 ± 8 ka, loc. 31, barranca El Limón, que sobreyace a secuencias volcanoclásticas.....	53
Figura 21	Domo Los Mazos afectado por una falla normal y depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, sector NE.....	54
Figura 22	Características texturales del segundo y tercer depósito de avalancha del Nevado de Colima, a lo largo de la barranca El Platanar y barranca El Limón.....	55
Figura 23	Depósito de la avalancha AVP sobre el margen oeste del Río Tuxpan-Naranja, subyaciendo a secuencias epiclásticas.....	56
Figura 24	Domo Alto (estación de Microondas), sobre el margen sur de barranca Atenquique.....	58
Figura 25	Flujo de lava Bajada Nueva datado en 61 ± 21 ka, margen norte de la Barranca Atenquique.....	59
Figura 26	Depósito de flujos piroclásticos de ceniza y líticos subyaciendo a secuencias volcanoclásticas sobre el margen oeste de barranca Los Otates, sector NE.....	60

Figura 27	Depósito de flujos piroclásticos de ceniza y pómez subyaciendo a secuencias volcanoclásticas sobre el margen oeste del Arroyo Seco.....	61
Figura 28	Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez separados por un paleosuelo fechado en $6,930 \pm 180$ años A.P. El depósito inferior fe fechado en $45,175 + 4355/-2810$ años A.P.....	62
Figura 29	Depósito de flujos de escombros sobre el margen E del Río Tuxpan-Naranjo, b) Secuencia de depósitos de sedimentos lacustres, margen oeste del Río Tuxpan-Naranjo.....	64
Figura 30	Imágenes que muestran los diferentes depósitos de la sección estratigráfica en la localidad 44, zona de Atenquique.....	66
Figura 30a	Relación estratigráfica de la meta-arenisca con las calizas de la Formación Tepames del (Albiano-Cenomaniano-superior).....	67
Figura 31	Depósitos de avalancha separados por un paleosuelo fechado en $29,295 + 2065/-1640$ años A.P.....	68
Figura 32	Imágenes de la cima del Domo El Picacho.....	69
Figura 33	Depósito de flujo piroclástico que sobreyace a un paleosuelo fechado en $27,050 + 640/-595$ A.P.....	71
Figura 34	Paleosuelo fechado en $23,550 + 2390/-1840$ años A.P, subyaciendo a secuencias volcanoclásticas.....	72
Figura 35	Depósito de flujos de ceniza fechado en $19,995 + 500/-470$ años A.P.....	73
Figura 36	Paleosuelo que subyace a flujo piroclástico de ceniza y pómez, datado en 19.51 ka. A.P.....	74
Figura 37	Imágenes que muestran a depósitos de avalancha, depósito de flujos de escombros, flujos piroclásticos y depósitos de sedimentos lacustres sobre el margen E del Río Aremería, zona de Mazatan, Jalisco.....	75
Figura 38	Gráficas de edades convencionales de ^{14}C (años A.P) e incertidumbre reportadas en la tabla 4.....	77
Figura 39	Histogramas de las características sedimentológicas de los depósitos de avalancha del Volcán Nevado de Colima.....	78
Figura 40	Gráficas de tendencias granulométricas de los depósitos de avalancha del Volcán Nevado de Colima en el sector SE.....	80
Figura 41	Muestra la ubicación de las muestras de roca de lava del Volcán Nevado de Colima, datadas por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y analizadas geoquímicamente.....	82
Figura42	Diagramas binarios de elementos mayores de las muestras de roca analizadas de los flujos de lava del Volcán Nevado de Colima.....	85
Figura 43	Diagramas de variación química de elementos traza de las rocas analizadas del Nevado de Colima, domos laterales y el Paleofuego.....	87
Figura 44	Modelos digital de los volcanes de Colima que muestran los periodos de evolución del Nevado, Nevado I, II, y III, Robin et. al., (1987) y fases de construcción (MN1-MN5) (este trabajo).....	92
Figura 45	Secciones esquemáticas transversales N-S del Complejo Volcánico de Colima, que muestran las fases de construcción del Nevado de Colima.....	93
Figura 46	Secciones esquemáticas transversales SO-NE y NO-SE, que muestran como la FT afecta a domos laterales.....	95

Relación de tablas.

Tabla 1	Fórmulas reportadas por Inman (1952), Folk y Ward (1957) utilizadas en el cálculo de los parámetros estadísticos.....	9
Tabla 2	Abundancia isotópica de origen natural de Isótopos de Potasio, Argón y Calcio.....	10
Tabla 3	Edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de roca total en lavas del Volcán Nevado de Colima.....	28
Tabla 4	Relación de edades por ^{14}C , asociadas con depósitos volcánicos del Nevado.....	76
Tabla 5	Edades K-Ar realizadas por otros autores, en rocas del Nevado.....	76
Tabla 6	Porcentajes de las fracciones de grava, arena, limo y matriz, y parámetros sedimentológicos de Folk (1980).....	79
Tabla 7	Análisis químicos de roca total del Volcán Nevado de Colima, domos laterales y Paleofuego.....	82
Tabla 8	Resumen del % SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 y su variación en las muestras de roca asociadas a las diferentes estructuras volcánicas del Nevado de Colima.....	88
Tabla 9	Resumen del % SiO_2 , MgO , Fe_2O_3 y K_2O , en rocas asociadas a diferentes estructuras volcánicas del Nevado de Colima, analizadas químicamente por otros autores.....	88

Relación de gráficas.

Gráfica 1	Edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ con su barra de error, correspondientes a la tabla 1, obtenidas en flujos de lava del Volcán Nevado de Colima.....	29
Gráfica 2	Edades convencionales ^{14}C (años antes del presente) con su barra de error correspondientes a la tabla 3.....	77

Resumen

El Volcán Nevado de Colima se encuentra en la parte central de una cadena volcánica alineada N-S, formada por los estratovolcanes; El Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima, que forman el Complejo Volcánico de Colima. Este complejo se localiza en el extremo occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano en la parte central del Graben de Colima.

Con base en el análisis de imágenes de satélite, fotografías aéreas y trabajo de campo apoyado con fechamientos radiométricos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C se definió la historia eruptiva del Volcán Nevado de Colima y su relación con el resto de los volcanes del complejo volcánico. El Nevado de Colima inició su formación hace >530 mil años y continuo esporádicamente hasta hace ~28 mil años. El Nevado ha tenido una historia compleja con la construcción de al menos cinco edificios volcánicos (I-V) que fueron destruidos por el colapso lateral de sus flancos hace ~350, ~280, >184 y ~74 mil años Antes del Presente (A.P.). Los colapsos laterales de los tres primeros edificios generaron depósitos de avalanchas de escombros que se encuentran distribuidos al suroeste y sureste del volcán, intercalados con depósitos piroclásticos, volcaniclasticos y paleosuelos. En las partes más bajas predominan abanicos aluviales compuestos por depósitos volcániclasticos y terrazas a lo largo de los ríos Tuxpan-Naranja, Armería y Salado dominadas por depósitos volcaniclasticos. Contemporáneamente a estas fases de construcción del Nevado de Colima, se emplazaron domos periféricos hace ~246, ~74 y 49 mil años A.P. Tanto los edificios del Nevado de Colima como estos domos han sido afectados por la Falla Tamazula de dirección NE-SO, la cual ha jugado un papel determinante en la migración hacia el sur de la actividad magmática y en los eventos de colapso de los edificios volcánicos. El último evento de destrucción del Nevado de Colima (~28 mil años A.P.) destruyó un domo emplazando flujos de bloques y cenizas y culminó con la extrusión del Domo El Picacho. Este estudio permitió esclarecer la historia eruptiva no sólo del Nevado de Colima sino del complejo volcánico dado que se definió la edad del Volcán Paleofuego (~97 mil años) o antiguo edificio de El Volcán de Colima, contemporáneamente con la tercera fase de construcción del Nevado.

Todas las rocas del Nevado de Colima tienen un carácter calcialcalino intermedio con composiciones que varían de andesitas basálticas a andesitas ácidas (53-62 % en peso de SiO_2), hasta dacitas en los domos periféricos y andesitas del Paleofuego con una muestra de composición shoshonítica, todas éstas típicas de ambientes de subducción.

Abstract.

Volcán Nevado de Colima is located in the central part of a N-S chain, formed by the Cantaro, Nevado de Colima and Volcán de Colima stratovolcanoes, which form the Colima Volcanic Complex (CVC). The CVC is located in the western end of the Trans-Mexican Volcanic Belt, in the central part of the Colima graben. Based on the analysis of satellite images, aerial photographs and the field work supported with radiometric datings of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and ^{14}C the eruptive history of Volcán Nevado de Colima was defined as well as its relationship with the rest of the volcanoes of the volcanic complex. The Nevado de Colima began its formation prior to 530,000 yrs and continued sporadically up to ~ 28,000 yrs ago. The Nevado has had a complex history with the construction of at least five volcanic edifices (I-V) which were destroyed by the collapse of its flanks ~ 350, ~ 280, > 184 and ~ 74,000 yrs Before of Present (B.P.). The lateral collapses of the first three edifices generated debris avalanche deposits distributed to the southwest and southeast of the volcano, intercalated with pyroclastic, volcaniclastic deposits and paleosoils. In the lower parts predominates alluvial fans formed by volcaniclastic deposits and terraces along of the Tuxpan-Naranjo, Armería and Salado rivers dominated by volcaniclastic deposits. Contemporaneously with the construction of the Nevado de Colima, peripheral domes were emplaced ~ 246,000 ~ 74,000 and 49,000 yrs B.P. The edifices of Nevado de Colima, as well as these domes have been affected by the Tamazula fault of NE-SO direction, which has played a decisive role in the migration to southward of magmatic activity and the lateral collapse events of volcanic edifices. The last event of destruction of Nevado de Colima (~ 28,000 yrs B:P:) destroyed a dome generating block and ash flows and culminated with the extrusion of the dome El Picacho. This study allowed us to better understand the eruptive history not only of Nevado de Colima, but also of the CVC since Paleofuego age (~ 97,000 yrs) or ancient edifice of Volcán de Colima and the third phase of the Nevado de Colima were found to be contemporary

All rocks of the Nevado de Colima have an intermediate calc-alkaline character with compositions ranging from basaltic andesites to andesites acid (53-62 wt% SiO_2) until dacites in the peripheral domes and andesites of the Paleofuego with a sample of shoshonitic composition, all these typical of subduction environments

1. Introducción

El volcán Nevado de Colima forma parte del Complejo Volcánico de Colima (CVC), que es una cadena volcánica orientada N-S, que está compuesta por tres estratovolcanes andesíticos: El Cántaro, Nevado de Colima y Volcán de Colima. El CVC se encuentra ubicado en la porción occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), un arco continental que se extiende más de 1000 km en el centro de México, desde las costas de Nayarit hasta el Golfo de México (Figura 1a) (Luhr y Carmichael, 1990a). Localmente el CVC está situado dentro del Rift de Colima que representa la extensión sur del punto triple, formado por los rifts de Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima (Luhr et al., 1985). Debido a la intensa actividad que ha presentado el Volcán de Colima, tanto en tiempos históricos como en la época moderna (Cortés et al., 2010), se ha realizado una gran cantidad de estudios para dilucidar la formación y evolución del CVC. Este complejo inició su formación hace 1.5 Ma con la construcción del volcán El Cántaro, que continuó su actividad hasta hace ~1.0 Ma (Allan, 1986). Posteriormente, la actividad migró unos 15 km al sur para formar el Volcán Nevado de Colima, que evolucionó durante tres periodos eruptivos ocurridos entre 0.53 Ma y 150 ka, según Robin et al. (1987), o cinco periodos eruptivos según Cortés et al. (2005). Posteriormente, hace ~50 ka, la actividad migró unos 5 km al sur originando el Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima) (Robin et al., 1987), el cual colapsó en repetidas ocasiones (Luhr y Preestegard, 1988; Robin et al., 1987; Komorowski et al., 1997), hasta su último colapso ocurrido hace 2500 años A.P., (Cortés et al., 2005; 2010). El actual Volcán de Colima, se emplazó en la parte central del cráter generado por el último colapso del Paleofuego (Luhr y Preestegard, 1988; Robin et al., 1987).

El Volcán de Colima, es el volcán más activo de México, el cual, cuenta con un amplio registro histórico y moderno de su actividad (Ordoñez, 1897; Arreola, 1903; Waitz, 1920, 1935; Luhr y Carmichael, 1980; Medina, 1983; Luhr y Preestegard, 1988; Robin et al., 1987; Luhr y Carmichael, 1990a; De La Cruz-Reyna, 1993; Rodríguez-Elizarrarás et al., 1995; Komorowski et al., 1997; Saucedo, 2001; Saucedo et al., 2002 entre otros). Debido a ello, los estudios del CVC, se han concentrado a este volcán, dejando en un segundo término los estudios de la geología, estratigrafía y geocronología, de los volcanes Nevado de Colima y El Cántaro; al grado que, la evolución del CVC se sustenta con 11 fechamientos con el método de K-Ar (Allan, 1986; Robin et al., 1987) y un mayor número de fechamientos con el método de ^{14}C , que cubren una pequeña parte de la historia eruptiva de los volcanes Paleofuego y Colima. La historia eruptiva de los

volcanes El Cántaro y Nevado de Colima, ha sido poco estudiada, solo recientemente se cuenta con un mapa geológico que incluye a los tres volcanes meridionales del CVC (Cortés et al., 2005; 2010), pero que no cuenta con fechamientos radiométricos y estratigrafía detallada de éstos. De acuerdo con las edades existentes del VNC, su evolución cubre un periodo clave para comprender mejor la evolución del CVC, y sus productos abarcan zonas muy importantes alrededor de la cadena volcánica que limitaron al sur, el crecimiento de los volcanes, Paleofuego y Colima. Estructuralmente, el VNC está afectado por la Falla Tamazula (FT) que forma el Graben Alceseca-Atenquique, la cual ha jugado un papel importante en la actividad eruptiva del CVC y el colapso gravitacional de los edificios volcánicos (Garduño et al., 1998). De acuerdo con la síntesis anterior, en el presente estudio se pretende obtener una cartografía definida del Volcán Nevado de Colima, mediante trabajo de campo y levantamiento de secciones estratigráficas, apoyado por fechamientos radiométricos con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y edades de ^{14}C , que permita definir con mayor precisión su historia eruptiva, el número de colapsos de su edificio y su evolución dentro del CVC, lo cual es fundamental para comprender la evaluación del complejo volcánico y mitigar el peligro en los volcanes de Colima.

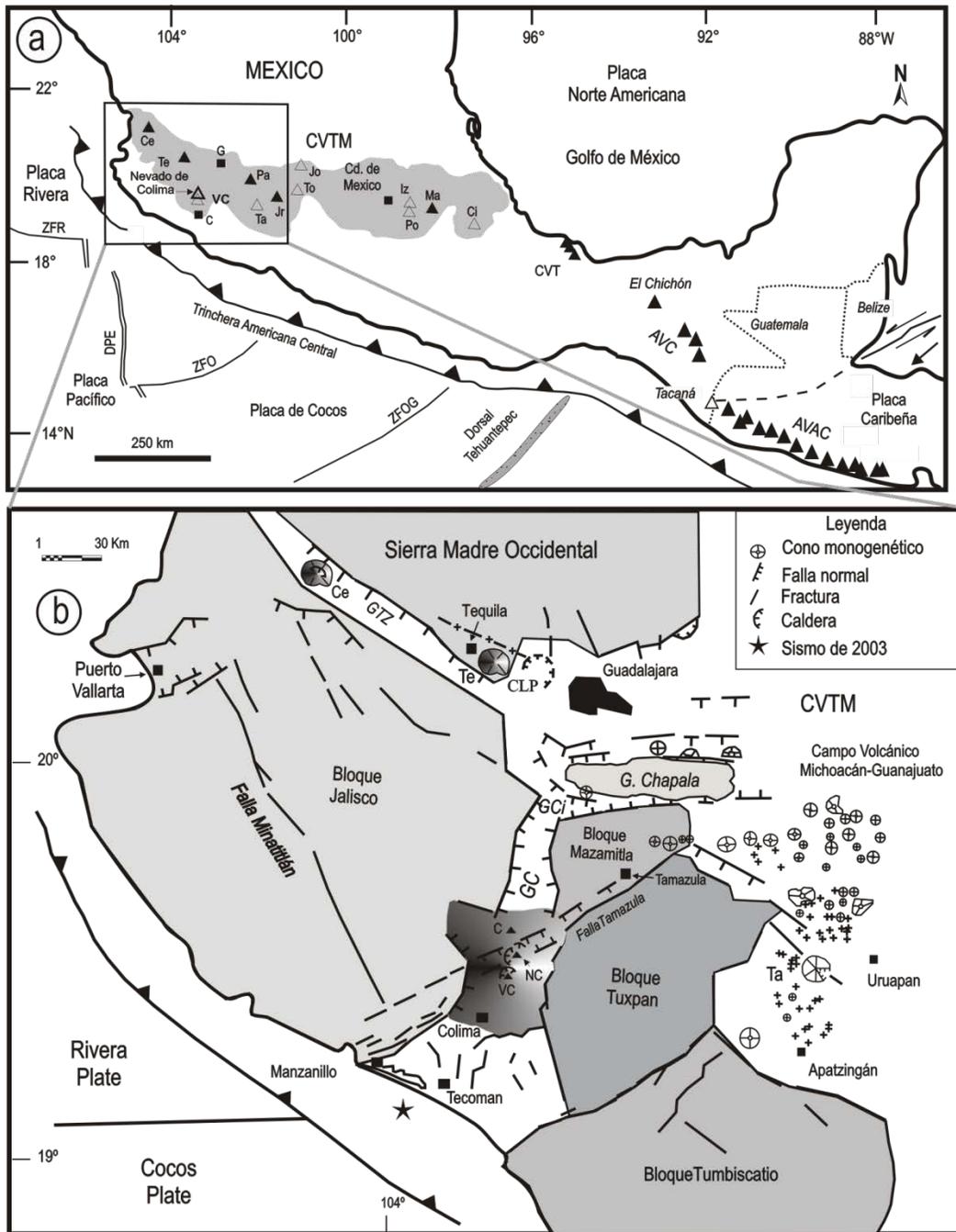


Figura 1. a) Mapa generalizado de México que muestra el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM área gris). Los triángulos abiertos representan volcanes con depósitos de avalancha conocidos. El Volcán Nevado de Colima ubicado en el extremo occidental del CVTM, en el límite sur del Graben de Colima. Las abreviaturas son: Ce, Ceboruco; Te, Volcán Tequila; G, Guadalajara; NC, Nevado de Colima; VC, Volcán de Colima; Pa, Parícutín; Ta, Tancitaro; Jr, Jocotitlán; To, Nevado de Toluca; Iz, Iztaccihuatl; Po, Popocatepetl; Ma, Malinche; Ci, Citlaltépetl; CVT, Campo Volcánico Los Tuxtlas; AVC, Arco Volcánico Chiapaneco; AVAC, Arco Volcánico de América Central; ZFR, Zona de Fractura Rivera; DPE, Dorsal del Pacífico Este; ZFO, Zona de Fractura Orozco; ZFOG, Zona de Fractura O' Gorman, (mapa modificado después de García Palomo, et al., 2004 y Cortés et al., 2010). b) Marco tectónico local del Complejo Volcánico de Colima y su relación con la unión del punto triple que forma los rifts de Tepic-Zacoalco, Chapala y Colima. Las abreviaturas son: GC, Graben de Colima; GTZ, Graben de Tepic-Zacoalco; GCH, Graben de Chapala; GCi, Graben de Citala; CLP, Caldera La Primavera; C, Volcán Cántaro; NC, Nevado de Colima; VC, Volcán de Colima (modificado después de Cortés et al., 2010).

1.1. Antecedentes

Los primeros trabajos realizados sobre el Volcán Nevado de Colima, fueron los de Mooser (1961), quien reportó los vestigios de dos cráteres de colapso cerca de la cima del volcán. Demant (1979) describió de manera más detallada los productos volcánicos del Nevado de Colima y consideró que las estructuras, eran el producto de eventos eruptivos tipo Saint Vincent. Posteriormente, Robin et al. (1987) dividieron la historia eruptiva del Nevado en tres periodos principales de desarrollo, denominados como Nevado I (530 ± 100 ka), II (>200 ka) y III (<150 ka). Según estos autores, el periodo Nevado I, inició su construcción $\sim 0.53 \pm 0.1$ Ma y continuó hasta hace 0.35 ± 0.05 Ma, con la emisión de flujos de ceniza y flujos de lava hacia el sector NO. La evolución de Nevado I, concluyó con un evento que formó una caldera definida por estos autores como C2.

Durante el periodo Nevado II (<150 ka), ocurrió un evento eruptivo tipo Monte Santa Elena que provocó el colapso del edificio volcánico hacia el E dejando una caldera de 4-5 km de diámetro que definen como C3. De los flujos de lava generados durante el Nevado II, Robin et al. (1987) reportan dos edades determinadas por el método de K-Ar, una de 200,000 años que obtuvieron de un flujo de lava que forma parte de la pared interna de C3, en su límite SO. Otra de 150,000 años, que obtuvieron de un flujo de lava que desbordó el límite SO de la caldera C2. Según Robin et al. (1987), el evento que finalizó con la evolución de Nevado II, generó una avalancha de escombros que viajó 20 km al SE y cubrió una superficie de 2200 km² con un volumen de 12-15 km³.

Posteriormente, Stoopes y Sheridan (1992), estudiaron con más detalle el depósito de avalancha, y a partir de una muestra de carbón obtenida de un depósito de avalancha al sur de Cuauhtémoc, obtuvieron una edad de 18,500 años A.P., que le asignan al evento de colapso del edificio volcánico del Nevado II. Según estos autores, la avalancha se emplazó a lo largo de los valles de los ríos Tuxpan-Naranjo y Salado, hasta alcanzar la costa del Pacífico a ~ 120 km de la fuente. Adicionalmente, Capra (2000) y Capra y Macías (2002) reportaron que la avalancha solo viajó 20 km hacia el E hasta detenerse contra las calizas cretácicas del cerro el Chilero, obstruyendo el cauce del Río Tuxpan-Naranjo y generando un lago temporal. Después de cierto tiempo, el agua del lago erosionó el dique que lo formaba ocasionando su colapso generando un gigantesco flujo de escombros que llegó hasta la costa del Pacífico. Sin embargo, más recientemente, Cortés et al. (2005; 2010) con trabajo de campo adicional detallado, concluyeron

que la avalancha estudiada por los autores arriba mencionados, fue generada por el evento de colapso lateral del Nevado I, asociada con la caldera C2, de Robin et al. (1987) y no con la caldera C3, como lo habían considerado en un principio los diferentes autores ya mencionados. Además, concluyen que la edad de 18,500 años A.P., obtenida por Stoopes y Sheridan (1992), corresponde a un depósito de avalancha generado por el Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima) y no al depósito de la avalancha del Nevado que alcanzo las costas del Pacífico.

1.2. Importancia del trabajo

Los trabajos realizados por diferentes autores, sobre el Volcán Nevado de Colima, se han enfocado en la descripción general de los depósitos emitidos (Robin et al., 1987). Otros trabajos se enfocaron al estudio del depósito de avalancha de escombros que asociaron a la última estructura de colapso del Nevado de Colima (Stoopes y Sheridan, 1992; Capra, 2000; Capra y Macías, 2002). Sin embargo, ninguno de estos trabajos se ha enfocado a definir su estratigrafía volcánica, historia eruptiva que ayude a entender su evolución dentro del CVC. Es por ello, que en este estudio se reconstruye detalladamente la estratigrafía del Volcán Nevado de Colima. Para ello, se realizó un intenso trabajo de campo, con el levantamiento de secciones estratigráficas, ayudado con dataciones radiométricas con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, lo que permitió definir la edad absoluta y posición relativa de algunos de sus depósitos. Adicionalmente, se fecharon fragmentos de carbón encontrados dentro de depósitos de flujos piroclásticos y depósitos de avalancha de escombros, así como paleosuelos con el método de ^{14}C asociados con la actividad eruptiva del Nevado de Colima. Esta información ayudó a definir con mayor precisión su historia eruptiva, el número de eventos de colapsos laterales asociados a avalanchas de escombros y su evolución dentro del CVC, lo cual es fundamental en la evaluación y mitigación del peligro volcánico para los volcanes de Colima.

1.3. Objetivo General

Realizar la reconstrucción espacio temporal del Volcán Nevado de Colima para definir su historia eruptiva y su posición dentro del Complejo Volcánico de Colima.

Para poder cumplir con este objetivo se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la cartografía detallada del Volcán Nevado de Colima.
- Reconstruir su estratigrafía con la ayuda de fechamientos radiométricos.

- Reconstruir su historia eruptiva.
- Proponer un modelo de evolución del VNC y su posición dentro del CVC

1.4. Metodología

Para la realización del presente estudio, se analizaron fotografías aéreas (escala 1: 50 y 75,000) con el fin de hacer una fotointerpretación del área de estudio. De igual forma, se analizaron imágenes de satélite LANDSAT (bandas 1, 2, 3, 4, y 7 RGB). Con ayuda del programa Surfer, se elaboraron modelos digitales de elevación del terreno (MDE) de los volcanes de Colima, para definir lineamientos estructurales o límites de rasgos morfológicos de diferentes depósitos geológicos, los cuales, posteriormente se verificaron y describieron directamente en campo. Además, para determinar el área de algunas unidades de depósito, se auxilió con las herramientas de Google Earth, lo que fue de gran ayuda para determinar su volumen con el espesor obtenido durante el trabajo de campo.

Las rocas sedimentarias y las rocas ígneas más antiguas en el área de estudio, se investigaron en la literatura existente y, posteriormente, se verificaron en campo. Estas rocas se describieron y se mapearon como se observaron en campo, y se refieren con los nombres y edades con los que son conocidas en trabajos previos. Las edades de las rocas del Volcán Nevado de Colima se obtuvieron de la literatura existente y las demás se obtuvieron con el método radiométrico $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Alaska en Fairbanks por el Dr. Paul W. Layer. Asimismo, las edades de algunos depósitos de flujos piroclásticos y horizontes de paleosuelo, se obtuvieron mediante el método de radiocarbono ^{14}C y AMS (Accelerator Mass Spectrometry, por sus siglas en inglés) en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Arizona en Tucson, por el Dr. Chris Eastoe. Todos estos datos obtenidos durante el desarrollo del presente estudio, se plasmaron en cuatro cartas topográficas (escala 1:50,000) publicados por INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática) y el modelo digital del terreno, obteniendo así, el mapa geológico del Nevado de Colima y sus áreas circundantes, el cual cubre una superficie de 1630 km².

Durante el trabajo de campo se tomaron muestras de los depósitos de las avalanchas AVZ y AVP en su facies de matriz, para análisis granulométrico. El rango de partículas estudiado en el presente trabajo en la escala phi (negativo del logaritmo base 2 del diámetro de la partícula), va desde -4Φ (16 mm) a 4Φ (63 mm). Para simplificar la terminología granulométrica

utilizada se tomaron los términos grava (-4Φ a -2Φ), arena (-1Φ a 4Φ), limo ($>4\Phi$) y arcilla (-1Φ a 9Φ).

Después de tamizar cada una de las muestras y obtener los pesos de las diferentes fracciones, se elaboró una base de datos para obtener los histogramas de las características sedimentológicas y las gráficas de tendencias granulométricas.

Los parámetros estadísticos definidos para el estudio granulométrico se obtuvieron utilizando las formulas reportadas por Inman (1952) y Folk y Ward (1957).

Tabla 1. Formulas reportadas por Inman (1952), Folk y Ward (1957) utilizadas en el cálculo de los parámetros estadísticos.

Parámetros	Inman (1952)	Folk y Ward (1957)
Mediana	$Md\Phi = \Phi_{50}$	$Md\Phi = \Phi_{50}$
Media	$M\Phi = (\Phi_{16} + \Phi_{84})/2$	$Mz = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84})/3$
Selección	$\sigma_{\Phi} = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/2$	$\sigma_1 = (\Phi_{84} - \Phi_{16})/4 + (\Phi_{95} - \Phi_5)/6.6$
Skewness	$\alpha_{\Phi} = (M\Phi - Md\Phi)/\sigma_{\Phi}$ $\alpha_{2\Phi} = \frac{1}{2} (\Phi_5 + \Phi_{95}) - Md\Phi/\sigma_{\Phi}$	$Sk_1 = (\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50})/2(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + \Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}/2(\Phi_{95} - \Phi_5)$
Kurtosis	$\beta_{\Phi} = \frac{1}{2} (\Phi_{95} - \Phi_5) - \sigma_{\Phi}/\sigma_{\Phi}$	$K_G = (\Phi_{95} - \Phi_5)/2.44 (\Phi_{75} - \Phi_{25})$

Descripción de cada uno de los parámetros.

Mediana ($Md\Phi = \Phi_{50}$): diámetro correspondiente al 50% de la curva acumulativa.

Media ($Mz = (\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}) / 3$): diámetro medio obtenido promediando toda la curva acumulativa. Tiene en cuenta toda la distribución granulométrica.

Selección ($\sigma_1 = (\Phi_{84} - \Phi_{16}) / 4 + (\Phi_{95} - \Phi_5) / 6.6$): desviación estándar gráfica. Mide el grado de dispersión o de bimodalidad. Considera el 90% de la curva acumulativa, por lo tanto, es más representativa que el parámetro σ_{Φ}

Asimetría (skewnes) ($Sk_1 = (\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}) / 2(\Phi_{84} - \Phi_{16}) + \Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50} / 2(\Phi_{95} - \Phi_5)$): mide la dirección de las "colas" de la curva acumulativa. Varía de $9 + 1$ (abundancia de material fino) a -1 (abundancia de material grueso). Calculada sobre el 90% de la curva.

Agudeza (Kurtosis) ($K_G = (\Phi_{95} - \Phi_5) / 2.44 (\Phi_{75} - \Phi_{25})$): mide la concavidad de curva e indica el tipo de selección. Entre más pobre es la selección más plana es la curva ($K_G < 1$). Para una distribución gruesa K_G es igual a 1.

Método convencional de datación por K-Ar

El K (Z-19) es un metal alcalino del grupo IA, junto con el Litio, Sodio, Rubidio y Cesio. Es uno de los ocho elementos químicos más abundante de la corteza. Además es uno de los elementos más importante en minerales formadores de rocas, los feldespatos, feldespatoides, las micas minerales de arcillas y minerales evaporíticos (Heier and Adams, 1964). El Ar es un gas noble que pertenece al grupo VIIIA, es el tercer elemento en abundancia en la atmósfera y el gas noble más abundante en las rocas. La composición isotópica del potasio fue estudiada por primera vez por Aston (1921) quien descubrió ^{39}K y ^{41}K . Sin embargo, el isótopo radiactivo natural de potasio fue identificado por Nier (1935), cuando presentó pruebas concluyentes de la existencia de ^{40}K utilizando un espectrómetro de masas mucho más sensible que había estado a disposición de Aston. En (1937) el Físico Alemán Von Weizsacker, concluyó que el ^{40}K decae a ^{40}Ca y ^{40}Ar , basado en parte, en el hecho de que la abundancia de argón en la atmósfera de la Tierra, es aproximadamente 1.000 veces mayor de lo esperado, en comparación con la abundancia "cósmica" de otros gases nobles.

Tabla 2. Abundancia isotópica de origen natural de Isótopos de Potasio, Argón y Calcio

Isótopo	Abundancia%	Isótopo	Abundancia%
^{39}K	93.08	^{40}Ca	96.94
^{40}K	0.0119	^{42}Ca	0.65
^{41}K	6.91	^{43}Ca	0.14
^{36}Ar	0.337	^{44}Ca	2.08
^{38}Ar	0.063	^{46}Ca	0.003
^{40}Ar	99.60	^{48}Ca	0.19

El decaimiento del ^{40}K permite la creación de los geocronómetros de K-Ar y K-Ca. La cantidad de ^{40}Ar producido "in situ" por el proceso de desintegración, se obtiene solo si, se efectúan correcciones del ^{40}Ar atmosférico (no radiogénico) que ha sido absorbido por la superficie del cristal o producto de contaminación analítica.

El crecimiento radiogénico de ^{40}Ar y ^{40}Ca en un sistema de K-activo cerrado al potasio, argón, y calcio durante su vida útil, se expresa por la ecuación: $^{40}\text{Ar}^* + ^{40}\text{Ca}^* = ^{40}\text{K} (e^{\lambda t} - 1)$ donde λ es la constante de desintegración total de ^{40}K , la cual tiene dos componentes ($\lambda = \lambda_e + \lambda_\beta$).

Donde λ_e es debida a la desintegración de ^{40}K en ^{40}Ar por captura de electrones, λ_β se debe a la desintegración de ^{40}K en ^{40}Ca por β^- .

$$^{40}\text{Ar} + ^{40}\text{Ar} (\lambda_\beta / \lambda_e) = ^{40}\text{K} [e^{(\lambda_e + \lambda_\beta)t} - 1]$$

$$\lambda = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

$$^{40}\text{Ar} = 1 / (\lambda_e + \lambda_\beta) [e^{(\lambda_e + \lambda_\beta)t} - 1] \quad \text{en donde} \quad \lambda_e = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

$$t = 1/\lambda \ln[(^{40}\text{Ar}^*/^{40}\text{K}) (\lambda_\beta / \lambda_e) + 1] \quad \lambda_\beta = 5.543 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

Para que la ecuación tenga significado geológico debe cumplirse cierto número de hipótesis:

- Los términos λ_e y λ_β son constantes
- El Ar en el sistema no puede tener dos orígenes, radiogénico y atmosférico
- Para el Ar y K, el sistema debe de ser cerrado desde el inicio del evento geológico que se va a datar.
- Ningún exceso de Ar debe de ser introducido en el mineral.

Este método de fechamiento de ^{40}K - ^{40}Ar tiene:

- $T_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años
- En fechamientos de muestras de roca total y minerales (15 ka – 4.6 G.a)
- En roca total (basalto) se obtiene la edad de la extrusión
- En minerales (anfíboles, micas, feldespatos) se obtiene la edad de enfriamiento

Variaciones del contenido de Argón

Exceso de Ar.

- En ocasiones puede suceder que la edad calculada es mayor a la edad real, lo cual, se debe a un exceso de Ar introducido éste, en la red cristalina durante o después de la formación de la roca.

Pérdida de Ar.

- La pérdida de Ar tiene por efecto dar edades geológicas más jóvenes. Si la pérdida es total, el reloj K-Ar es llevado a cero, lo cual reflejará el evento que causo el fenómeno. Algunos de los factores que provocan la pérdida de Ar son:
 - Incapacidad de una red cristalina para retener el Ar
 - Fusión parcial
 - Metamorfismo
 - Alteración meteórica etc.

Método de datación por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

El método de datación por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, descrito en detalle por primera vez por Merrhue y Turner (1966), puede superar algunas de las limitaciones del método convencional de K-Ar, ya

que el potasio y argón se determinan en la misma muestra y sólo se necesita medir las proporciones de isótopos de argón. Se suprime el problema de la falta de homogeneidad de las muestras y la necesidad de medir las concentraciones absolutas de potasio y argón en la muestra analizada, es por ello, que este método es muy adecuado para la datación de muestras muy pequeñas o de valor, tales como meteoritos o rocas lunares y minerales.

Principios del Método.

El método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se basa en la producción de ^{39}Ar mediante la irradiación de muestras de K con neutrones rápidos y térmicos en un reactor nuclear. El ^{39}Ar es inestable y decae a ^{39}K por emisión beta con una vida media de 269 años. Debido a su lenta tasa de decaimiento, el ^{39}Ar puede considerársele como estable durante el corto periodo de tiempo del análisis.

La producción de ^{39}Ar se puede expresar como:

$$^{39}\text{Ar} = ^{39}\text{K} \Delta t \int \phi \sigma_e de$$

Donde Δt = tiempo de irradiación, ϕ = flujos de neutrones, σ = sección eficaz, \int = rango total de energía de neutrones

Utilizando un monitor de flujo, que es una muestra con edad (t) conocida y sustituyendo en la ecuación:

$$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar} = (\lambda_e/\lambda) (^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}) (1/\Delta t) [(e^{\lambda t} - 1) / \int \phi \sigma_e de]$$

Se define al parámetro J como:

$$J = (\lambda_e/\lambda) (^{40}\text{K}/^{39}\text{Ar}) \Delta t \int \phi \sigma_e de$$

J= es conocida ya que es igual al monitor, y depende de las distancias que hay en la posición de las muestras en el colector y puede ser calculada por:

$J = e^{\lambda t_m} - 1 / (^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar})_m$, t_m es la edad conocida del monitor de flujo. Conociendo J de cada muestra entonces sustituimos en la ecuación de la edad:

$$t = 1/\lambda \ln [J_{\text{interpretado}} (^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}) + 1]$$

Como ya se mencionó, este método mide relaciones isotópicas, no necesita concentraciones. En el caso ideal, en que se asume que todo el ^{40}Ar de la muestra es radiogénico o atmosférico, todo el ^{36}Ar es atmosférico y que ^{39}Ar es producido únicamente por $^{39}\text{K}(n,p)^{39}\text{Ar}$. En este caso el cálculo se puede realizar con la siguiente ecuación:

$$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar} = (^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m - 295.5(^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_m$$

m = valor medio, $(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})_{\text{atm}} = 295.5$

Método de datación por ^{14}C

Este método de datación de radiocarbono, fue desarrollado por (Libby et al., 1949; Arnold y Libby, 1949), el cual se basa en la tasa de decaimiento del isótopo ^{14}C , que es radiactivo. Éste se forma en la atmósfera superior por el bombardeo de neutrones de los rayos cósmicos sobre el ^{14}N . La reacción que se produce es: $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$, donde n es un neutrón y p es un protón. El ^{14}C que se produce se oxida rápidamente a $^{14}\text{CO}_2$ y entra en todos los organismos vivos. De esta manera, los organismos vivos que utilizan carbón en sus procesos biológicos, están en equilibrio con la concentración del ^{14}C en la atmósfera. Pero cuando mueren, dejan de recibir el carbón radiactivo atmosférico, y el que contienen empezará a decaer en el organismo. Al decaer, se produce la siguiente relación:

$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + b$, donde b es una partícula beta. Como se conoce la relación entre el decaimiento del ^{14}C y la producción de partículas beta, el conteo de éstas permite estimar el tiempo en que comenzó el decaimiento. Este es el método convencional de radiocarbono para la determinación de la edad de productos orgánicos sin vida.

Un método más reciente y de mayor precisión se basa en la medición directa de los átomos de ^{14}C , mediante el Acelerador de espectrometría de masas (AMS, Accelerator Mass Spectrometry, por sus siglas en inglés), conocido como método por AMS.

1.5. Terminología utilizada.

Para describir las rocas del área de estudio se emplearon los términos **Formación** para describir a un conjunto de estratos de rango intermedio en la jerarquía de las unidades litoestratigráficas. **Miembro** es la unidad litoestratigráfica formal de rango inmediatamente inferior al de la formación, y que siempre es parte de ella. Se reconoce como una entidad establecida dentro de la formación, por presentar caracteres litológicos que lo distinguen de partes adyacentes de la misma. **Unidad Estratigráfica** es un estrato o conjunto de estratos adyacentes susceptibles de reconocerse en un conjunto como una unidad (Hollis D. Hedberg, 1985).

Para la descripción de los depósitos de avalanchas de escombros se utilizó parte de la terminología propuesta por Glicken (1991). A continuación se presenta la definición de los términos más usados.

Avalancha de escombros. Es una masa gigante de material rocoso que se desprende de la cima del volcán el cual se mueve por la acción de la gravedad y cuyo depósito está pobremente seleccionado (Schuter y Crandell, 1984). Estos depósitos pueden presentarse en dos facies principales que son:

Facies de bloques. Cuando el depósito está constituido completamente por bloques de avalancha de escombros.

Facies de matriz o mixta. Cuando el depósito está constituido por una matriz en la cual se encuentra clastos de dimensiones variables.

Bloque. Es la porción del antiguo edificio volcánico transportado hasta su lugar de depósito sin que sufra modificaciones importantes. Puede ser monolítico o presentar una serie de depósitos como se encontraban en el edificio volcánico antes del colapso.

Clasto. Es un fragmento de roca de dimensiones variables, desde milímetros hasta un metro, sin que este se rompa si pasa a través de un tamiz.

Megaclasto. Clasto de dimensiones mayores a 1 m.

Matriz. Material de dimensiones inferiores a 2 mm.

Montículo. Forma típica de los depósitos de avalancha de escombros, constituida por lomeríos distribuidos normalmente en la zona cercana al volcán, los cuales disminuyen en número y tamaño con la distancia de la fuente.

Estructura en rompecabezas. Cuando un fragmentado del depósito se encuentra roto con poca matriz intraclasto en donde se puede reconstruir su forma original.

Lahar. Término Indonesio que significa flujo de escombros, compuesto por una mezcla de detritos y agua, que se genera en los flancos de un volcán (Smith y Fritz, 1989).

Flujo de escombros. Mezcla de escombros saturada en agua con una gran concentración de sedimentos que se mueve pendiente abajo por la influencia de la gravedad. Mezcla bastante uniforme en las fases sólida y líquida, característica de estos flujos que los diferencia de los flujos hiperconcentrados con mayor cantidad de agua.

2. Entorno Tectónico y Geológico del Área de Estudio.

2.1. Marco tectónico

El Volcán Nevado de Colima se localiza en la parte occidental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM; Figura 1 a), en la parte central del Graben de Colima de dirección N-S.

El volcanismo a lo largo del CVTM está asociado a la subducción desde el Plioceno de las Placas de Rivera y Cocos por debajo de la Placa continental de Norte-América a lo largo de la Trincheras Central Americana (TCA) (Ponce et al., 1992; Singh y Pardo, 1993; Pardo y Suárez, 1993, 1995). El CVTM presenta una amplia variedad de estratovolcanes, volcanes monogenéticos, calderas y domo Demant (1978). Predominan los depósitos piroclásticos y depósitos de lavas de composición andesítica-decítica asociados a los estratovolcanes, lavas basálticas-andesíticas asociadas a conos monogenéticos (Demant, 1978; Luhr et al., 1989; Wallace y Carmichael, 1989; Blatter et al., 2001; Siebe et al., 2004; Martínez-Serrano et al., 2004; Schaaf et al., 2005). Además se han identificado productos félsicos (riolíticos a dacíticos) asociados a las calderas y domos. Ferrari et al. (1994) estimaron que los productos volcánicos emitidos por estos estratovolcanes son de composición calci-alkalina, con edades que varían desde los 16 Ma (Mioceno medio) hasta el Reciente. En la parte occidental del CVTM, se han identificado también, en menor proporción, productos de magmas máficos alcalinos asociados a conos cineríticos (Hasenaka y Carmichael, 1985; Luhr et al., 1989).

Estructuralmente, el extremo occidental del CVTM está dominado por la intersección de tres sistemas de rift caracterizados por fallas normales (Figura 1b) asociados con centros volcánicos Cuaternarios. Estos rifts son: rift de Tepic-Zacoalco, rift de Chapala y rift de Colima Luhr y Carmichael (1981, 1990); Luhr et al., (1985); Allan et al., (1991); Garduño y Tibaldi (1991). A partir del punto de intersección, el graben de Chapala se extiende más de 110 km hacia el este, el rift de Tepic-Zacoalco presenta una longitud de 200 km hacia el noroeste hasta el Océano Pacífico, en tanto que el rift de Colima se extiende desde el área de intersección 150 km hacia el sur hasta la costa del Pacífico (Luhr et al., 1985; Luhr y Carmichael, 1990; Garduño et al., 1998). A este ambiente tectónico está asociada la generación de magmas de carácter alcalino, que desde los últimos 4.6 Ma se superponen temporal y espacialmente a magmas de la serie calci-alkalina relacionados con la subducción de la placa Rivera (Allan 1986; Luhr y Carmichael, 1990; Macías et al., 1993). El Graben de Colima (GC) consiste de tres segmentos bien definidos geográfica, morfológica y estructuralmente. La parte norte del GC con una longitud de 65 km y 20 km de ancho, define una cuenca limitada por escarpes de fallas normales de fuerte pendiente, que ha sido previamente definida como la "Depresión de Sayula" (Díaz y Mooser, 1972). Sus paredes presentan un relieve máximo de 1700 m, sin embargo, datos gravimétricos muestran un desplazamiento total de 2.4 km (Allan, 1981). En la parte central del

GC, al oeste de los volcanes de Colima, se encuentra la cuenca definida como "Graben de Toliman" (Herrera, 1967). En esta zona, el límite oeste del GC se encuentra fuertemente marcado por escarpes de fallas normales de hasta 1700 m de relieve, en tanto, su límite este, es poco evidente, sólo se observan pequeños y dispersos escarpes de fallas. A partir de este punto hasta la costa del Océano Pacífico, no existen evidencias de estas estructuras; debido a ello, Allan (1986) reportaron que la parte sur del Graben de Colima, está representada por una zona compleja de bloques fallados de 50 a 60 km de ancho, caracterizada por una planicie aluvial amplia que se extiende hasta la costa del Océano Pacífico. Serpa et al. (1992) propusieron que a partir del CVC no existe una prolongación del Graben de Colima, debido a la aparente ausencia de fallas normales N-S y a un estilo diferente de deformación en la región (Figura 1b). Sin embargo, Luhr et al. (1985), Bourgois et al. (1988a; 1988b), Bourgois y Michaud (1991) y Bandy et al. (1995) han sostenido la extensión N-S del Graben de Colima a partir del punto triple hasta la costa del Pacífico y la Trinchera Americana Central.

El sector meridional del GC afecta a las calizas de plataforma que se depositaron en la Cuenca de Colima (Grajales-Nishimura y López-Infanzón, 1983). Estas rocas de edad cretácica fueron deformadas por una fase de esfuerzos compresivos que generaron pliegues amplios (Serpa et al., 1992; Smith, 1990), los que a su vez, fueron afectados por intrusiones de yesos y cuerpos intrusivos graníticos de edad Terciaria (Smith, 1990). La parte central del Graben de Colima, sobresale por la presencia de dos estructuras geomorfológicas importantes; el Complejo Volcánico de Colima (CVC) y la Falla Tamazula (FT) (Fig. 2), ésta última con dirección NE-SO, Garduño et al., (1998). Estos autores, consideran que en la región, la FT desplaza a rocas con edades del Mesozoico al Cuaternario, formando la frontera occidental de la cuenca de Colima. De la misma forma concluyeron que la FT es una estructura regional activa, que afecta al CVC, generando el Graben Alceseca-Atenquique que tiene una orientación NE-SO y que la misma falla ha jugado un papel importante en la migración del vulcanismo hacia el sur y en la generación de avalanchas gravitacionales.

2.2. Marco geológico regional

El Complejo Volcánico de Colima se emplazó sobre un basamento Cretácico-Terciario compuesto por rocas sedimentarias en su mayoría de tipo carbonatado, rocas volcánicas e intrusivas (Grajales-Nishimura y López Infanzón, 1983; Rodríguez-Elizarrarás, 1995) (Fig. 1b)

con edades que varían de 114 Ma a 52 Ma (Gastil and Jensky, 1978; Lange y Carmichael, 1991; Richter et. al., 1995; Ferrari et. al., 1997). Sobre éstas se emplazaron rocas alcalinas típicas de islas oceánicas, o de zonas de extensión intraplaca continental contemporáneamente con rocas calci-alcalinas, típicas de arcos volcánicos en márgenes continentales, con edades que varían de 10 Ma a 1 Ma (Bailey, 1974; Carmichael et al., 1974; Macdonald, 1974; Allan and Carmichael, 1984; Luhr et al., 1985).

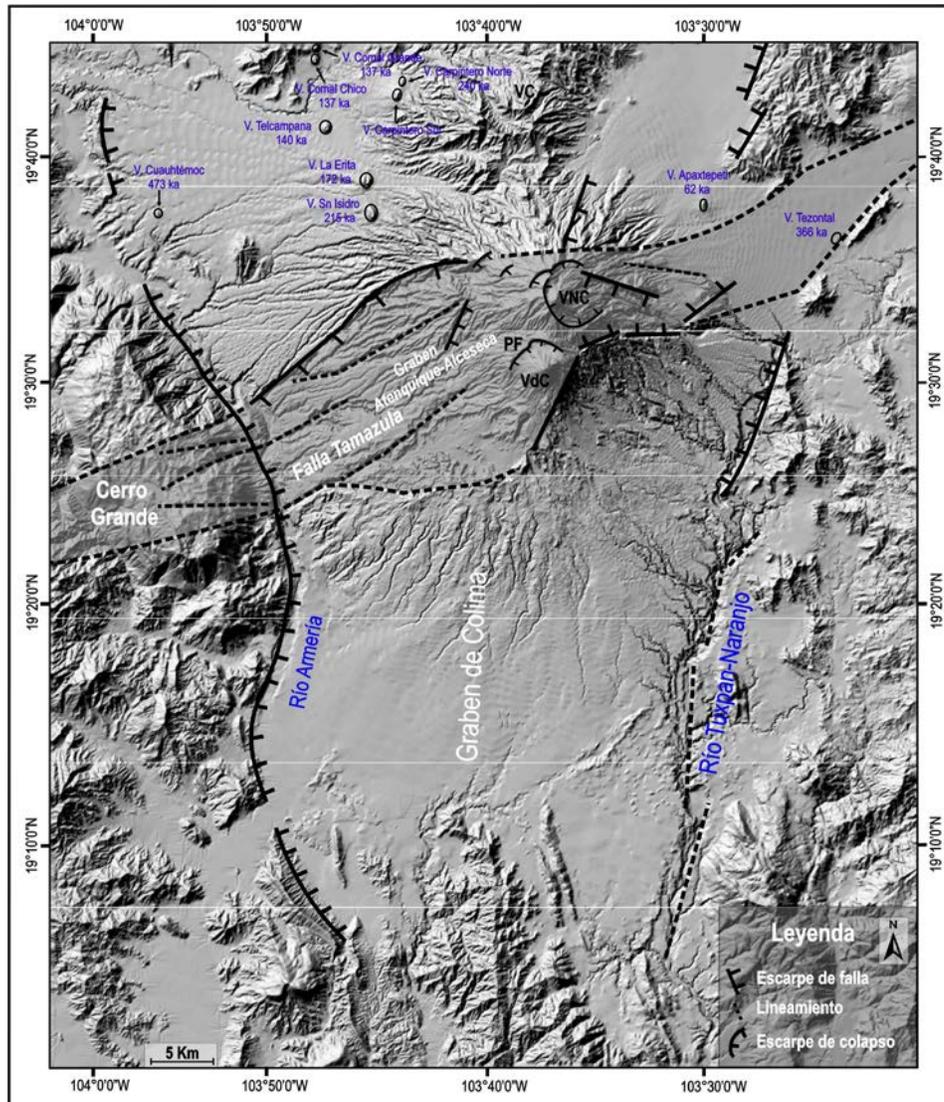


Figura 2. Modelo digital de elevación que muestra al Complejo Volcánico de Colima (CVC), emplazado en la intersección de dos estructuras regionales: 1) El Graben de Colima con dirección N-S, y 2) La Falla Tamazula (FT) con dirección NE-SW. Como se puede ver en la imagen, la FT afecta a los volcanes de Colima generando un pequeño graben definido por Garduño et al., (1998) como Graben Atenquique-Alceseca. La FT en su extremo SW, afecta a las rocas Cretácicas de Cerro Grande de la Formación Tepames. En el sector NE afecta a rocas del Pleistoceno del CVC con desplazamientos verticales > 200 m. En los sectores NW y NE del Nevado, se encuentra un grupo de 10 conos monogénéticos, que se formaron contemporáneamente a su actividad eruptiva. Las abreviaturas en la imagen son: VC- Volcán Cántaro, VNC-Volcán Nevado de Colima, PF- Paleofuego, VdC- Volcán de Colima (Figura modificada después de Cortés et al., 2010).

2.3. Geología local

2.3.1 Cretácico.

Los depósitos del Cretácico pertenecen a la **Formación Tecalitlán (Ktc)**, que está formada por una secuencia de depósitos de flujos de lava de composición riolítica a dacítica, flujos de lava andesítica con intercalaciones de tobas, todos ellos muy compactos y de color rojizo, gris verdoso a café (Pantoja-Alor y Estrada-Barraza, 1986). Por lo general, esta formación aflora en el sector oriental del CVC, sobre la carretera federal Colima-Guadalajara (puente de barranca Beltrán), representada por pequeños afloramientos de rocas meta-areniscas y meta-andesitas, éstas últimas de color gris oscuro a rojizo, con nódulos rellenos de calcita y epidota. Son afectadas por un metamorfismo de bajo grado, así como por diques andesíticos emplazados a lo largo de planos de fracturas con rumbos N150° (Garduño V. H. 1994, comunicación personal). (Luhr y Carmichael, 1990 b) definen a estas rocas, como meta-ígneas de basamento con una edad del Terciario, sin embargo, Cortés et al., (2005) con base en la posición estratigráfica que presentan, las incluyen dentro de la Formación Tecalitlán, del Cretácico. Su distribución se restringe al SE del área de estudio, a lo largo de la Carretera Federal 54 Colima-Guadalajara, sobre el margen norte de la Barranca Beltrán (ver mapa geol. Fig. 5, siguiente capítulo).

2.3.2 Formación Encino (Ke)

El segundo paquete de rocas más antiguas en la zona de estudio, corresponde a pequeños afloramientos de areniscas y lutitas estratificadas de color verde, asociadas con la Formación Encino (Ke) del Cretácico Inferior-Medio, (Pantoja-Alor y Estrada-Barraza, 1986). Su distribución se restringe a ~4 km al sur del poblado de Tenexamilpa (Fig. 5), en donde presenta un espesor > 35 m. Las areniscas son de color violeta en roca sana e intemperizan a café oscuro, con pequeños fragmentos líticos de forma sub-redondeada y amígdalas rellenas con epidota Cortés et al., (2005). Estas rocas son intrusionadas por un dique andesítico de 25 m de ancho, de textura porfirítica con fenocristales de feldespatos y hornblenda.

2.3.3 Formación Tepames (Ktp)

Las rocas de esta formación en el área de estudio se caracterizan por definir estratos masivos de caliza (Ktp) del Cretácico (Albiano-Cenomaniano-superior), comúnmente

dolomitizada, de color gris claro, con facies pre-arrecifales con una macrofauna de gasterópodos Smith (1990). En el sector SO del área de estudio, conforman la estructura de anticlinal de Cerro Grande con dirección NNW-SSE, en donde alcanzan un espesor de 1900 m Cortés et al., (2005). Representan la mayoría de las serranías principales circundantes al área de estudio. En el sector E del área de estudio, el Cerro Peña Colorada, es el rasgo morfológico principal constituido por rocas de esta formación. Son calizas de color gris oscuro, de textura sacaroide por recristalización, con una pseudo-estratificación gruesa y un plegamiento considerable. En la zona de Atenquique sobre el margen este del Río Tuxpan-Naranjo, a lo largo de la vía del Ferrocarril, al parecer las calizas están sobreyacidas de forma angular, por una secuencia de rocas de color gris claro con capas delgadas estratificadas con un diaclasamiento y muy plegadas. Un pequeño afloramiento de estas rocas (Kmar), se encuentra a lo largo de la autopista Colima Guadalajara, sobre el margen oeste de la barranca Agua Escondida, en donde fueron muestreadas por Valdez (2006), quién las describe como rocas de color pardo claro al intemperismo, y café claro al fresco, con un aspecto fracturado y huecos abundantes rellenos con cristales de muscovita, cuarzo y turmalina formando rosetas. La mineralogía dominante de las rocas, es cuarzo y poco feldespato, lo cual sugiere que se trata de meta-areniscas, que probablemente sufrieron un metamorfismo de contacto.

Otro pequeño afloramiento de estas rocas aparece a 1 km al NE de Tenexcamilpa, sobre el margen este del Río Tuxpan-Naranjo (Cortés et al., 2005) como areniscas asociadas a la Formación Tecalitlán del Cretácico inferior. Sin embargo, información de campo adicional durante el presente estudio, ha permitido ubicar a estas rocas en el Cenomaniano superior con una escasa distribución por lo que probablemente no se habían reportado en la literatura.

2.3.4 Formación Coquimatlán (Kc)

Esta Formación en el área de estudio está constituida por una secuencia de estratos delgados a medianos de conglomerados, areniscas rojas, limonitas y lutitas grises del Cretácico superior. Los conglomerados están formados por fragmentos subangulosos a subredondeados de calizas y rocas volcánicas, inmersos en una matriz arenosa de color rojizo, encontrándose interestratificados con las areniscas, limonitas y lutitas. La distribución de esta secuencia se encuentra al SO del Volcán Nevado de Colima (zona de Zacoalpan) sobre las calizas del flanco oriental de Cerro Grande, a lo largo del margen sur del Río Armería (Cortés et al., 2005). En el área de estudio, un segundo pequeño afloramiento de esta formación, se encuentra al NO del

poblado de Zapotitlán de Vadillo, Jalisco, conformando la estructura morfológica del Cerro El Petacal (Fig. 5).

2.4. Terciario

Las rocas del Terciario en el área de estudio, están representadas por escasos afloramientos de poca extensión de rocas ácidas intrusivas y rocas volcánicas (ignimbritas no diferenciadas).

2.4.1 Rocas intrusivas (Tigia).

La distribución de estas rocas en el área de estudio se encuentra al SE del Nevado de Colima, en donde definen las principales estructuras morfológicas, una de ellas, es el Cerro El Chilero (Fig. 5). En muestra de mano, las rocas intrusivas son de color crema y textura porfírica, con fenocristales de feldespatos y escasos minerales hexagonales, posiblemente de biotita. En algunos lugares se encuentran muy alteradas y deleznales. En este sector SE, afectan a las calizas masivas de la Formación Tepames del Cretácico, generándoles una textura sacaroide por recristalización. Por la relación estratigráfica que guardan estas rocas, se pueden correlacionar con las rocas intrusivas que afectan a las calizas masivas de Cerro Grande, al SO del Nevado de Colima, a lo largo de la carretera Villa de Álvarez-Minatitlán, las cuales, Pantoja-Alor y Estrada Barraza (1986) las definen de composición cuarzomonzonítica, del Paleoceno Temprano, con una edad K-Ar de 66 Ma. Estos autores, reportan también, cerca de Pihuamo, cuerpos intrusivos de composición cuarzomonzonítica, cuarzodiorítica y granítica.

2.4.2. Rocas ignimbríticas (Tigei)

En el área de estudio, estas rocas se encuentran representadas por pequeños afloramientos distribuidos al SE del Nevado de Colima, sobre el margen O del Río Tuxpan-Naranjo, a lo largo de la vía del Ferrocarril. Son ignimbritas soldadas de color rojizo con abundantes *fiammes* con tamaños de 1.5 a 2 cm (Figura 3 a y b, en Cortés et al. (2005)). En este sector, sobreyacen de forma discordante a las calizas de cretácicas de la Formación Tepames. Afloramientos de mayor extensión de estas rocas, se encuentran distribuidos al NE, E y SE de Ciudad Guzmán, Jalisco (Cortés et al. 2005).

2.4.3. Vulcanismo monogenético

Las primeras manifestaciones de vulcanismo alcalino en el Graben de Colima, ocurrieron hace 4.1 a 4.6 Ma (Allan, 1986). Este vulcanismo que incluye basanitas, leucitas-basanitas y minettes, se presenta asociado a flujos de lava controlados estructuralmente por fracturas orientadas N-S, paralelas a las fallas normales que limitan el Graben de Colima. Durante el Pleistoceno tardío, este vulcanismo se manifestó en el CVC, mediante un grupo de 9 conos monogenéticos y flujos de lava asociados, ubicados éstos al ONO y NE del VNC (Luhr y Carmichael, 1981). Carmichael et al. (2006) reportaron para estos conos monogenéticos, edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ que varían de 473 ka a 62 ka (Fig. 2).

3. Descripción

3.1. Morfología del VNC

El Volcán Nevado de Colima (VNC) ($19^{\circ}33'47.09''\text{N}$, $103^{\circ}36'32.02''\text{O}$) es un estratovolcán andesítico con una altura de 4,260 m sobre el nivel del mar. Su base tiene un diámetro de ~25 km y sus productos cubren una superficie de ~1000 km² con un volumen estimado de 350 km³ (Cortés et al., 2010). Este volumen es menor al reportado por Luhr y Carmichael (1990b) de 450 km³. El VNC tiene su base a una elevación aproximada de 1,800 m alcanzando su cima los 4260 m de altura, representada por el domo central conocido como El Picacho. Los productos emitidos por este volcán, se encuentran distribuidos ampliamente en sus sectores ONO y ESE. En el sector ONO se extienden como grandes abanicos con longitudes de 30 a 40 km y anchuras de 8 a 12 km. Estos abanicos están formados por espesos depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, de bloques y cenizas, intercalados con depósitos volcanoclásticos. En el sector ESE, estos depósitos definen abanicos de 7 km de longitud y 5 km de ancho. En esta zona, a lo largo de la Barranca Atenquique y el Río Tuxpan-Naranjo, forman varias terrazas con superficie plana y paredes casi verticales con alturas superiores a 200 m.

Tanto el edificio complejo del VNC como sus depósitos expuestos en los abanicos, presentan un alto grado de disección, representada por una red fluvial densa de tipo radial con barrancos profundos y amplios valles que descienden de las partes altas del volcán. En el flanco NO del domo El Picacho, ocurren depósitos de morrenas y en sus flujos de lava, huellas de erosión glacial (Lorenzo, 1961), lo cual sugiere, que antes de la última glaciación reportada en el área, hace más de 12,000 años, el VNC ya se encontraba extinto.

El análisis morfológico del modelo digital de elevación del VNC (Fig. 3) y trabajo de campo, han permitido identificar los vestigios de cuatro cráteres antiguos, representados como (I, II, III, IV). Los tres primeros fueron generados por eventos de colapso lateral que produjeron igual número de avalanchas de escombros, cuyos depósitos se encuentran distribuidos hacia el SO, S y SE. Estos cráteres se asocian a igual número de edificios volcánicos antiguos, lo que refleja una evolución compleja de la actividad eruptiva del VNC. Los dos primeros cráteres (I y II) se observan en el sector NO del Nevado (Cortés et al., 2005). Su forma irregular y la cobertura de depósitos volcánicos posteriores, hace difícil determinar su diámetro original. Los otros dos remanentes de cráter (III y IV) son evidentes cerca de la cima del volcán (Mooser, 1961). Estos cráteres presentan diámetros de 7 y 5 km con su eje de abertura hacia el SE-NE. Asociados a la actividad eruptiva del VNC ocurren tres domos laterales, uno de ellos emplazado sobre el flanco NO, definido en este trabajo como: Domo Los Núñez (DLN) (Fig. 3). El segundo de estos domos, se emplazó sobre el flanco NE, a 6.5 km de la cima actual del Nevado, definido como: Domo Los Mazos (DLM). El tercero de ellos y más reciente, se encuentra a 10 km al SE del Nevado, definido como Domo Alto (DA, Estación de Microondas). Estos dos últimos domos, están afectados por la Falla Tamazula de dirección NE-SO (Figs. 3 y 45).

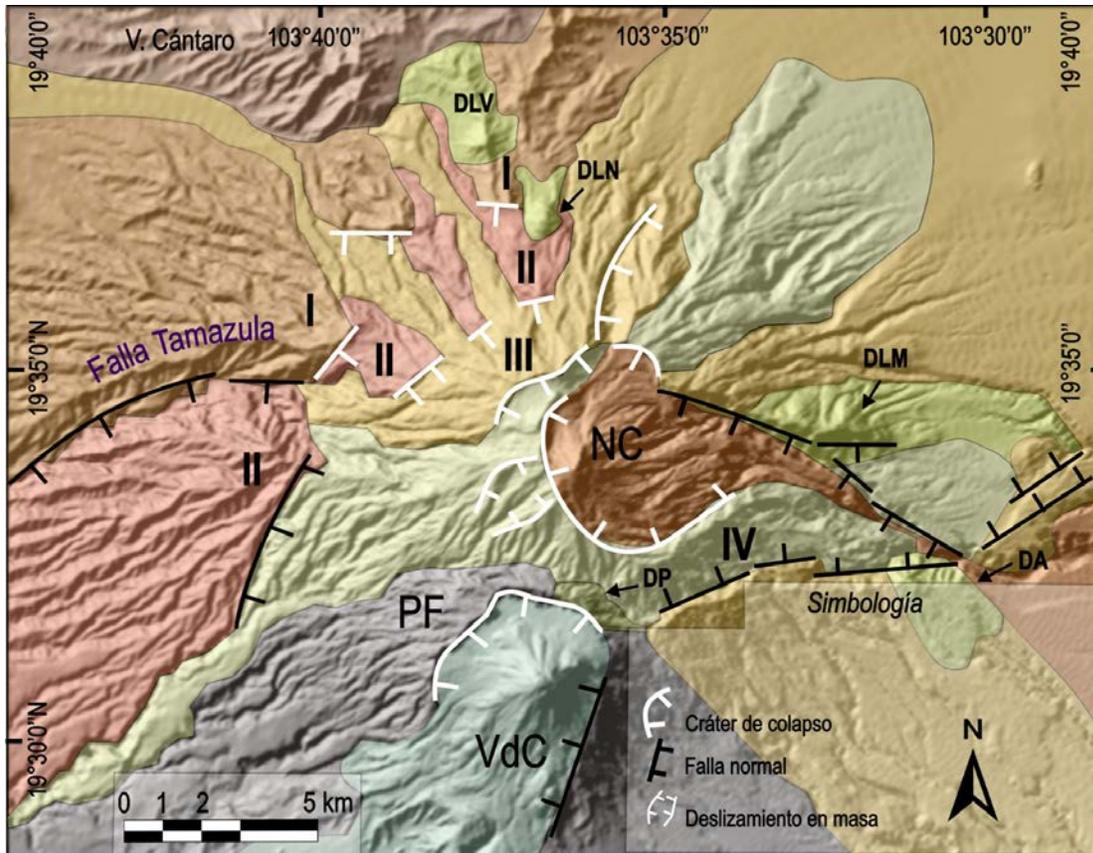


Figura 3. Modelo digital de elevación del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores, en el cual se muestran los remanentes de cráter de colapso representados como (I, II, II, IV), asociados a antiguos edificios volcánicos del Nevado. También se muestran trazas de la Falla Tamazula, que ha jugado un papel importante en la evolución del CVC, así como algunos de los domos periféricos que se emplazaron sobre los flancos del Nevado de Colima, asociados con su actividad eruptiva. Abreviaciones: NC, Nevado de Colima, PF, Paleofuego, VdC, Volcán de Colima, DLV, Domo Las Víboras, DLN, Domo Los Núñez, DLM, Domo Los Mazos, DA, Domo Alto, DP, Domo El Playón.

3.2. Estratigrafía

Para describir la estratigrafía del Nevado de Colima, ésta se dividió en cinco miembros principales que son: Miembro Nevado 1-5 (MN1-MN5), como se muestra en el mapa geológico de la figura 5. La división se realizó con base en los rasgos estructurales del volcán, evidentes en el modelo digital de elevación, imágenes de satélite y verificados durante el trabajo de campo, los cuales representan los remanentes de antiguos edificios volcánicos. Durante el presente estudio se verificaron 127 localidades de control y secciones estratigráficas, y con el apoyo de fechamientos radiométricos de ^{14}C y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, se identificaron 31 unidades litoestratigráficas que constituyen los cinco Miembros del Nevado de Colima (MN1-MN5), los cuales se muestran en la columna estratigráfica compuesta del VNC (Fig.4). Para cada una de estas unidades litoestratigráficas (unidades de aquí en adelante), se describe su distribución, las características

texturales de sus depósitos, petrografía, composición química, volumen y edad (absoluta o relativa). Su distribución espacial se muestra en el mapa geológico de la figura 5. En algunas de ellas, se logró definir su espesor promedio, por lo que se presenta un volumen estimado. La ubicación de las localidades de control de campo y secciones estratigráficas se presentan en la figura 6. Todas las distancias de las localidades están dadas a partir de la cima actual del Volcán Nevado de Colima. Las edades radiométricas fueron obtenidas en su mayoría en análisis de roca total mediante el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, y en paleosuelos o material carbonizado con el método de ^{14}C (ver tablas 3 y 4). En el texto las edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ se presentan en miles de años (ka) y las edades ^{14}C en años antes del presente (AP). En la tabla 5, se muestran las edades radiométricas obtenidas con el método de K-Ar en rocas del VNC publicadas previamente por otros autores.

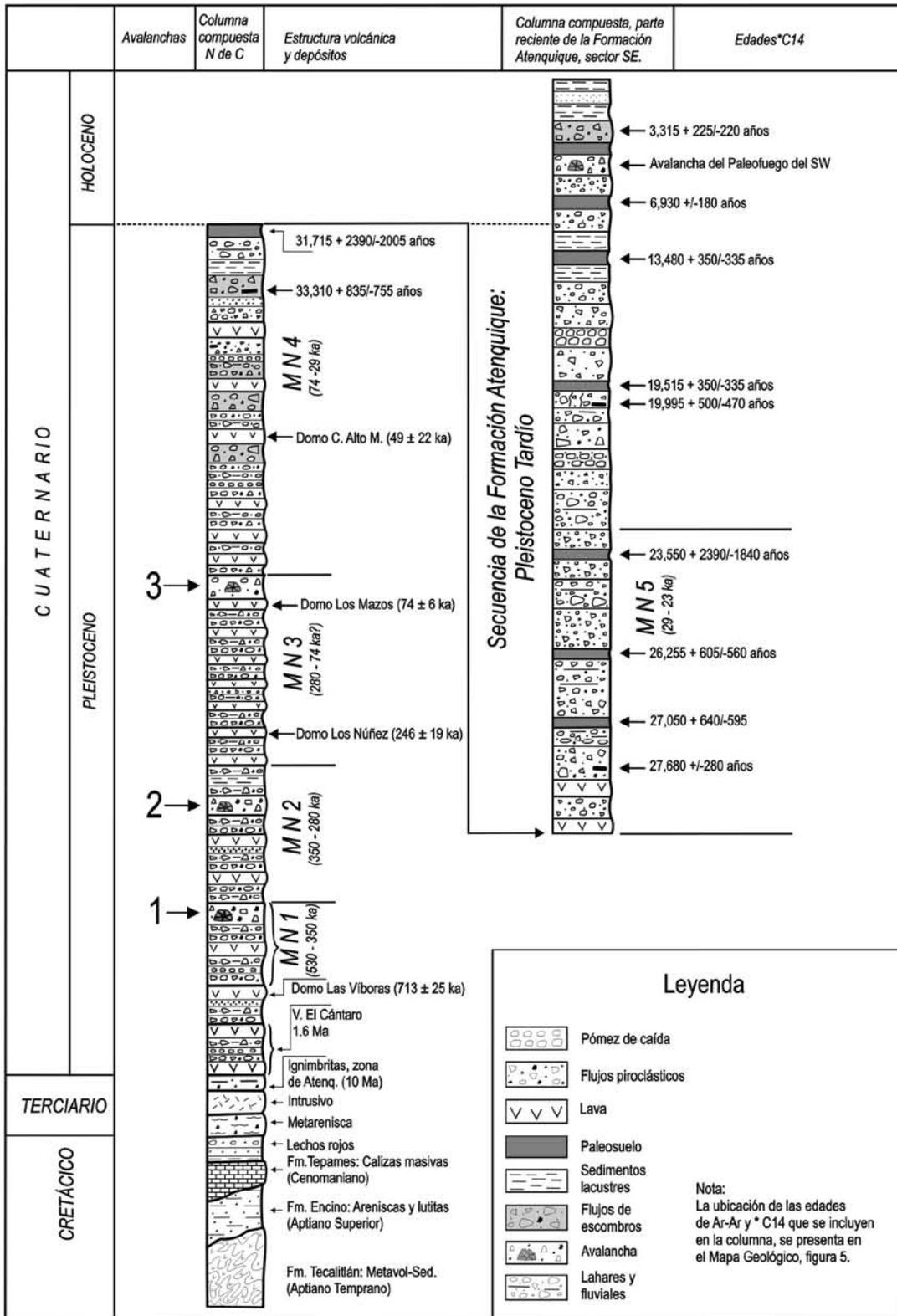


Figura 4. Sección estratigráfica compuesta del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores. Para su construcción, las unidades que la constituyen se agruparon en cinco fases principales definidas como: Miembros Nevado1 (MN1-MN5). En el texto se describen los depósitos y se detallan los fechamientos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C (Tablas 3 y 4).

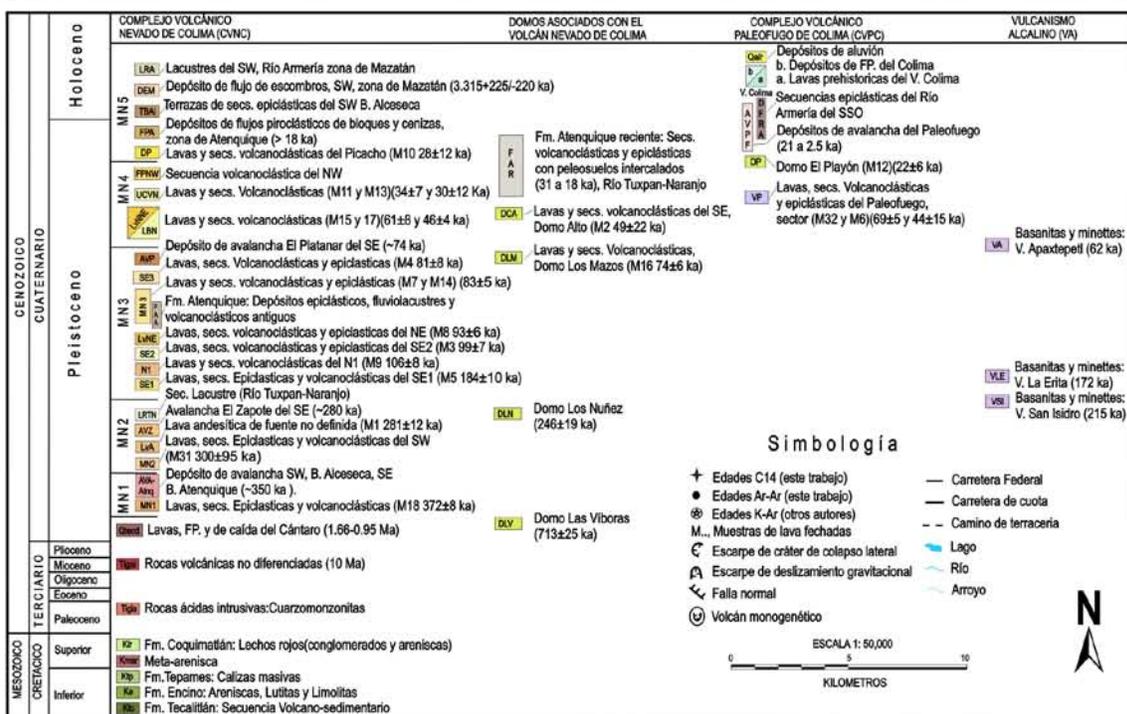
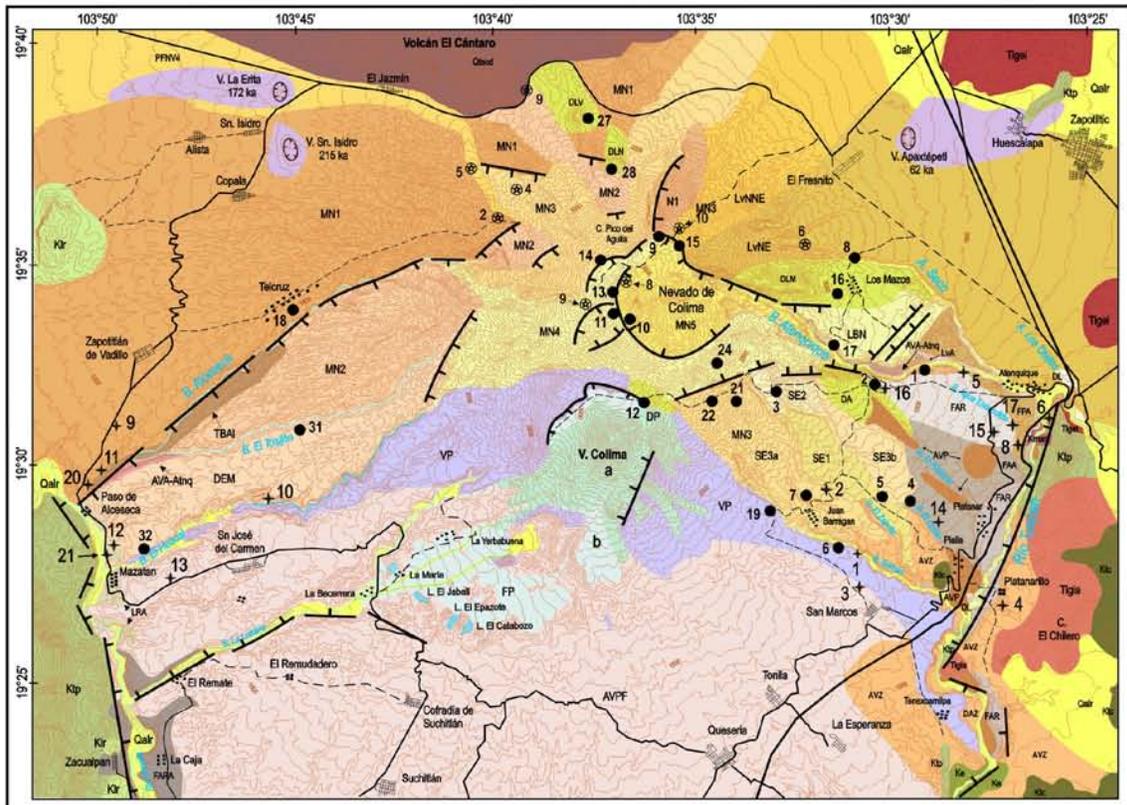


Figura 5. Mapa geológico del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores (modificado de Cortés et al., 2005; 2010). Los puntos negros en el mapa muestran la ubicación de las muestras de lava datadas con el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Las estrellas muestran la ubicación de las edades de C^{14} obtenidas durante el presente trabajo. Las estrellas en círculo muestran la ubicación aproximada de las edades de K-Ar reportadas en trabajos previos por otros autores.

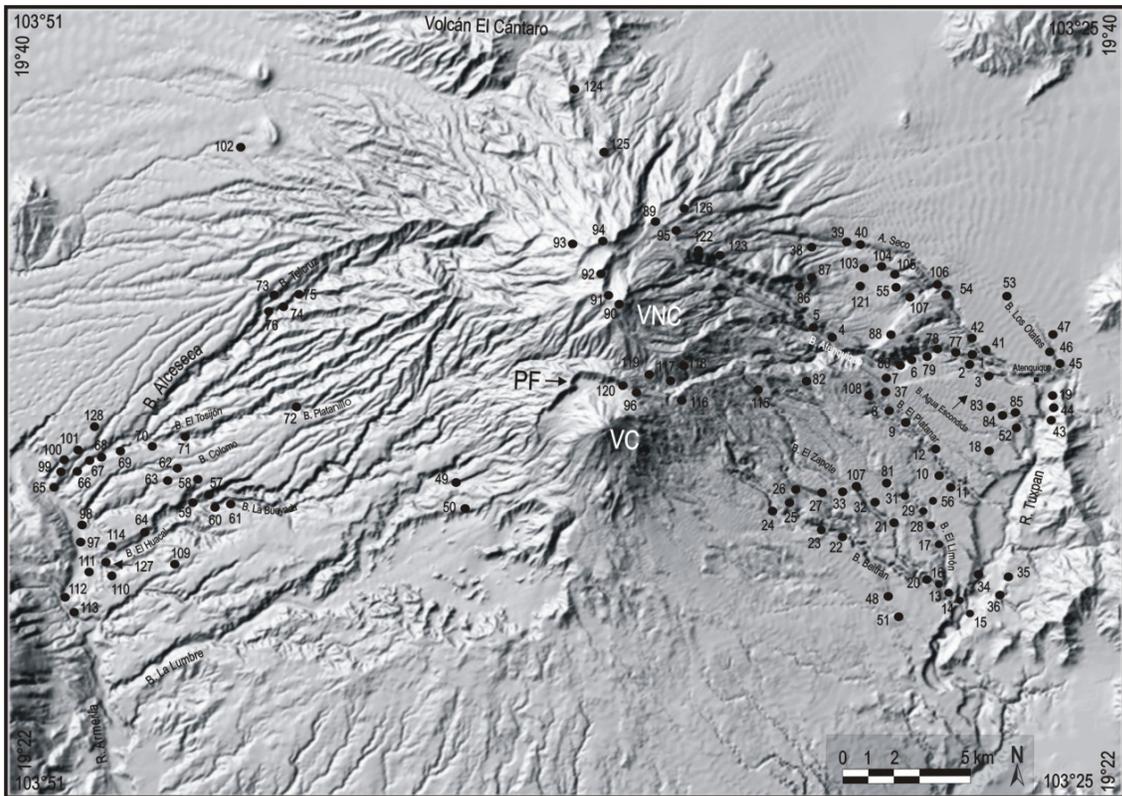


Figura 6. Modelo digital de elevación del Volcán Nevado de Colima y sus alrededores, en el cual se muestra la ubicación de las localidades verificadas en campo durante el desarrollo del presente trabajo. Abreviaciones: VNC, Volcán Nevado de Colima, PF, Paleofuego, VC, Volcán de Colima.

A continuación se describen en orden cronológico las unidades estratigráficas definidas en el presente trabajo.

3.2.1. Unidad Domo Las Víboras (DLV) (713 ± 25 ka).

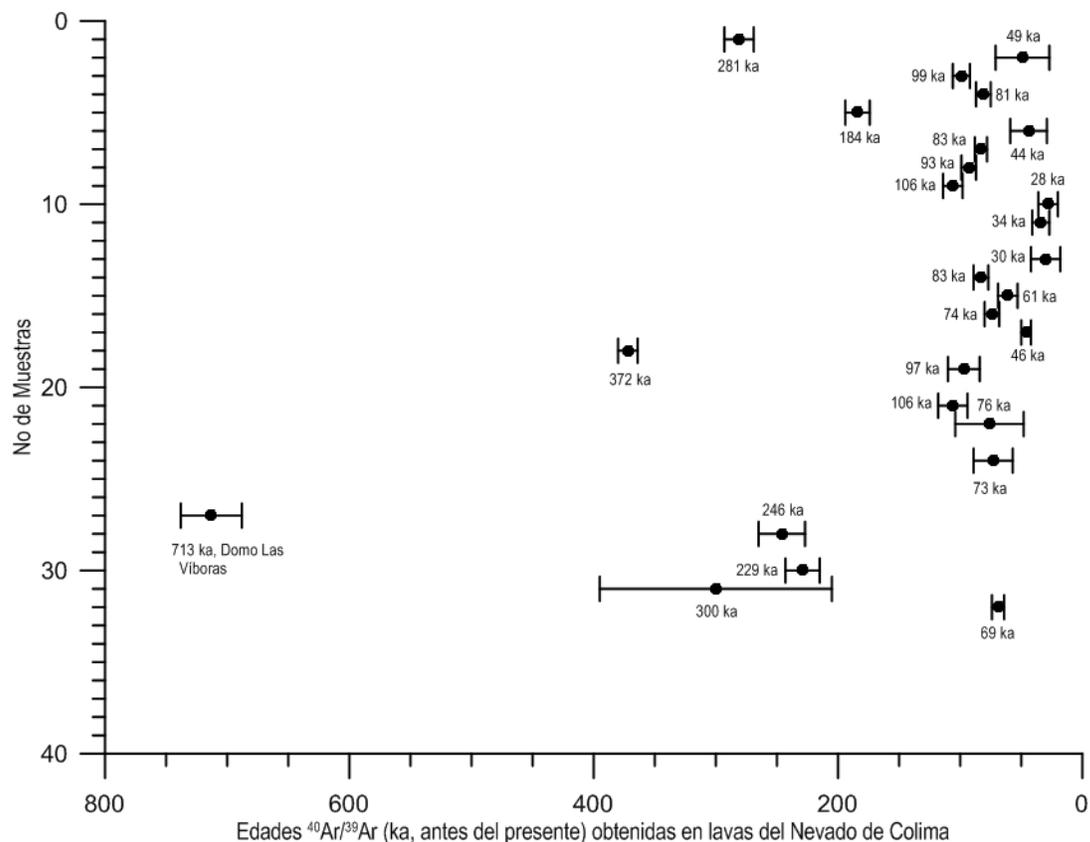
Sobre el flanco NNO del Nevado de Colima a 8 km de su cima, se encuentra emplazado el Domo Las Víboras (DLV) con una altura desde su base de ~350 m y un volumen aproximado de 0.1 km^3 . El domo está constituido por depósitos de flujos de lava de corto alcance de ~0.8 km a partir de su cima. En muestra de mano las rocas de este domo son de color gris claro de textura fanerítica con minerales de plagioclasa y posibles piroxenos, con un contenido de SiO_2 de 62.36% (Tabla 7). Una muestra de roca (M27) obtenida de uno de sus flujos de lava fue fechada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 713 ± 25 ka (Tabla 3).

Tabla 3. Edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenidas en roca total de flujos de lava del Volcán Nevado de Colima (ver el mapa geológico de la figura 5 para la ubicación de las muestras) en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Alaska en Fairbanks por el Dr. Paul W. Layer. Todas las edades están reportadas con el nivel de sigma =1, las edades de "plateau" o meseta se muestran en negritas. MSWD: Significa el cuadrado de la desviación ponderada.

Muestra	Coordenadas		Edad de Meseta (ka)	Información de Meseta	Isócrona de edad (ka)	Isócrona de información	
	N	W		MSWD		$(^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar})$	MSWD
M12	19°31'37.25"	103°36'21.06"	22 ± 6	0.19	27 ±17	292 ± 9	0.33
M10	19°33'40.60"	103°36'33.98"	28 ± 8	0.17	29 ±12	295 ± 5	0.14
M13	19°34'12.58"	103°36'59.30"	30 ± 12	0.03	28 ±12	296 ± 1	1.35
M11	19°33'51.26"	103°36'51.14"	34 ± 7	0.06	28 ±12	299 ± 4	0.54
M6	19°28'15.55"	103°31'33.38"	44 ±15	0.10	65 ±17	290 ± 2	0.60
M17	19°32'36.87"	103°31'7.23"	46 ± 4	0.11	51 ± 4	296 ± 13	0.08
M2	19°31'54.22"	103°30'20.74"	49 ± 22	0.38	59 ± 27	294 ± 2	1.10
M15	19°35'24.23"	103°35'17.26"	61 ± 8	0.31	61 ±10	296 ± 1	0.87
M32	19°27'56.81"	103°49'21.64"	69 ± 5	0.75	100 ±15	278 ± 8	0.23
M24	19°32'01.32"	103°35'20.99"	73 ± 16	0.73	49 ± 21	298 ± 2	0.64
M16	19°34'5.34"	103°31'49.81"	74 ± 6	0.82	76 ± 5	295 ± 1	1.06
M22	19°31'30.29"	103°35'01.00"	76 ± 28	0.17	70 ±26	297 ± 3	0.68
M4	19°29'5.53"	103°29'49.63"	81 ± 8	0.45	83 ± 8	295 ± 2	0.35
M7	19°29'5.30"	103°31'31.04"	83 ± 5	0.20	83 ± 5	294 ± 3	0.33
M14	19°35'8.74"	103°36'47.29"	83 ± 6	0.29	86±12	290 ± 6	1.41
M8	19°34'55.59"	103°31'59.28"	93 ± 6	1.16	103 ± 7	293 ± 3	0.65
M19	19°28'46.65"	103°32'48.74"	97±13	0.40	90 ±13	298 ± 2	0.69
M3	19°31'55.73"	103°32'33.38"	99 ± 7	0.30	97 ±9	294 ± 4	0.60
M21	19°31'53.47"	103°33'33.29"	106 ± 12	0.53	130 ±24	292 ± 5	0.36
M9	19°35'36.34"	103°35'38.95"	106 ± 8	1.28	104 ±9	295 ± 3	1.02
M5	19°29'6.65"	103°29'53.18"	184 ± 10	0.80	192 ±12	294 ± 3	0.51
M30	19°34'53.67"	103°34'41.71"	229 ± 14	0.73	168 ±17	306 ± 2	0.96
M28	19°37'14.86"	103°36'57.08"	246 ± 19	0.92	389 ±13	344 ± 3	1.26
M1	19°32'10.73"	103°29'41.88"	281 ± 12	0.24	281 ±11	295 ± 2	0.28
M31	19°31'05.81"	103°45'38.30"	300 ± 95	0.25	43 ±114	301 ± 2	0.30
M18	19°33'57.35"	103°44'59.83"	372 ± 8	0.52	378 ±11	294 ± 3	0.49
M27	19°38'41.95"	103°37'34.03"	713 ± 25	0.39	726 ±26	293 ± 4	0.49

3.2.2. Miembro Nevado de Colima 1, MN1 (~530 - 350 ka)

Los depósitos asociados al Miembro 1 del Nevado de Colima, afloran principalmente al ONO y N del volcán. En el sector ONO alcanzan distancias de 30 km a partir de la cima actual del Nevado y cubren una superficie aproximada 325 km². Los más antiguos subyacen a un flujo de lava fechado por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 372 ± 8 ka A.P., los cuales son cortados por el límite norte de la Falla Tamazula (Fig. 7).



Grafica 1. Edades obtenidas con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ realizados en el Laboratorio de Geocronología de la Universidad de Alaska en Fairbanks. Las edades de esta gráfica se muestra como puntos con su barra de error, presentadas en la tabla 1, obtenidas en flujos de lava del Volcán Nevado de Colima (este trabajo).

3.2.2.1 Unidad Lava Andesítica Telcruz (LAT) (372 ± 8 ka)

Este derrame de lava se encuentra aflorando a 15 km al O del Nevado de Colima, en las inmediaciones del poblado de Telcruz, Jalisco, a lo largo del margen norte de la barranca del mismo nombre, afluente de la Barranca Alceseca (Fig. 6, loc. 73). LAT se presenta de forma masiva con un espesor aproximado de 40 m. En muestra de mano la roca es de color gris claro, de textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa, piroxenos y escasos anfíboles, con un contenido de SiO_2 de 53.2 % (Tabla 7), por lo que se clasificó como andesita basáltica. En esta localidad, LAT sobreyace a depósitos volcanoclásticos y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas intercalados, que en conjunto presentan un espesor >80 m. Los depósitos volcanoclásticos están constituidos por clastos subangulosos a subredondeados de andesita de textura fanerítica y porfirítica con fenocristales de plagioclasa, y hornblenda, de color gris, negro y rojizo, inmersos en una matriz de arena fina a gruesa muy compacta. De igual forma, el depósito de lava se encuentra sobreyacido por ~20 m de depósitos de flujos hiperconcentrados y

fluviales, que a su vez, subyacen a un depósito de ceniza y pómez de ~30 m de espesor, color amarillo con delgados horizontes de líticos de caída intercalados. En esta localidad, se tomó una muestra de roca de LAT (M18) que fue fechada en 372 ± 8 ka (Tabla 3).

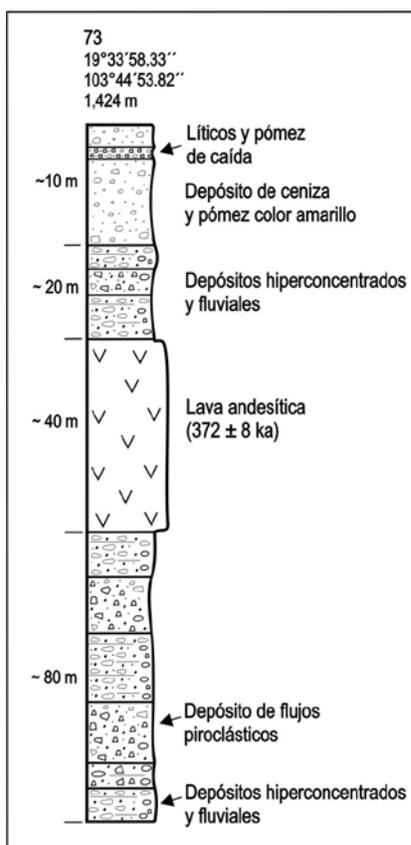


Figura 7. Sección estratigráfica compuesta representativa del MN1, en el sector SO, a lo largo del margen norte de la Barranca Alceseca. La localización de la sección se muestra en el modelo digital de elevación de la figura 6.

A 25 km del Nevado de Colima, sobre el margen norte de la barranca Alceseca, cerca de su desembocadura con el Río Armería, los depósitos que constituyen la parte media inferior de la columna estratigráfica, asociados con el MN1, corresponden a depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y depósitos de flujos de escombros intercalados (Fig. 8, loc. 99 a). La parte media superior de la columna estratigráfica, está constituida por depósitos de flujos de escombros, formados por ~30% de clastos subangulosos y subredondeados de andesita de textura fanerítica y porfirítica de color gris, negro y rojizo, algunos de ellos con abundantes fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. La matriz que los

soporta es de arena de grano medio a grueso, color café claro muy compacta, la cual representa ~70% del volumen total de cada depósito. Aun cuando, el tamaño predominante de los clastos de andesita es de 15 a 40 cm, también existen clastos con diámetros >2 m. La mayoría de ellos se encuentran imbricados de forma horizontal dentro de los diferentes depósitos (Fig. 8, loc. 100). En algunos de estos depósitos, se pueden observar antiguos paleocanales rellenos con material fluvial y depósitos de flujos hiperconcentrados. El contacto entre ellos, es muy horizontal y en algunos casos, éste es muy erosivo, en otros, está definido por delgados horizontes de arena gruesa a fina y líticos angulosos y subangulosos de andesita con tamaños de 0.5 a 4 cm, soportados grano a grano, con gradación inversa algunos de ellos. El espesor de los depósitos varía desde 2 a más de 15 m (Fig. 8, loc. 100). Algunos de estos depósitos están afectados por fallas normales de dirección N-S, como se puede ver en el corte reciente de la carretera Colima-

Zapotitlán de Vadillo (Fig. 8, loc. 99 b). En la parte media superior de la columna estratigráfica, se encuentra intercalado un depósito de ~4 m de espesor de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo, poco endurecido. Finalmente, la parte superior de la columna, está cubierta por dos depósitos amarillos, de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, el inferior con un espesor > 12 m y una edad de 45,175 + 4355/-2810 años A.P. y el superior con un espesor ~ 2 m, separados por un paleosuelo de 60 cm fechado con el método de ¹⁴C en 6,930 ± 180 años A.P. La distribución de toda esta secuencia aparece en el mapa geológico como (MN1).

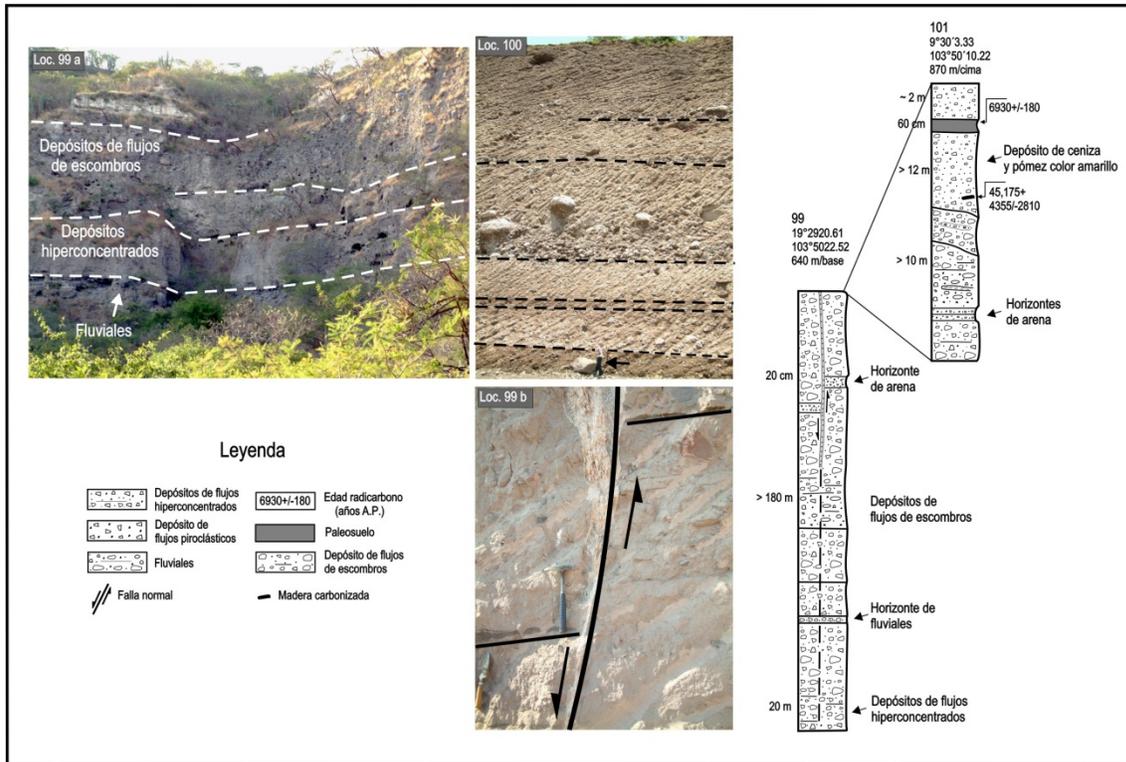


Figura 8. Imágenes de las localidades 99 y 100 que muestran la sobreposición de depósitos distribuidos al SO a 25 km de la fuente. Algunos de estos depósitos se encuentran afectados por fallas normales de dirección N-S, como se observa en la imagen inferior, loc. 99 b. La parte superior de la columna estratigráfica está cubierta por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, con espesores de > 12 m y ~ 2 m y edades de 45,175 + 4355/-2810 años A.P., y < 6,930 ± 180 años A.P.

3.2.2.2 Unidad Depósito de Avalancha Alceseca-Atenquique (AVA-Atnq.), sector SO-SE.

Se trata de pequeños afloramientos de un depósito de avalancha de escombros distribuidos a lo largo del margen sur de la Barranca Alceseca (Fig. 9, locs. 68 y 74) sector SO y Barranca Atenquique sector SE. El depósito de avalancha está formado por clastos de andesita de forma angulosa y subangulosa, de color negro, gris y rojizo, con tamaños que varían de 3 a 40 cm. Los clastos presentan texturas fanerítica y porfirítica, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y posibles piroxenos. Están soportados por una matriz de arena limosa bastante

compacta, que presenta zonas rojizas por alteración hidrotermal. Algunos de los clastos presentan un fracturamiento con estructura de rompecabezas característico en depósitos de avalanchas volcánicas (Fig. 9, loc. 68 a). En esta loc., el depósito de avalancha es sobreyacido por ~60 m de depósitos de flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales, constituidos, por clastos subredondeados de andesita con tamaños que varían de 10 cm a >40 cm, soportados por una matriz muy escasa de arena fina. Los depósitos hiperconcentrados presentan espesores que varían de unos cuantos centímetros a >2 m, formados por arena gruesa y grava de tamaño medio a gruesa, con algunos clastos subredondeados de andesita de ~30 cm a 1 m de diámetro (Fig. 9, loc. 68 b). En la loc. 74a (Fig. 9) el depósito de avalancha forma la base de la columna estratigráfica con un espesor >15 m. Se encuentra en una facies de matriz, de color gris claro, con tonalidades rojizas por alteración hidrotermal. Presenta escasos clastos de andesita de ~40 cm de diámetro que muestran un fracturamiento con estructura de rompecabezas, soportados por una matriz de arena fina muy compacta. En esta misma localidad, el depósito de avalancha subyace a un depósito de ~25 m de flujos de escombros formado por clastos subangulosos y subredondeados de andesita con tamaños de 10 a 30 cm, soportados por una matriz arenosa color amarillo bastante compacta. Finalmente, sobreyace una secuencia de ~20 m de depósitos fluviales e hiperconcentrados. De acuerdo con la distribución y posición estratigráfica que presenta el depósito de avalancha, se considera que esta está asociada con el MN1 (~ 530 – 350 ka). En el sector SE, el depósito de avalancha está representado por escasos y pequeños afloramientos a lo largo de la barranca Atenquique. Está formado por clastos subangulosos a subredondeados de andesita, de color negro, gris y rojizo, con tamaños que varían de 10 a 40 cm, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y posibles piroxenos. Los clastos son soportados por una matriz de arena fina bastante compacta, la cual presenta zonas rojizas por alteración hidrotermal. Algunos de ellos, presentan un fracturamiento de rompecabezas (Fig. 13, loc. 80a)

El depósito de avalancha subyace de forma discordante a una secuencia volcanoclástica formada por depósitos de flujos hiperconcentrados, depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez intercalados y un depósito de lava que fue fechado por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 281 ± 12 ka.

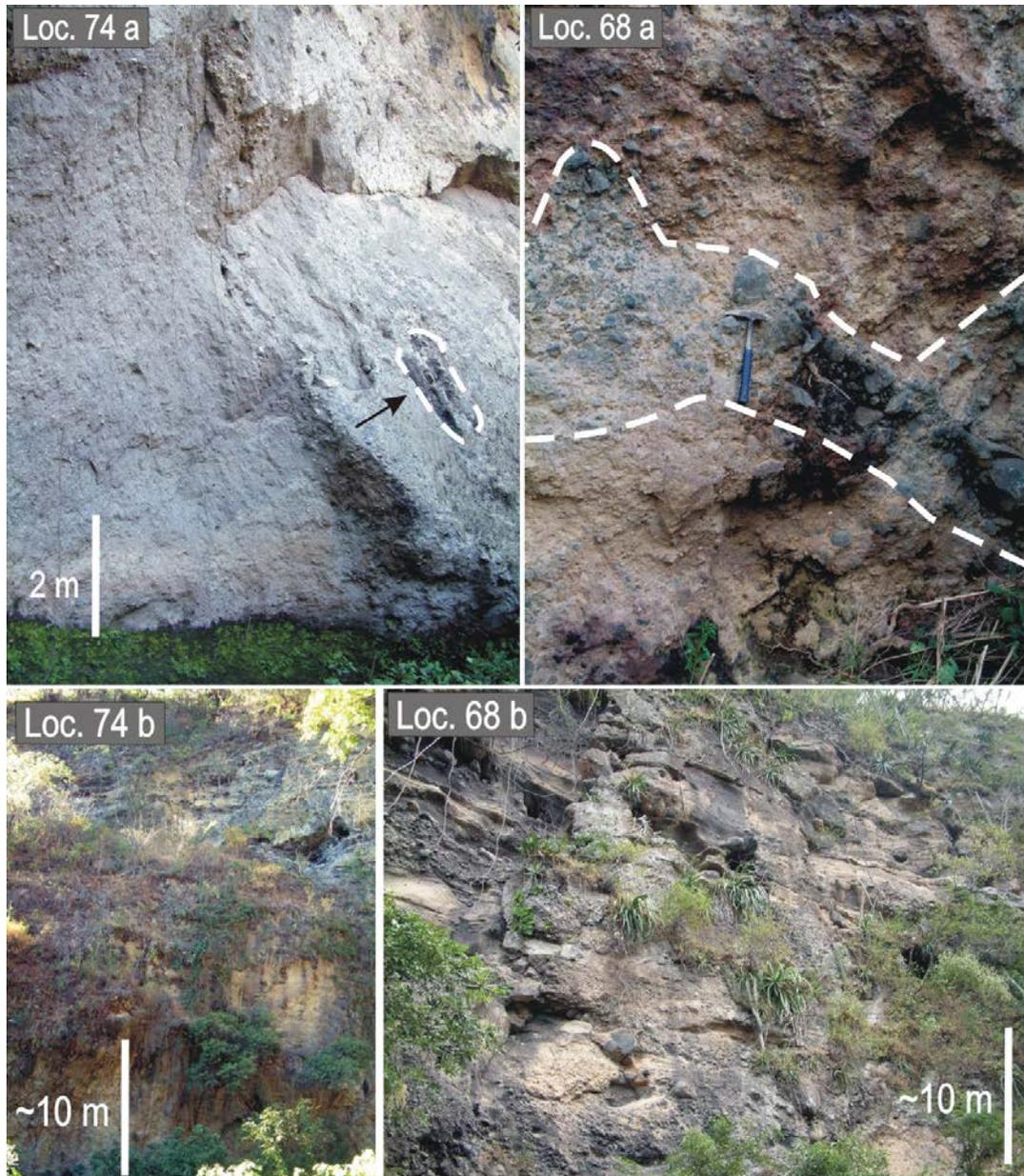


Figura 9. Afloramientos del depósito de avalancha a lo largo del margen sur de la Barranca Alceseca (locs. 74 y 68, figura 6), sector SO. Las imágenes inferiores muestran los depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y depósitos de flujos de escombros que sobreyacen al depósito de avalancha.

3.2.3 Miembro Nevado de Colima 2, MN2 (350 - 280ka)

Se define como MN2 a una secuencia compuesta por cinco unidades distribuidas principalmente al OSO y NNO del Nevado de Colima.

En el sector OSO, los depósitos de esta secuencia se distribuyen hasta el Río Armería a 26 km del Nevado de Colima, definiendo un cuerpo alargado con una superficie de 110 km². El límite norte de este cuerpo, está definido por el valle de la Barranca Alceseca, el cual coincide

con la traza de la Falla Tamazula, en tanto que el límite sur, corresponde con el valle de la Barranca El Huacal (Fig. 5). Se trata de depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, depósitos de caída de pómez y líticos, depósitos de flujos de escombros y flujos de lavas de composición andesítica, todos ellos, generados por diversas erupciones que aún no han sido definidas (Fig. 10, loc. 59). Los depósitos de flujos de ceniza, por lo general son de color amarillo, intercalados entre secuencias de depósitos de flujos hiperconcentrados y flujos de escombros. En la localidad 62 a 20 km de la fuente, sector SO, un depósito de flujo de ceniza color amarillo, presenta espesores de 6 a 8 m (Fig. 10), el cual es cubierto por un depósito de flujo de escombros de gran espesor indeterminado, formado por clastos subredondeados a redondeados de andesita con tamaños que varían de 15 a 40 cm, soportados por una matriz de arena fina bastante compacta. En estos depósitos de flujos de escombros, es común encontrar abundantes moldes de árboles.

En la loc. 75, a ~14 km del Nevado de Colima, sobre el margen norte de la Barranca Alceseca, existe un pequeño afloramiento de un depósito de flujos piroclásticos, formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita de color gris, negro y rojizo. Los clastos presentan una textura porfírica, con abundantes fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos. Su tamaño varía de 3 a 10 cm y son soportados por una matriz de arena limosa color amarillo, poco endurecida (Fig. 11). El depósito presenta también, abundantes fragmentos subredondeados de pómez color gris claro, poco fibrosa de tamaños que varían de 1 a 4 cm, con plagioclasa y hornblenda. El depósito de flujos piroclásticos se encuentra subyaciendo a una secuencia de depósitos volcániclasticos, que a lo largo de los principales barrancos, forman paredes que superan los 200 m de altura (Fig.11, loc. 71).

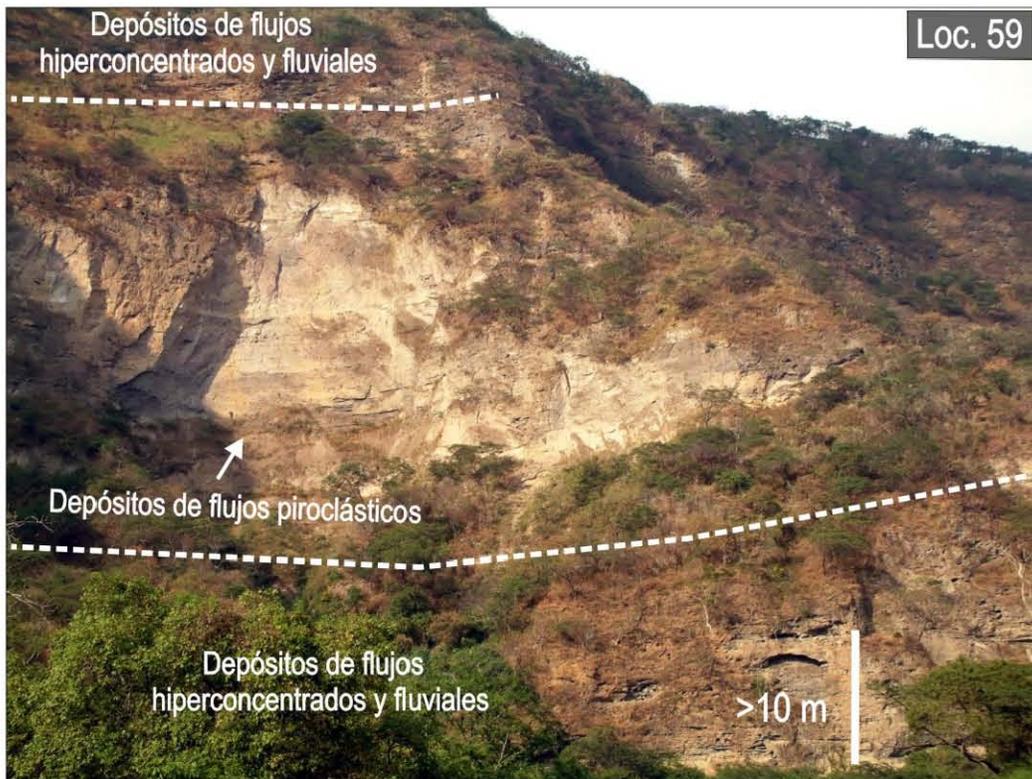


Figura 10. Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, y flujos de escombros intercalados, a 20 km del Nevado de Colima, loc. 59, margen norte de Barranca El Huacal. Toda la secuencia supera los 200 m de espesor. La imagen superior, loc. 62, muestra un depósito amarillo de flujos de ceniza con espesor > 6 m, a 20 km de la fuente, asociado con la MN2. El depósito es subyaciendo en contacto erosivo por un depósito de flujos de escombros. Las líneas punteadas en las imágenes indican el contacto de algunos depósitos.



Figura 11. Loc. 75, depósito de flujos piroclásticos de líticos y pómez sobre el margen norte de la Barranca Alceseca a 14 km de la fuente. Loc. 71, secuencia de flujos de escombros con algunos depósitos de flujos piroclásticos intercalados, sobre el margen norte de la B. El Tosijón, asociados al MN2. Las líneas punteadas en la imagen superior indican el contacto de algunos de los diferentes depósitos.

3.2.3.1 Unidad Lava El Platanillo (300 ± 95 ka)

Se trata de un flujo de lava que a más de 15 km de la fuente, sobre el margen sur de la Barranca Platanillo (loc. 72) tiene un espesor ~35 m. En muestra de mano la roca es de color gris claro, de textura afanítica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda, con un contenido de SiO_2 del 56.4% (andesita basáltica). Una muestra de roca de este flujo de lava fue datada en 300 ± 95 ka (M 31, ver mapa geol. para su ubicación). El flujo de lava sobreyace a secuencias de depósitos de flujos hiperconcentrados y flujos de escombros (loc. 68 b, Fig. 9) y subyace a su vez, a gruesos depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, color amarillo y depósitos de flujos de escombros (loc. 62, Fig. 10). Estos depósitos forman dos pequeños cuerpos alargados hacia el OSO, que aun cuando su distribución es muy restringida, representan los restos de un cráter de colapso de forma irregular abierto hacia el SE, asociado a un segundo edificio del Nevado de Colima, definido como II (Fig. 3). En la figura 12, se presentan las columnas estratigráficas de algunas de las localidades más representativas, en las que se muestra la relación que guardan los principales depósitos volcánicos asociados con el MN2 en el sector SO.

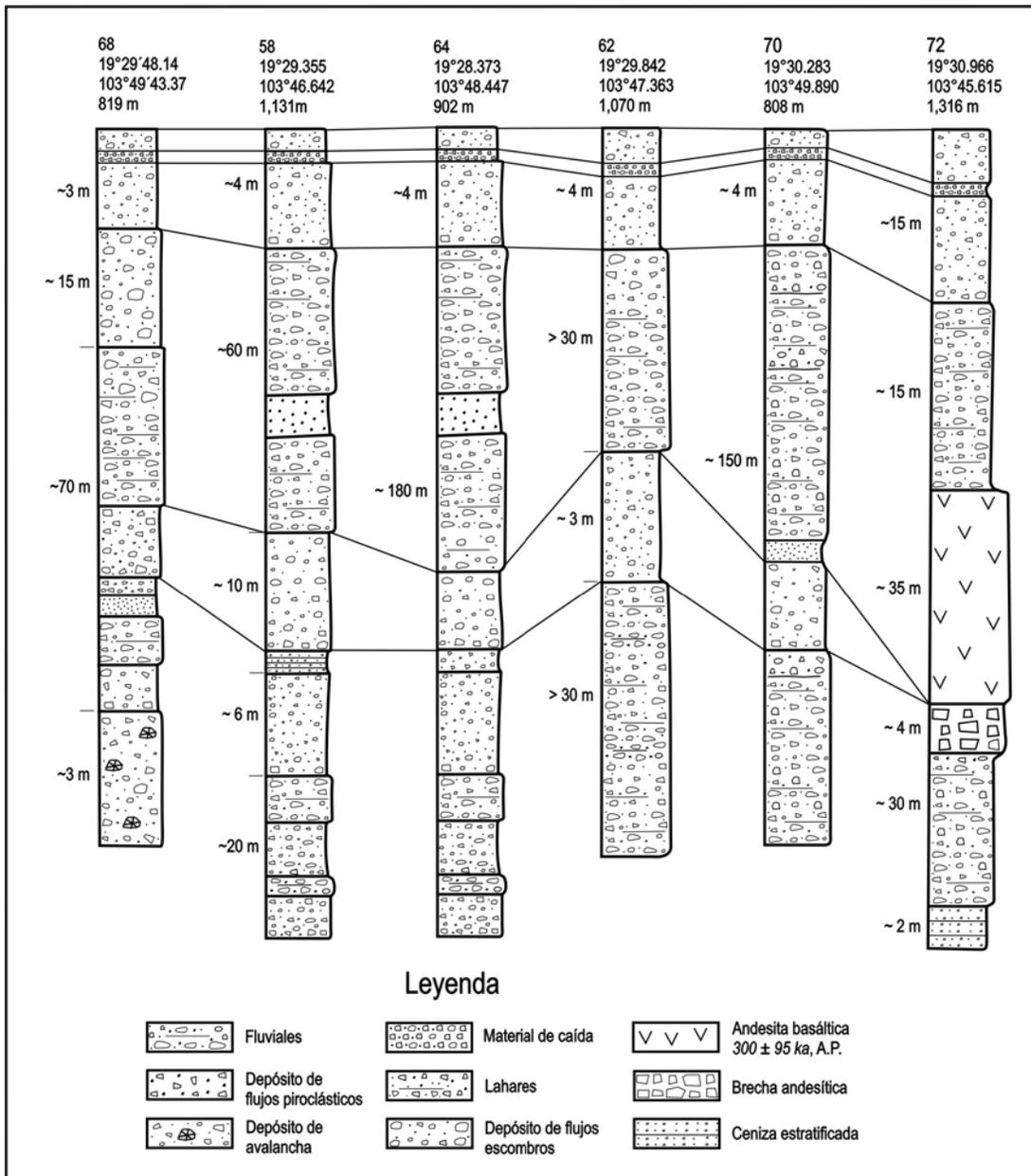


Figura 12. Correlación de secciones estratigráficas más representativas del MN2 en el sector SO del volcán Nevado de Colima. Su ubicación se presenta en la (Fig. 6).

3.2.3.2 Unidad Lava Atenquique (LVA) (281 ± 12 ka).

En el sector SE a ~10 km de la cima del Nevado de Colima (loc. 80 b, Fig. 13), en ambos márgenes de la Barranca de Atenquique, aflora localmente un depósito de ~50 m de espesor de un flujo de lava, definido de manera informal en este trabajo como lava Atenquique (LVA). En muestra de mano, la roca es de color gris, de textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y posible olivino. Ésta roca tiene un contenido de SiO₂ del 53.3% (andesita basáltica,

Tabla 5). Su distribución es muy restringida, sin embargo, debido a su relación estratigráfica y edad, es probable que esté asociada con las primeras etapas de actividad del MN3. El depósito de lava, se encuentra sobreyaciendo de forma discordante a un depósito de flujos piroclásticos de ~8 m de espesor, el cual está formado por clastos angulosos a subredondeados de andesita con tamaños que varían de 10 a 40 cm. Los clastos presentan textura fanerítica y porfirítica con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos. Son soportados por una matriz abundante de arena fina de color gris claro poco compacta. En su parte superior, el depósito de flujos piroclásticos, presenta una franja de ~1.5 m de tonalidad rojiza debido al calentamiento causado por el depósito de lava que le sobreyace. El depósito de flujo piroclástico sobreyace a ~ 5 m de depósitos de flujos hiperconcentrados y fluviales. El depósito de lava, a su vez, subyace a ~20 m de depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza, ceniza y pómez intercalados. En esta loc. 80 b, una muestra del flujo de lava (M1) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 281 ± 12 ka.



Figura 13. A) Afloramiento de avalancha de escombros sobre el lecho de la Barranca Atenquique sobreyacido por un depósito de lava. Las líneas discontinuas limitan bloques de andesita con textura en rompecabezas, en el depósito de avalancha. B) Depósito de flujo de lava andesítica en el margen sur de la B. Atenquique, datada en 281 ± 12 ka con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$.

3.2.3.3 Unidad Domo Los Núñez (DLN) (246 ± 19 ka)

En el flanco N a 6 km da la cima actual del Nevado de Colima, sobre la cota 2900 msnm, aflora un pequeño domo definido como Domo Los Núñez (DLN), constituido por depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y flujos de lava asociados. En muestra de mano la roca de este domo, es de color café claro de textura fanerítica fina, con minerales de plagioclasa, piroxenos y pequeños y escasos cristales de hornblenda. Una muestra de roca (M28, Fig. 5) obtenida de uno de sus flujos de lava, fue datada con el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 246 ± 19 ka (Tabla 3). Una muestra de roca de uno de los flujos de lava del domo tiene una composición dacítica (63.2% en peso de sílice; Tabla 7). Algunos de estos depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, se pueden observar sobre los cortes de la carretera que va de Ciudad Guzmán a Venustiano Carranza. Son depósitos masivos de color gris claro, de ~5 m de espesor, coronados por depósitos de ceniza y pómez color amarillo. En el sector noreste, cerca del poblado Los Mazos, Robin et al. (1987) reportaron depósitos similares de ~10 m de espesor, formados por bloques vesiculados que definen de composición dacítica, ricos en anfíboles y bombas escasas, soportados por una matriz de ceniza.

3.2.3.4 Unidad Depósito de Avalancha El Zapote ($>184 \pm 10$ ka)

En el sector SE a 13 km del Nevado de Colima, a lo largo de los valles de las barrancas El Zapote y Beltrán hasta el Río Tuxpan-Naranjo, se encuentra aflorando un depósito masivo de avalancha de escombros con un espesor ~80 m, definido como depósito de avalancha El Zapote (AVZ) este trabajo. En la zona más cercana a la fuente (loc. 21a, fig.15), a lo largo del margen norte de la barranca El Zapote, el depósito de avalancha subyace a un flujo de lava andesítica SE1, asociado con actividad eruptiva del tercer edificio del Nevado definido como MN3 (Fig. 3). El depósito de avalancha es el mismo depósito reportado por Robin et al. (1987) quienes lo asocian con la última estructura de caldera del Nevado de Colima que definen como C_3 , con su eje de dispersión hacia el NE Según estos autores este evento de colapso lateral tipo Santa Elena habría originado el edificio volcánico Nevado II. Stoopes y Sheridan (1992) estudiaron el mismo depósito de avalancha con más detalle Estos autores determinaron una edad con el método ^{14}C de 18, 500 años para el evento y concluyeron que esta avalancha se había emplazado a lo largo de los valles de los ríos Tuxpan-Naranjo y Salado hasta alcanzar la costa del Océano Pacífico a 120 km de la fuente. Según estos autores, el depósito de avalancha cubre

una superficie de 2 200 km² con un volumen estimado de 22-23 km³. En un nuevo estudio, Capra y Macías (2002) concluyen que la avalancha de escombros solo había viajado 30 km hacia el SE hasta chocar contra la barrera topográfica del Cerro La Carbonera en donde sus depósitos obstruyeron el cauce del Río Taxpan-Naranjo generando un lago temporal que colapsó posteriormente formando un flujo de escombros a lo largo de los valles de los ríos Taxpan-Naranjo y Salado por la removilización secundaria del depósito de avalancha. Debido a que es el mismo depósito de avalancha reportado por los autores arriba mencionados, tiene la misma distribución y longitud a lo largo de los valles de los ríos Tuxpan-Naranjo y Salado, como se puede observar en el modelo digital de elevación del terreno de la figura 14, pero origen diferente. Al sur de Alzada, entre los ríos Salado y Tuxpan-Naranjo, el depósito de avalancha define una superficie casi plana con pequeño montículos con alturas de pocas decenas de metros, de forma alargada algunos de ellos.

Sin embargo, mis evidencias de campo y relaciones estratigráficas, permiten asociar al depósito de avalancha con el remanente de cráter II (Fig. 3, este trabajo) generado por un evento de colapso, del segundo edificio del Nevado de Colima, definido como MN2 (Fig. 5) y no con la última estructura de caldera del Volcán Nevado de Colima, definida como C₃, producto del colapso lateral del Nevado II, reportados por Robin et al. (1987). El área aflorante del depósito de avalancha calculada en este trabajo con las herramientas de Google Earth, es de 600 km² con un volumen de 18 km³, considerando un espesor promedio de 30 m.

En zonas cercanas a la fuente, el depósito de avalancha se presenta en facies mixta, constituido principalmente por clastos angulosos y subangulosos de andesita, con tamaños que varían de 15 cm hasta 1.5 m, soportados por una matriz de arena-arcillosa medianamente compacta, de color gris oscuro con tonalidades rojizas por alteración hidrotermal. El depósito de avalancha, contiene megabloques de andesita con tamaños que varían de 10 a 30 m, totalmente fracturados con estructuras de rompecabezas, (Fig. 15, loc. 21 b y 13). Los bloques y clastos en la avalancha son de color gris claro de textura fanerítica fina con cristales de plagioclasa y piroxeno y ausencia de hornblenda. En su parte media superior el depósito, presenta grandes lentes de material volcanoclástico asimilados y megabloques de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo con espesores > 2 m cerca de la base. En la loc. 81 (Fig. 6), a lo largo de la barranca El Limón, la AVZ subyace a un flujo de lava datado por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 184 ± 10 ka.

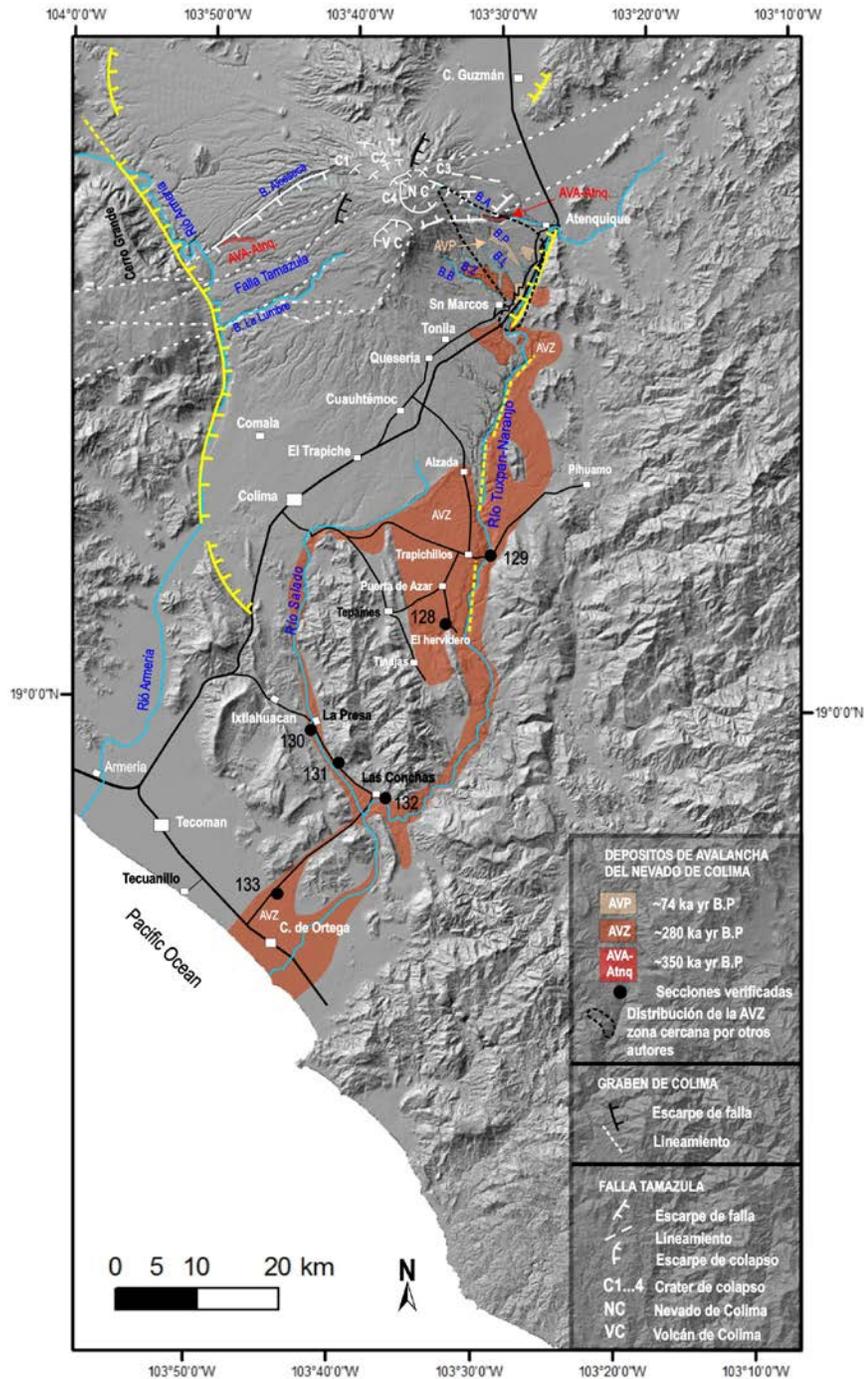


Figura 14. Modelo digital de elevación del terreno de los volcanes de Colima y sus alrededores, en el cual se muestran la distribución de los tres depósitos de avalancha del Volcán Nevado de Colima; Alceseca-Atenquique (AVA-Atnq), El Zapote (AVZ) y Platanar (AVP), reportados en este trabajo. Los puntos negros enumerados corresponden a secciones verificadas en la AVZ en zonas distales que no aparecen en el mapa geológico (Fig.5). La distribución de la AVZ, en la zona cercana a la fuente difiere con la reportada previamente por otros autores. Se muestra también el Graben de Colima N-S y la Falla Tamazula de dirección NE-SO, la cual afecta a los volcanes de Colima y a las calizas del Cerro Grande. Abreviaturas: BB-Barranca Beltrán, BZ-Barranca El Zapote, BL-Barranca El Limón, BP-Barranca Platanar, BA-Barranca Atenquique.

El análisis geoquímico de una roca de este flujo de lava arrojó un contenido de SiO₂ de 57.7 y 6.8 % en peso de Fe₂O₃ (Tabla 7), por lo que cae en el campo de las andesitas basálticas.

En la loc. 20, cruce de la carretera Federal 53 Colima-Guadalajara con la Barranca Beltrán, el depósito de avalancha sobreyace en contacto discordante a meta-andesitas de la Formación Tecalitlán (Terciario inferior) (Fig. 15). En esta misma localidad el AVZ se encuentra subyaciendo en forma discordante a una secuencia de depósitos de flujos hiperconcentrados y sedimentos lacustres.

A lo largo del margen sur de la B. Beltrán, el depósito de AVZ subyace en forma discordante a un depósito masivo de ~60 m de lava y depósitos de flujos piroclásticos amarillos de ceniza y pómez así como depósitos de avalancha asociados con la actividad eruptiva del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima) (Fig. 16, loc.23). Una muestra del flujo de lava fue fechada con el método de ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 44 ± 15 ka (Tabla 3). De igual forma, en el sector SSO, a 10 km de la cima actual del Nevado en el margen norte de la barranca La Lumbre, un depósito masivo de avalancha de ~20 m de espesor, subyace a depósitos masivos de lava del Paleofuego (Fig. 16, loc. 49). Con base en las características litológicas y relación estratigráfica que presenta el depósito de avalancha, se considera que se trata del mismo depósito de avalancha AVZ, asociado con el MN2. En ambas localidades el depósito de avalancha se presenta de forma masiva en facies de matriz, formado por clastos angulosos de andesita con tamaños predominantes que varían de 20 a 70 cm y algunos hasta de 2 m de diámetro, soportados por una matriz abundante de arena limosa color gris claro, con zonas rojizas por alteración hidrotermal. Algunos clastos y bloques de andesita presentan un fracturamiento en forma de rompecabezas.

En puntos más lejanos de la fuente, a lo largo de La B. Beltrán, el depósito de avalancha presenta grandes bloques de flujos hiperconcentrados y sedimentos lacustres asimilados, y zonas internas con características texturales similares a un depósito de flujo de escombros, lo cual sugiere, que durante su emplazamiento la avalancha entró en lagos temporales existentes en donde se depositaron los sedimentos lacustres asimilando parte de ellos.

Al sur del poblado de Alzada, entre el Río Salado y Río Tuxpan-Naranja (Fig.14), el depósito de avalancha presenta una superficie casi plana de poca pendiente, con montículos aislados de forma alargada con pocos metros de altura. Algunos de estos montículos de avalancha, actualmente son explotados como bancos de material de balastro.

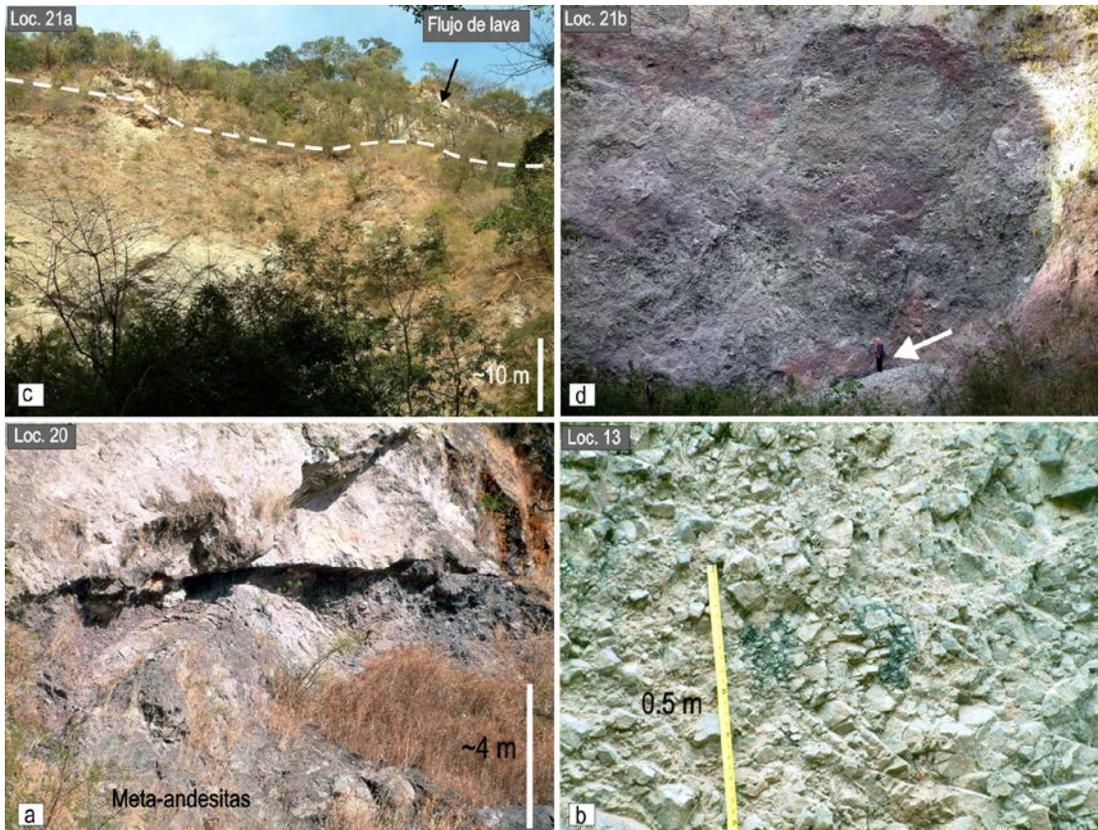


Figura 15. Fotografías del AVZ en diferentes localidades del sector SE del nevado de Colima. En ellas se aprecian las diferentes texturas del depósito. a) Loc. 20, se puede ver como el depósito de avalancha sobryace en forma discordante a meta-andesitas de la Formación Tecalitlán (Terciario inferior), b) loc. 13, bloque de andesita con textura en rompecabezas, c) el depósito de avalancha subyace a un flujo de lava asociado al tercer edificio de del Nevado de Colima, d) detalle de la textura del depósito de avalancha en facies de matriz.

En la localidad 128 (Fig. 14), a 50 km de la fuente a lo largo del corte reciente de la carretera que va del poblado Puerta de Azar al balneario El Hervidero, el depósito de avalancha AVZ se presenta de forma masiva en facies de matriz, de color gris-rosado con un espesor visible >15 m (Fig.17a). Está formado por clastos subangulosos a subredondeados de andesita, de color negro, gris y rojizo, con tamaños que varían de 5 a 40 cm, aunque existen algunos bloques >1.5 m de diámetro inmersos en una matriz de arena fina a gruesa medianamente compacta. Los clastos tienen una textura fanerítica a porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Algunos de ellos presentan una estructura de rompecabezas. El depósito de avalancha, contiene incorporados grandes bloques inclinados de material volcanoclástico, clastos de roca caliza, nódulos rojizos de material arcilloso y fragmentos de arenisca color ocre. Lateralmente el depósito de avalancha presenta cambios en sus características texturales similares a un depósito de flujo de escombros, lo cual, indica que la avalancha durante su

emplazamiento a lo largo del Río Tuxpan-Naranjo, sufrió transformaciones parciales a flujo de escombros.



Figura 16. A) Loc. 23, imagen que muestra al AVZ asociada al segundo edificio del Nevado de Colima (MN2) subyaciendo a un depósito de lava del Paleofuego, a lo largo del margen sur de la Barranca Beltrán, sector SSE. B) Loc. 49, en el sector SSO, margen norte de la barranca La Lumbre, el AVZ asociada al MN2, también subyace a un depósito de lava del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima).

Aproximadamente 300 m delante de este punto, se encuentra el balneario El Hervidero (Fig. 14), en donde se puede observar al depósito de avalancha formando una terraza con paredes casi verticales y alturas de ~ 120 m (Fig. 17 b). El depósito se presenta de forma masiva con algunos bloques de material fluvial asimilados y abundantes huecos o madrigueras de animales en su matriz. En la loc. 129 (Fig. 14) sobre el margen sur del Río Tuxpan-Naranjo, el depósito de avalancha presenta espesores que superan los 170 m, de acuerdo a la carta topográfica de (INEGI, E13b45, 1:50,000), (Fig. 17 c). Como ya ha sido mencionado por autores previos y este trabajo, la avalancha de escombros viajó a lo largo del valle del Río Salado, en donde su depósito se encuentra en forma de terrazas aisladas de diferentes dimensiones. Por ejemplo, en la comunidad de La Presa, a 65 km de la fuente, loc. 130 (Fig. 14) el depósito se presenta de forma masiva en facies de matriz, con un espesor de ~ 10 m, formado por clastos subangulosos de andesitas con tamaños que varían de 10 a 30 cm, soportados por una matriz

abundante de arena limosa, color gris claro con tonalidades rojizas por alteración hidrotermal (Fig. 17 d). El depósito de avalancha presenta escasos clastos de caliza y rocas intrusivas incorporados por el flujo durante su emplazamiento.

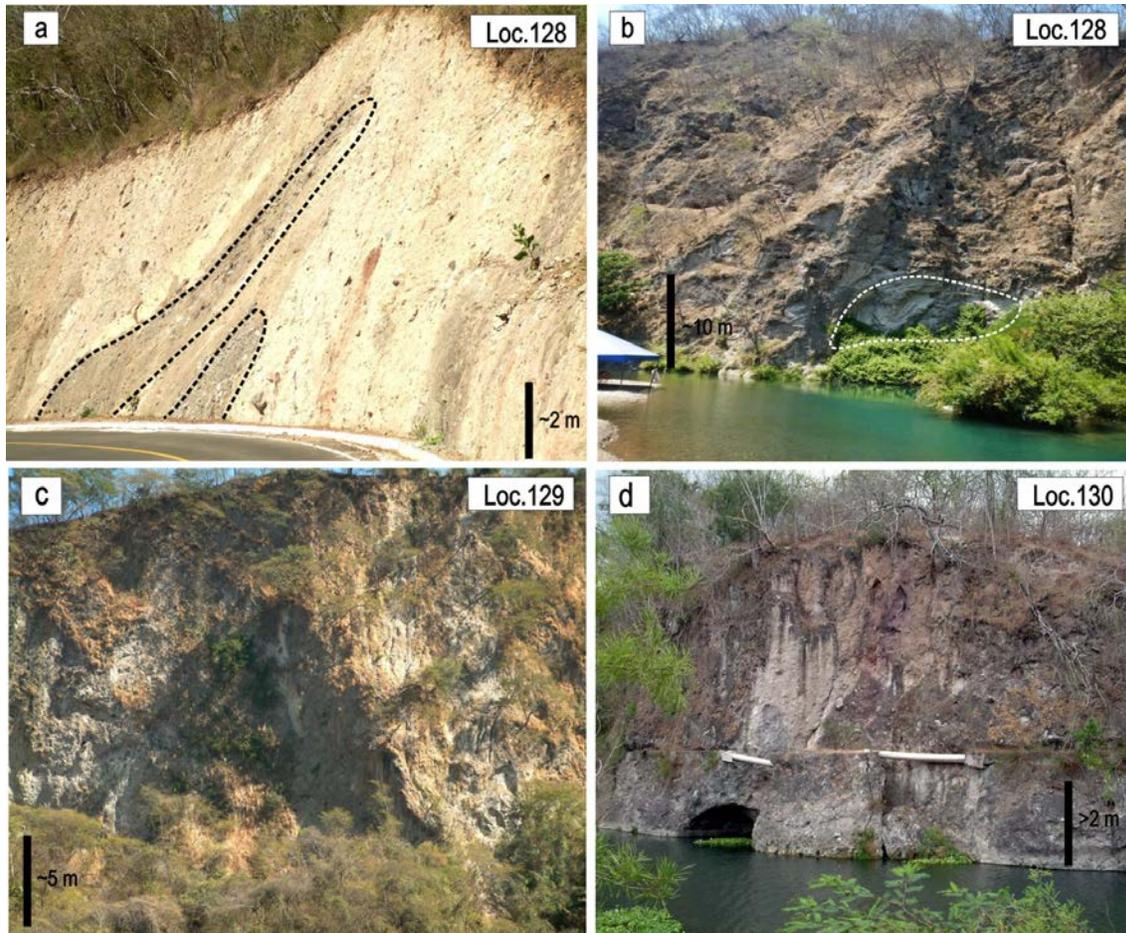


Figura 17. a) Corte reciente de la carretera que va del poblado Puerta de Azar al balneario el Hervidero, donde aparece el depósito AVZ a 50 km de la fuente. Las líneas punteadas delimitan lentes de depósitos volcánico-clásticos asimilados por la avalancha durante su emplazamiento. b) Terraza formada por el depósito de avalancha con un espesor de ~ 120 m (lugar conocido como El Hervidero, 300 m adelante del punto anterior). c) Vista del depósito AVZ sobre el margen este del Río Tuxpan-Naranjo, a 45 km de la fuente. d) Terraza formada por el depósito de avalancha sobre el margen este del Río Salado (comunidad La Presa) a 65 km de la fuente. El depósito en su parte media superior presenta zonas de tonalidades rojizas características de los depósitos de avalanchas volcánicas.

En la loc.131 (Fig. 14) a 70 km de la fuente, el depósito de avalancha es de forma masiva en facies de matriz, con un espesor > 80 m. El depósito está formado en su mayoría por clastos subangulosos y subredondeados de andesita con tamaños que varían de 15 a 50 cm y hasta de 1.5 m, soportados por una matriz abundante de arena limosa de color gris rosáceo poco endurecida (Fig. 18 a). Algunos de los clastos de andesita presentan una estructura en rompecabezas. El depósito de avalancha contiene también, escasos bloques de roca de diferente litología como caliza entre otras, en los que se han encontrado fósiles de gasterópodos.



Figura 18. a) Depósito de avalancha sobre el margen este del Río Salado, a 70 km de la fuente, con un espesor > 80 m. Presenta una matriz arenosa abundante de color gris rosáceo, con huecos o madrigueras de animales. Contiene bloques de roca caliza asimilados, algunos con fósiles de gasterópodos. b) Depósito de avalancha en corte de carretera en el poblado de Las Conchas, sobre el margen oeste del Río Naranjo, a 75 km de la fuente. c) Detalle de la matriz del depósito de avalancha con clastos de andesita con textura de rompecabezas. D) Vista panorámica del valle cerca de Cerro de Ortega, en donde se aprecia en el fondo una morfología de montículos del depósito de avalancha (flechas) a 85 km de la fuente.

En el poblado de Las Conchas (loc. 132, Fig. 18) y sus alrededores a unos 75 km de la fuente, el depósito de avalancha define una serie de lomas alargadas con alturas mayores a los 100 m. Sus características texturales internas y litológicas (Fig. 18b-c) son similares a las descritas en la loc. 131 (Fig.18a). En el valle cercano a Cerro de Ortega (~110 km de la fuente) el depósito de avalancha está representado por una serie de montículos (hummocks) con alturas >20 m (Fig. 18 c). Stoopes (1991) reporta su existencia a sólo 3 km de costa hasta 120 km de la fuente.

3.2.4. Miembro Nevado de Colima 3, MN3 (280 – 74 ka)

Se define como MN3 a una secuencia constituida por nueve unidades lito-estratigráficas distribuidas al NNO y SE del volcán. Las unidades del sector SE, se representan en el mapa geológico de la (Fig. 5) como (SE1, SE2, SE3a y SE3b) que a continuación se describen.

3.2.4.1 Unidad Lava El Limón (184 ± 10 ka)

En el sector SE a 17 km de la cima actual del Nevado de Colima, a lo largo de la barranca El Limón, aflora un depósito masivo de un flujo de lava (SE1), que por su distribución y posición estratigráfica se considera (este trabajo) que está asociado con la actividad eruptiva de un tercer edificio del Nevado de Colima, definido como MN3. La lava, cubre una superficie aproximada de 11 km², y considerando un espesor promedio de 20 m se obtiene un volumen aproximado de ~0.22 km³. En muestra de mano la roca es de color gris claro de textura fanerítica de grano fino compacta, con plagioclasa y piroxeno. El depósito de lava sobreyace en forma discordante al AVZ, y a su vez, éste es sobreyacido por ~2 m de depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo. Una muestra de roca de este flujo de lava (loc. 81, fig. 6) fue datada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 184 ± 10 ka. Una muestra de roca de este flujo de lava, dan un contenido de SiO₂ de 57.7% en peso (Tabla 7), por lo que cae en el campo de las andesitas basálticas.

3.2.4.2. Unidad Lava La Cascada (106 ± 12 ka)

Este flujo de lava se encuentra en el flanco SE a 6 km de la cima actual del Nevado, loc. 115 (Fig. 6), a lo largo del camino al Playón. Es de forma masiva con un espesor ~ de 15 m. En muestra de mano la roca es de color gris, la cual altera a color ocre. Presenta una textura fanerítica de grano grueso, con plagioclasas, hornblenda y posibles piroxenos. Una muestra de roca de esta lava tiene una composición andesítica (59.4 % de peso de sílice, Tabla 7) y fue datada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 106 ± 12 ka. El área y volumen del depósito de lava, no fue posible determinar, debido a que, éste se encuentra cubierto por depósitos más recientes de flujos piroclásticos no diferenciados y por una densa vegetación.

3.2.4.3. Unidad Lava El Albergue (106 ± 8 ka)

En el flanco NNE, sobre el límite norte del penúltimo cráter del Nevado, definido como III (Fig. 3), aflora un depósito de un flujo de lava con un espesor ~20 m (N1, Fig. 5). La roca en

muestra de mano es de color gris claro, de textura fanerítica de grano fino compacta, con cristales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda; aunque no se realizaron análisis geoquímicos de esta lava, se clasificó como una andesita. La distribución areal y volumen del flujo de lava, no fue posible determinar, debido a que se encuentra cubierto por gruesos depósitos de flujos piroclásticos y de caída no diferenciados de edad más reciente. En la loc. 89 (Fig. 6), una muestra de roca de este depósito de lava fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 106 ± 8 ka. Como se puede ver, esta lava tiene una edad similar a la Lava La Cascada distribuida en el sector SE, loc. 115 (Fig. 6), por lo que se puede considerar que, aun cuando ambos depósitos de lava se encuentran distribuidos en flancos opuestos, fueron generados durante el mismo evento eruptivo del tercer edificio del Nevado definido como MN3. Sin embargo, debido a su distribución se reportan como unidades diferentes.

3.2.4.4. Unidad Lava La Tabaquera (SE2) (99 ± 7 ka)

En el sector SE a ~8 km de la cima actual del Nevado de Colima, sobre el camino al playón, loc. 82 (Fig. 6), aflora un depósito de un flujo de lava de ~20 m de espesor y distribución limitada. En muestra de mano la roca es de color gris claro compacta de textura fanerítica fina con cristales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda. En esta, una muestra de lava fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 99 ± 7 ka. Químicamente esta roca (SiO_2 60.92 % en peso Tabla 7) fue clasificada como andesita. La lava sobreyace de forma discordante a gruesas secuencias de depósitos de flujos piroclásticos y epiclásticos. La lava a su vez, está sobreyacida por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, color amarillo y depósitos de caída, los cuales, de acuerdo con Luhr and Carmichael (1982), están asociados con la actividad eruptiva del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima).

3.2.4.5. Unidad Lava A. Seco (93 ± 6 ka)

En el sector NE, a ~8 km del Nevado de Colima, (Fig. 6, loc. 38) aflora un depósito de lavas (LvNE), de ~10 m de espesor (Fig. 19), con una longitud de ~3 km, a partir del límite norte del cráter de colapso III. En muestra de mano la roca es de color gris oscuro, de textura fanerítica con plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda. La muestra M8 de este flujo de lava tiene una composición andesítica (SiO_2 60.9 % en peso; Tabla 7). La lava sobreyace discordantemente a un depósito de flujo piroclástico > 5 m de espesor, formado por abundantes

clastos subangulosos y subredondeados de andesita, con tamaños que varían de 10 a 70 cm, de color gris y negro, soportados por una matriz de ceniza gruesa, color gris bastante deleznable. Los clastos de color gris, presentan una textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y hornblenda, en tanto, los clastos de color negro, presentan una textura afanítica. El depósito de flujo piroclástico presenta abundantes fragmentos subredondeados de pómez, color gris claro, poco vesiculada, con tamaños que varían de 4 a 6 cm. En su parte media superior, este depósito presenta un horizonte de ~1 m de tonalidad rojiza (Fig. 19). En esta loc. 38, el depósito de lava fue fechado por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 93 ± 6 Ka.

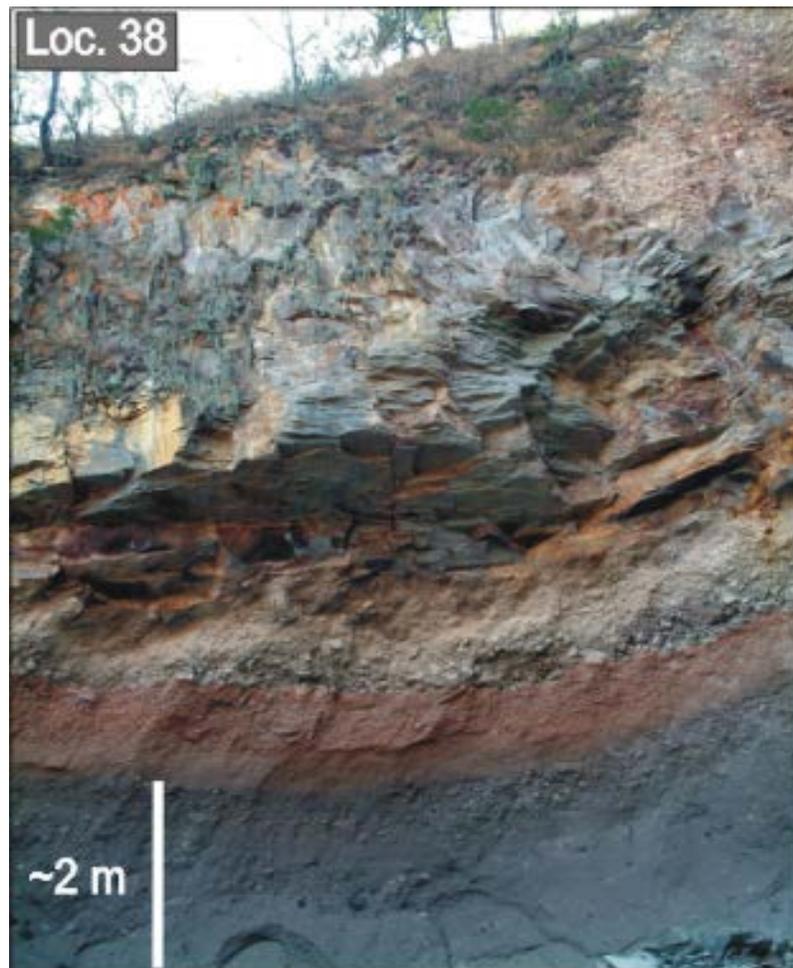


Figura 19. Lava datada en 93 ± 6 Ka, loc. 38 (Fig. 6) que sobreyace a un depósito de flujo piroclástico que presenta en su límite superior una franja rojiza posiblemente debido a calentamiento por el contacto con el flujo de lava.

3.2.4.6. Unidad Lava La Calle (83 ± 6 ka)

Se trata de un flujo de lava que aflora parcialmente en la parte superior del límite NO del remanente de cráter de colapso III (Fig. 3) del Nevado de Colima (Fig. 6, loc. 94). La roca en

muestra de mano es de color gris oscuro, con una textura fanerítica fina, con minerales de plagioclasa y piroxenos. Se trata de una andesita con un contenido de SiO₂ de 60 % en peso (Tabla 7). Una muestra de roca de esta lava (M14) fue fechada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 83 ± 6 ka.

En el sector SE, loc. 27 (Fig. 6) un segundo flujo de lava aflora a ~1 km al NE de Juan Barragán, Jalisco, sobre el margen norte de la Barranca Los Plátanos (SE3a), la cual en muestra de mano, presenta características de textura y mineralogía similares a la lava anterior. Una muestra de esta lava (M7) fue fechada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar dando prácticamente la misma edad, que es de 83 ± 5 ka (Tabla 3). El análisis químico de este flujo de lava (M7) permitió clasificarla como una andesita (60.9 % en peso de sílice) (Tabla 7). En esta localidad el flujo de lava sobreyace a gruesos depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, y secuencias volcanoclásticas formadas por depósitos hiperconcentrados y de escombros, la cual a su vez, subyace a depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y depósitos de caída no diferenciados. Con base en la morfología del depósito de lava y utilizando las herramientas de Google Earth, se determinó una superficie de ~24 km² cubierta por el flujo de lava.

3.2.4.7. Unidad Lava El Salto (SE3b) (81 ± 8 ka)

En este mismo sector SE, a ~15 km de la cima actual del Nevado de Colima, barranca El Limón, aflora un flujo de lava de forma masiva (SE3b), con un espesor ~20 m (Fig. 20, loc. 31), el cual, cubre una superficie aproximada de 9 km² con un volumen de ~0.18 km³. En muestra de mano, la roca tiene una textura fanerítica con minerales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda. La muestra M4 es un andesita (60.2 % en peso de sílice, Tabla 7). La lava sobreyace discordantemente a ~10 m de depósitos de flujo piroclástico de bloques y ceniza y depósitos volcanoclásticos. A su vez, esta es sobreyacida por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo (~2 m de espesor). Una muestra de esta lava (loc. 31) fue datada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 81 ± 8 ka.



Figura 20. Lava datada en 87 ± 8 ka, loc. 31, barranca El Limón. Se puede observar como la lava sobreyace a una secuencia volcanoclástica y flujos piroclásticos intercalados.

3.2.4.8. Unidad Domo Los Mazos (74 ± 6 ka)

En el sector NE a 6 km de la cima actual del Nevado de Colima, sobre el margen norte de la Barranca Atenquique, se encuentran los restos de un domo definido en este trabajo como Domo Los Mazos (DLM), el cual cubre una superficie de ~ 13 km². En muestra de mano la roca de uno de sus flujos, es de color gris claro, de textura fanerítica fina poco densa, compuesta por plagioclasa y posibles piroxenos. . La roca de uno de los flujos de lava (loc. 87, Fig.6) tiene un contenido de SiO₂ de 62.5 % en peso (Tabla 7), por lo que se clasificó como una andesita ácida. La misma muestra (M16) fue datada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 74 ± 6 ka. En el sector SE a 4.5 km de la cima del domo, afloran gruesos depósitos de flujos de ceniza color amarillo, con horizontes de 10 a 20 cm de líticos de caída intercalados (Fig. 21 b, loc. 121), que por su distribución y relación estratigráfica, podrían estar asociados al emplazamiento del domo. Sin embargo, se está

consciente, que hace falta más trabajo de campo y edades de C^{14} , para soportar o desechar esta suposición.

El domo fue afectado por el límite norte de La Falla Tamazula, la cual provocó el colapso de su flanco sur (Fig. 21 a).

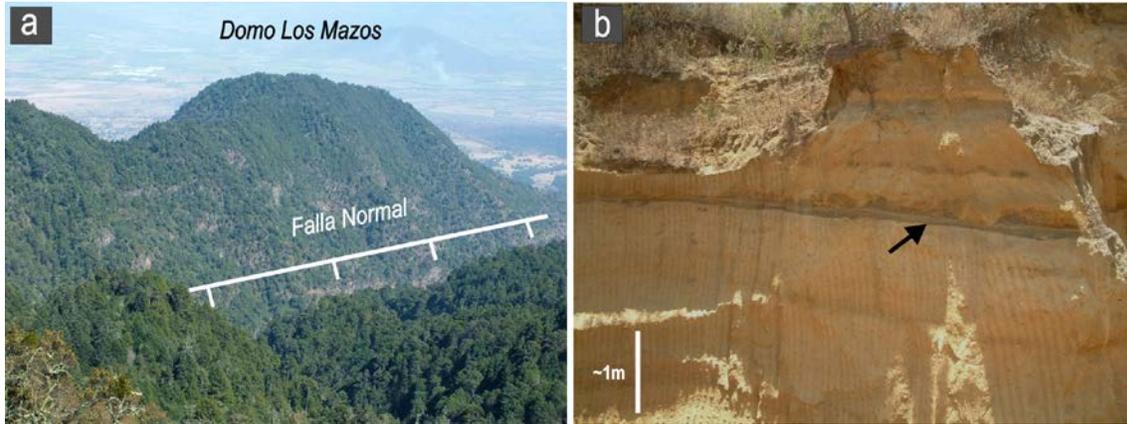


Figura 21. A) Imagen que muestra el Domo Los Mazos visto desde el OSO, afectado por una Falla Normal con dirección NO-SE, (foto de Carlos Navarro). B) Depósitos de ceniza y pómez de color ocre, con delgados horizontes de material de caída intercalados (flecha negra), asociados posiblemente con el emplazamiento del domo.

3.2.4.9. Unidad Depósito de Avalancha El Platanar ($<83 \pm 5$ ka)

En el sector SE a 11 km de la cima del Nevado de Colima, a lo largo de la barranca El Platanar, aflora un depósito de avalancha de escombros, en un área bastante restringida, que fue definido en el presente trabajo como avalancha de escombros El Platanar (AVP). En la loc. 8, el depósito de la AVP ocurre de forma masiva en facies de matriz con un espesor de ~50 m. Está formado por pequeños clastos de andesita con tamaños que varían de 10 a 20 cm, de forma angulosa y subangulosa, de color gris, negro y rojizo. Los clastos presentan una textura fanerítica con cristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Algunos de los clastos, presentan un fracturamiento con estructura de rompecabezas; todos ellos soportados por una matriz de arena fina a gruesa bastante deleznable, de color gris rosáceo con abundantes zonas de color rojizo por alteración hidrotermal (Fig. 22, loc. 8 y 9). En esta localidad, el AVP está cubierto discordantemente por una secuencia volcanoclástica de ~1.5 m, formada por clastos subangulosos de andesita, con tamaños que varían de unos cuantos centímetros hasta 1 m. Sobreyaciendo a esta secuencia, se encuentra un depósito masivo de ~10 m de espesor y color rosáceo (posiblemente de depósitos de flujos de escombros), formado por clastos subangulosos de andesita con tamaños que varían de 10 a 80 cm. Algunos de ellos, presentan una discreta imbricación en la dirección del flujo. Cabe mencionar que debido a lo inaccesible en que se

encuentra el depósito superior, no fue posible hacer una descripción más detallada del mismo, sin embargo, se pudo observar que el contacto entre ellos, en algunos puntos es bastante erosivo, ya que la secuencia volcanoclástica fue totalmente erosionada por el depósito superior. En puntos más lejanos, el depósito de avalancha sobreyace a depósitos volcanoclásticos y flujos piroclásticos intercalados, el cual a su vez, es subyacido por secuencias volcanoclásticas.

En la loc. 13 (Fig. 22), en la intersección de la Barranca El Limón con la Barranca Beltrán, a 20 km de la cima del Nevado, el AVP aparece de forma masiva, con un espesor ~25 m, formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita, en su mayoría con tamaños que varían de 10 a 20 cm, soportados por una matriz de arena fina a gruesa de color gris rosáceo poco endurecida. En esta localidad, el depósito de avalancha también se encuentra sobreyacido por una secuencia volcanoclástica con un espesor ~4 m, y por un depósito masivo de flujos de escombros (Fig. 22, loc 13).



Figura 22. Loc. 8, depósito inferior de AVP a lo largo de la barranca El Platanar, sobreyacido por un depósito de flujos de escombros separados por una secuencia de material fluvial, líneas punteadas. Loc. 9, detalle de la textura interna del depósito de avalancha. Loc. 13, depósito de avalancha de escombros sobre el margen norte de B. Beltrán e intersección de la B. El Limón. En esta localidad el depósito de avalancha se encuentra sobreyacido por una secuencia de material fluvial de ~4m de espesor, líneas punteadas y el depósito superior de flujos de escombros.

En la loc. 34, a 20 km de la cima del volcán, sobre el margen oeste del Río Tuxpan-Naranjo, el depósito de avalancha se presenta de forma masiva en facies de matriz, con un espesor de >50 m, subyaciendo a una secuencia volcanoclástica de ~35 m (Fig. 23, loc 34). En la parte media del depósito se puede apreciar un número considerable de huecos que podrían corresponder a moldes de troncos de árboles o a madrigueras de animales de uña. En esta misma localidad, aproximadamente 150 m aguas abajo sobre el margen O del Río Tuxpan-Naranjo, el depósito de avalancha subyace a una secuencia de ~20 m de depósitos fluvio-lacustres.



Figura 23. Loc. 34 Imagen que muestra al depósito de avalancha AVP sobre el margen oeste del Río Tuxpan-Naranjo, sobreyaciendo y subyaciendo a secuencias epiclásticas.

3.2.5. Miembro Nevado de Colima 4, MN4 (74 - 29 ka)

Se define como MN4 a una secuencia compuesta por nueve unidades volcánicas y volcanoclásticas con una distribución un poco restringida de apenas ~42 km². En el sector SSE, los depósitos asociados a MN4 fueron controlados por la traza de la Falla Tamazula en su límite S, la cual presenta una dirección NE. Estos depósitos conforman el IV remanente de cráter del Nevado de Colima (Fig. 3).

3.2.5.1. Unidad Lava Alpizahue (73 ± 16 ka)

Esta lava se localiza sobre el flanco SE del Nevado de Colima, a 4 km de su cima actual. Se trata de una lava masiva con un espesor aflorante de ~ 4 m, definida de manera informal en el presente trabajo como Lava Alpizahue. En muestra de mano la roca es de color gris claro, de textura fanerítica con minerales de plagioclasas, piroxenos y escasos y pequeños minerales de hornblenda. Una muestra de este depósito (M24, loc. 118, ver figs. 5 y 6 para su ubicación) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 73 ± 16 ka. Esta roca es una andesita con un contenido de SiO_2 de 59.08 % en peso (Tabla 7).

3.2.5.2. Unidad Lava La Difunta (61 ± 8 ka)

Se trata de una colada de lava que aflora en el límite N del cráter de colapso III (Fig. 3), con un espesor de ~15 m y una distribución limitada hacia el sector NE del volcán. En el mapa geológico (Fig. 5) aparece con la nomenclatura (LvNE). En muestra de mano la roca presenta una textura porfírica con fenocristales de plagioclasa y piroxeno, con tonalidades color ocre por alteración. El depósito de lava sobreyace a depósitos de flujos piroclásticos de bloques y ceniza y depósitos volcanoclásticos intercalados. A su vez, subyace a depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez y depósitos de pómez de caída. Esta roca es una andesita (60.04 % en peso de sílice, Tabla 7). Una muestra de roca de este depósito de lava (M15, loc. 95 ver figs. 5 y 6 para su ubicación) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 61 ± 8 ka.

3.2.5.3. Unidad Domo Alto (49 ± 22 ka)

En el sector SE a 9 km de la cima actual del Nevado de Colima, sobre el margen sur de la Barranca Atenquique, se encuentra los restos de un domo definido en este trabajo como Domo Alto (DA), el cual fue afectado por el límite sur de La Falla Tamazula, de dirección NE. (Fig. 24). En la loc. 37 (Fig. 6), a lo largo del camino que va de Atenquique a las antenas de Microondas, aflora un depósito masivo de lava asociado a este domo, con un espesor de ~20 m, y una distribución restringida. El depósito de lava sobreyace discordantemente a depósitos amarillos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y depósitos volcanoclásticos, el cual a su vez, es cubierto por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo. En muestra de mano la roca es de color gris claro, con una textura fanerítica gruesa, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Una muestra de roca de este flujo de lava

(M2, ver fig. 6 para su ubicación) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 49 ± 22 ka (Tabla 3). Esta lava es una andesita con un contenido de sílice de 60.15 % en peso (Tabla 7).



Figura 24. Domo Alto (estación de Microondas), visto desde el margen norte de la barranca Atenquique. El depósito de lava sobreyace a secuencias de depósitos de flujos piroclásticos y epiclásticos.

3.2.5.4. Unidad Lava Bajada Nueva (46 ± 4 ka)

En la loc. 4 (Fig. 6) a 9.5 km del Nevado de Colima, sobre el margen norte de la barranca Atenquique, aflora un flujo de lava con un espesor ~ 60 m y una longitud aproximada de 4.5 km hacia al NE, denominada en este trabajo como Lava Bajada Nueva (LBN). En muestra de mano la roca es de color gris claro, de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Esa roca es una andesita (60.9 % en peso de sílice, Tabla 7). Una muestra de roca de esta lava (loc. 4, M17, ver fig. 6 para su ubicación) fue fechada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 46 ± 4 ka. El flujo de lava sobreyace a depósitos volcánoclasticos intercalados con depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y depósitos de flujos de ceniza de color amarillo intercalados (Fig. 25). En esta localidad 4, la colada de lava también fue cortada por el límite norte de la Falla Tamazula.

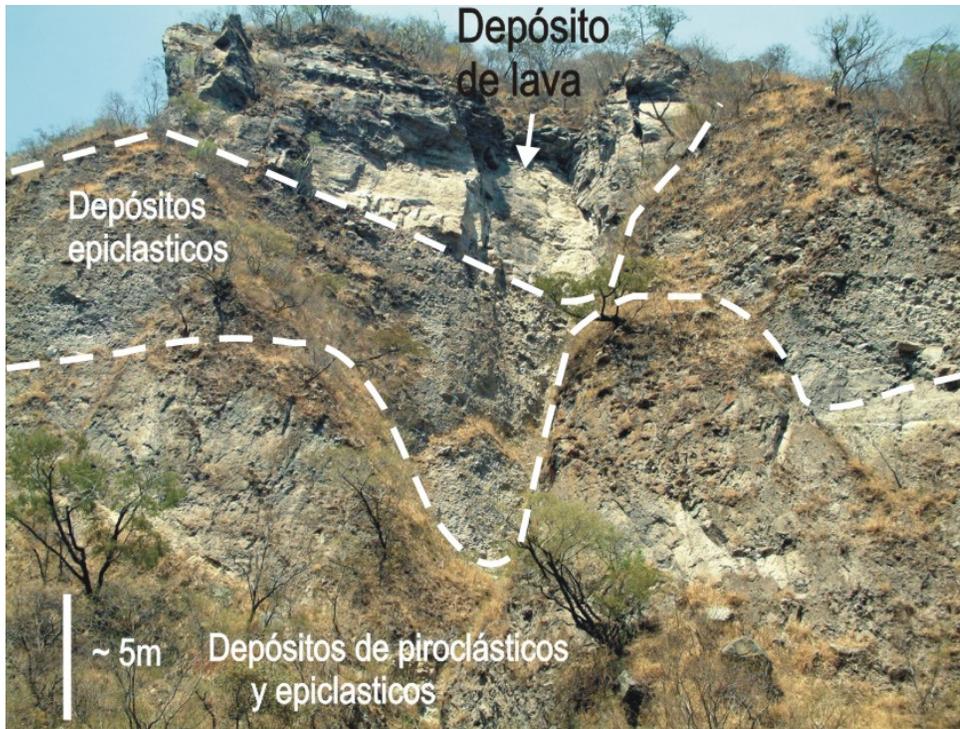


Figura 25, loc. 4. Imagen que muestra al depósito de lava Bajada Nueva fechado por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 61 ± 21 ka que sobreyace a depósitos de flujos de escombros, depósitos de flujos piroclásticos y depósitos volcanoclásticos, a lo largo del margen norte de la Barranca Antequique.

3.2.5.5. Unidad Depósitos de flujos piroclásticos y flujos de escombros, barranca Los Otates

En el sector ESE a 18 km de la cima del Nevado, sobre el margen oeste de la B. Los Otates (loc. 46, Fig. 6), la columna estratigráfica está formada por una secuencia de depósitos de flujos piroclásticos, depósitos de flujos de escombros, depósitos de flujos hiperconcentrados y horizontes de paleosuelos intercalados, que a continuación se describen de la base a la cima. En la base de la columna se encuentra un depósito de ~ 8 m de espesor de material volcanoclástico constituido por clastos subangulos y subredondeados de andesita con tamaños que varían de 20 a 40 cm, soportados por una matriz de arena fina a gruesa bastante compacta. Sobreyaciendo de forma discordante a este depósito, existe un depósito de flujos piroclásticos de ceniza y bloques de ~ 5 m de espesor. Está formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita de 5 a 15 cm inmersos en una matriz de ceniza fina a gruesa poco compacta, color rosáceo. Los clastos de andesita son de color negro, gris y algunos rojizos por alteración hidrotermal, de textura fanerítica y porfírica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Le sobreyacen depósitos delgados de flujos hiperconcentrados, compuestos por arena gruesa y

pequeños clastos de andesita (Fig. 26), los cuales son sobreyacidos en contacto horizontal por un depósito masivo de flujos de escombros de ~5 m, color rosáceo, formado por clastos pequeños de andesita de forma subangulosa y subredondeada. La cima del depósito, es definida por un delgado horizonte de material arcilloso color ocre, con pequeños clastos subredondeados de andesita bastante intemperizados, que lo separa de un segundo depósito de flujos de escombros de menor espesor ~ 1.5 m. El depósito es cubierto por otro depósito de 0.5 a 2 m de espesor, de flujos piroclásticos de ceniza y pómez de color ocre, con cierto grado de desarrollo a un paleosuelo. En este punto el paleosuelo se encuentra cubierto por la vegetación existente, no así, a unas cuantas centenas de metros aguas arriba en donde es muy evidente, con su límite superior muy irregular con pequeños paleocanales por procesos erosivos, e incluso en algunos lugares fue totalmente erosionado, presentándose de forma acuñada, como se muestra en la parte superior izquierda de la imagen. Finalmente, el paleosuelo es sobreyacido por depósitos volcaniclásticos de ~ 4 m de espesor, formados por clastos subangulos a subredondeados de andesita con tamaños que varían de 10 a 30 cm, soportados por una matriz abundante de arena de granos media a grueso poco compacta (Fig 26, loc. 46).

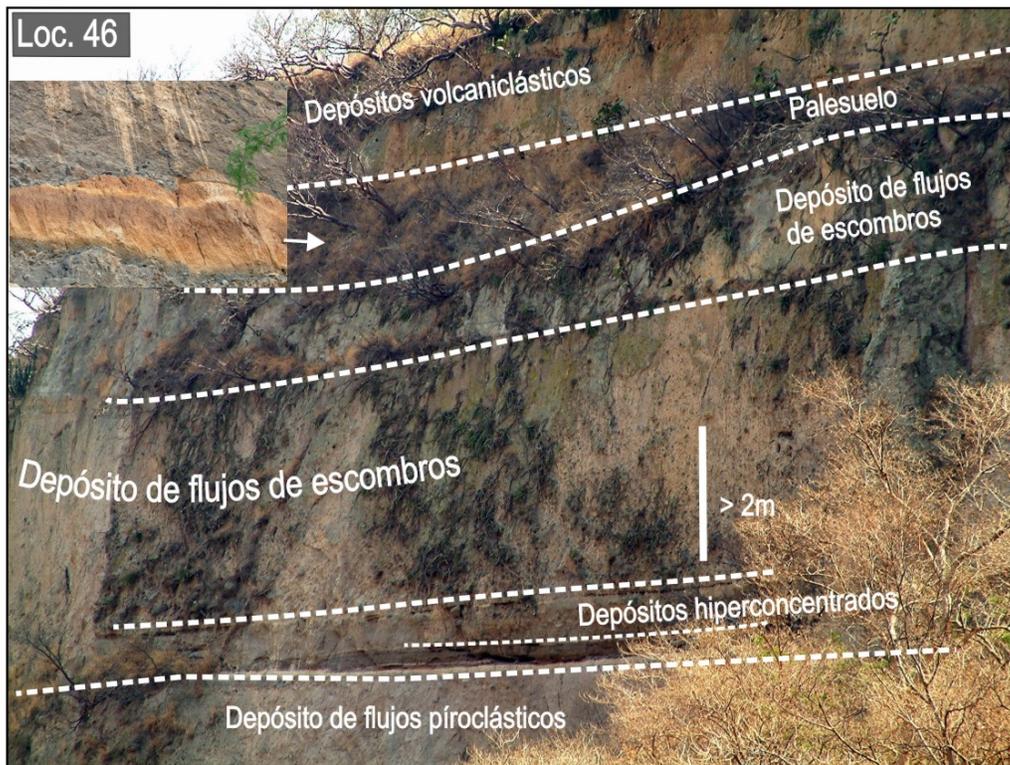


Figura 26. Loc. 46, imagen que muestra a un depósito de flujos piroclásticos de ceniza y líticos (base) y depósitos de flujos de escombros e hiperconcentrados que le sobreyacen. Estos depósitos se encuentran sobre el margen oeste de la barranca Los Otates, a ~1 km al NE del poblado de Atenquique. Las líneas punteadas en la parte superior de la imagen representan los contactos entre ellos.

3.2.5.6. Unidad Depósitos de ceniza y flujos de escombros no diferenciados (Arroyo Seco)

Esta unidad se encuentra expuesta en el sector SE a 13 km del Nevado de Colima, a lo largo del margen NO de Arroyo Seco (loc. 54), en donde está compuesta por un depósito masivo de ~ 6 m, de color amarillo de flujos piroclásticos de ceniza y escasos fragmentos subredondeados de pómez blanca poco vesiculada. El depósito de ceniza subyace de forma discordante a una secuencia de ~12 m de depósitos de flujos hiperconcentrados y de flujos de escombros, que, a su vez, son sobreyacidos por un segundo depósito amarillo de flujos piroclásticos de ceniza y pómez de ~2 m de espesor (Fig.27, loc. 54). Una segunda secuencia volcanoclástica sobreyace al segundo depósito amarillo de flujos de ceniza. No se cuenta con edades de C14, para el depósito inferior de flujos de ceniza y pómez, sin embargo, su distribución y relación estratigráfica, permite asociarlo con la actividad eruptiva del tercer edificio del Nevado de Colima definido (este trabajo) como MN3. En algunas localidades de este sector, existen horizontes de paleosuelos que separan a éstos grandes depósitos de ceniza y pómez.



Figura 27. Loc. 54, Depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez color amarillo subyaciendo a depósitos de flujos hiperconcentrados y depósitos de escombros sobre el margen oeste del arroyo Seco, a 5 km al E del poblado Los Mazos, Jalisco, (ver figura 6 para su ubicación).

3.2.5.7. Unidad Depósito de flujos piroclásticos Alceseca (45 ± 17 ka)

En el sector SO, loc. 101 (Fig. 6) a 25 km de la cima del Nevado de Colima, sobre la carretera Colima-Zapotitlán de Vadillo (margen norte de la barranca Alceseca), aflora un depósito masivo de flujos de ceniza, color amarillo, con escasos y pequeños líticos de andesita. Este depósito presenta un espesor promedio de 12 m, aunque en algunos lugares supera los 15 m (Fig. 28, loc. 101, imagen superior). El depósito de ceniza sobreyace de forma discordante a gruesos depósitos de flujos de escombros y depósitos fluviales. En la parte inferior del depósito (imagen inferior) se encontraron fragmentos de madera carboniza, de la cual, una muestra fue fechada por ^{14}C en $45,175 + 4355/-2810$ años A.P. (Tabla 4). En esta localidad, el depósito de flujos de ceniza está sobreyacido por un paleosuelo de ~60 cm de espesor (imagen superior), datado en $6,930 \pm 180$ años A.P. Finalmente, cubriendo al paleosuelo se encuentra un segundo depósito de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, color amarillo, el cual en algunos lugares supera los 3 m de espesor.



Figura 28. Corte carretero Colima-Zapotitlán de Vadillo que expone dos depósitos amarillos de flujos de ceniza separados por un paleosuelo datado por C^{14} en $6,930 \pm 180$ años A.P. La imagen inferior, muestra detalle del depósito inferior de ceniza. La flecha negra señala fragmentos de madera carbonizada datada por C^{14} en $45,175 + 4355/-2810$ años A.P.

3.2.5.8. Unidad Lava Microondas (34 ± 7 ka)

Se trata de un flujo de lava que aflora en la pared interna del límite O del último remanente de cráter del cuarto edificio del Nevado de Colima definido como MN4 (loc. 91, Fig 6). En muestra de mano la roca es de color gris, con una textura fanerítica de grano medio con cristales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda, la cual, aunque no se cuenta con análisis geoquímicos fue clasificada como una andesita. Una muestra de roca de este flujo de lava (M11, ver fig. 5 para su ubicación) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 34 ± 7 ka. Una muestra de roca de un flujo de lava similar, de la pared interior de este remanente de carácter del Nevado, fue datada por Robin et al., (1987) con el método de K-Ar en 200 ka. La diferencia de miles de años entre las dos edades, quizás se deba al método de datación empleado.

3.2.5.9. Unidad Depósito de flujos de escombros (33.3 ka)

Este depósito se encuentra aflorando en el sector SE, a 20 km de la cima del Nevado de Colima, sobre el margen E del Río Tuxpan-Naranjo (loc. 36, Fig. 6). Es un depósito masivo con un espesor >20 m, formado por clastos subangulosos y subredondeados de andesita con tamaños predominantes de 15 a 40 cm hasta 1.5 m, soportados por una matriz abundante de arena fina a gruesa, color rosáceo bastante compacta. La matriz del depósito presenta zonas rojizas por alteración hidrotermal, así como varios moldes de clastos de andesita que sugieren la presencia de agua en el depósito. El depósito se encuentra sobreyaciendo a secuencias de depósitos fluviales. Dentro del depósito se encontró una muestra de madera sin carbonizar que fue fechada por ^{14}C en 33,310 +835/-755 años A.P. En esta misma localidad, sobre el margen O del Río Tuxpan-Naranjo, aflora una secuencia de ~15 m de sedimentos lacustres (Fig. 29, b), que por relación estratigráfica podría estar sobreyaciendo al depósito de flujos de escombros.

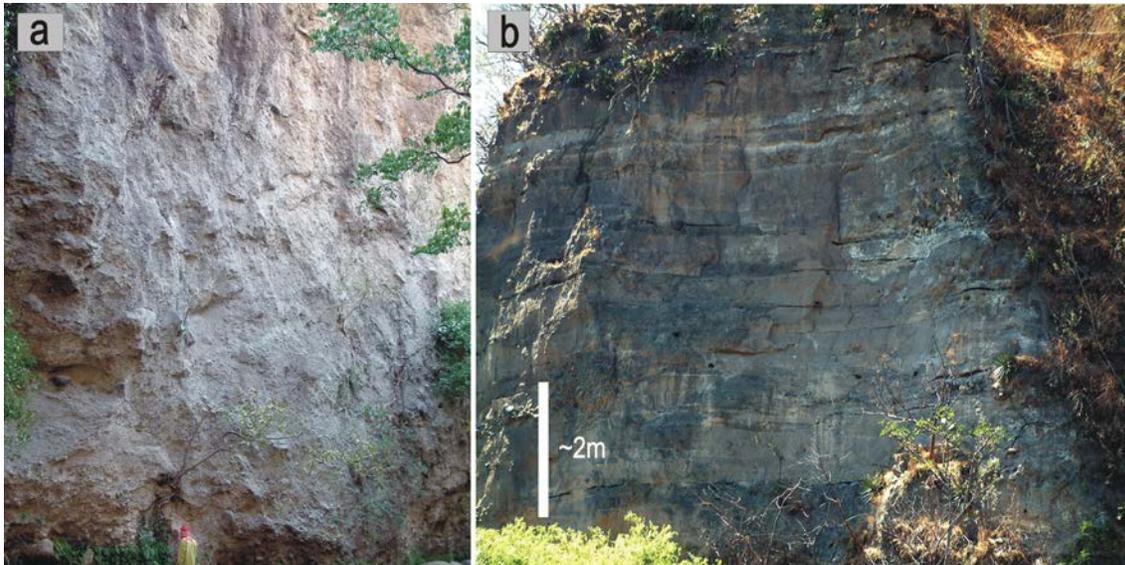


Figura 29. a) Depósito de flujos de escombros sobre el margen E del Río Tuxpan-Naranjo, b) Secuencia de depósitos de sedimentos lacustres sobre el margen oeste del Río Tuxpan-Naranjo.

En este mismo sector SE, a 19 km de la cima del Nevado de Colima, a la altura del cruce de la autopista Colima-Guadalajara sobre el Río Tuxpan-Naranjo, zona de Atenquique (loc. 44; Fig. 6), la columna estratigráfica está compuesta por los siguientes depósitos. Sobre el margen oeste del Río Tuxpan-Naranjo, los primeros 25 m de la columna están representados por una roca color crema, que fue descrita por Valdez (2006) de aspecto fracturado y diaclasado, conteniendo huecos abundantes rellenos con cristales de muscovita, cuarzo y turmalina formando rosetas. La mineralogía dominante de la roca es cuarzo y cantidades traza de feldespato, lo cual sugiere que se trata de una meta-arenisca, que probablemente sufrió un metamorfismo de contacto (Fig. 30, loc. 44 a). Esta misma roca ya había sido reportada por Cortés et al., (2005) como una meta-arenisca de la Formación Tecalitlán, del Terciario inferior, sin embargo, nuevas evidencias sobre su relación estratigráfica durante el presente estudio, permiten asignarle una edad del Cretácico (Cenomaniano-superior). Sobreyaciendo de forma discordante a esta roca, se encuentra una secuencia volcánoclastica con un espesor aproximado de 70 m, formada por depósitos de flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales. En la parte inferior, la columna presenta un depósito de ~1.5 m de sedimentos lacustres que se acuña lateralmente, lo cual sugiere la existencia en el pasado de un pequeño lago temporal. Los estratos que conforman a este depósito lacustre, presentan una deformación cóncava generada por el peso de los depósitos superiores que le sobreyacen (Fig. 30, loc. 44 b). Sobre el margen este, los primeros 40 m corresponden a varios depósitos de flujos hiperconcentrados, formados

por clastos subangulosos a subredondeados de andesita con tamaños que varían en su mayoría de 10 a 40 cm, soportados por una matriz de arena de grano medio a grueso bastante compacta. A estos depósitos, les sobreyace un paleosuelo > 1 m de espesor, de color ocre, el cual fue fechado en 31,715 ±2065/-2005 años A.P (Tabla 4; Fig. 30, loc. 44 c). Sobreyaciendo al paleosuelo se encuentra una secuencia volcániclastica de ~3 m de espesor, formada por clastos subangulosos y subredondeados de andesita con tamaños que varían de 20 a 40 cm, soportados por una matriz de arena fina a gruesa bastante compacta. A esta secuencia le sobreyace un segundo paleosuelo de ~70 cm de color ocre (no fechado), al cual a su vez le sobreyace una secuencia volcániclastica de ~30 m. Esta secuencia está formada por clastos subangulosos a subredondeados de andesita con tamaños que varían de 20 cm a 1 m, soportados por una matriz de arena fina a gruesa bastante compacta (Fig. 30, loc. 44 c). Finalmente, un depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza sobreyace de forma discordante a la secuencia volcániclastica (Fig. 30, loc. 44 d). Es un depósito masivo, formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita, de textura porfirítica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y abundante hornblenda. Los clastos presentan tamaños que varían de 15 a 60 cm, soportados por una matriz de arena fina a gruesa de color rosa a gris bastante deleznable. Por su distribución y relación estratigráfica se considera que este depósito de flujos piroclásticos está asociado con el MN5 que se describirá más adelante.



Figura 30. Imágenes que muestran los diferentes depósitos (descritos en el texto) que conforman la sección estratigráfica en la localidad 44, zona de Atenquique, justo en el cruce de la Autopista Colima-Guadalajara y el Río Tuxpan-Naranja.

Alrededor de 300 m aguas debajo de esta localidad, sobre las vías del Ferrocarril, margen este del Río Tuxpan-Naranja, la roca meta-arenisca parece estar intercalada de forma angular con las calizas de la Formación Tepames del (Albiano-Cenomaniano-superior) (Fig. 30 a).



Figura 30a. Imágen que muestra la relación estratigráfica de la meta-arenisca con las calizas de la Formación Tepames del (Albiano-Cenomaniano-superior)

3.2.5.10. Unidad Lava Paso del Colimote (30 ± 12 ka)

Esta lava forma parte del límite SO del último remanente de cráter del NC (loc. 92, Fig. 6), asociado con el MN4 (Fig. 5). Su distancia y área de distribución se desconoce ya que se encuentra cubierto por depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez asociados con el emplazamiento del domo el Picacho y por depósitos de pómez de caída asociados con la actividad eruptiva del Volcán de Colima (Luhr et al., 2010). En muestra de mano la roca es de color gris, con una textura fanerítica de grano fino, con cristales de plagioclasa, piroxenos y escasa hornblenda. Esta lava es una andesita (61.32 % en peso de sílice, Tabla 7). Una muestra de roca de este flujo de lava (M13) fue datada por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en 30 ± 12 ka.

Es importante mencionar que Robin et al., (1987) reportaron para esta unidad dos edades de K-Ar, de 200 y 150 ka. La primera de ellas, obtenida de un flujo de lava de la pared interna del último remanente de cráter que corresponde con el MN4 (Fig. 5), y la otra, de un flujo de lava que desborda el límite superior del cráter sobre su flanco SO. Aunque no lo mencionan con precisión, se entiende que éste último está asociado al emplazamiento del Domo El Picacho.

En la loc. 109, (Fig. 6), sector SO, a 20 km del Nevado de Colima, un paleosuelo que separa a dos depósitos de avalancha fue fechado en $29,295 \pm 2065$ -1640 años A.P. (Tabla 4.), (Fig. 31). Cortés et al., (2005) basándose en fechamientos de ^{14}C obtenidos en depósitos de avalancha en otras localidades de este sector, la asignaron al depósito superior de avalancha, una edad de 3,600 años A.P., y al depósito inferior una edad de 21,500 años A.P. Sin embargo,

con esta nueva edad se considera que el depósito inferior de avalancha, podría estar asociado con la actividad del MN3 y el depósito superior asociado al Paleofuego.

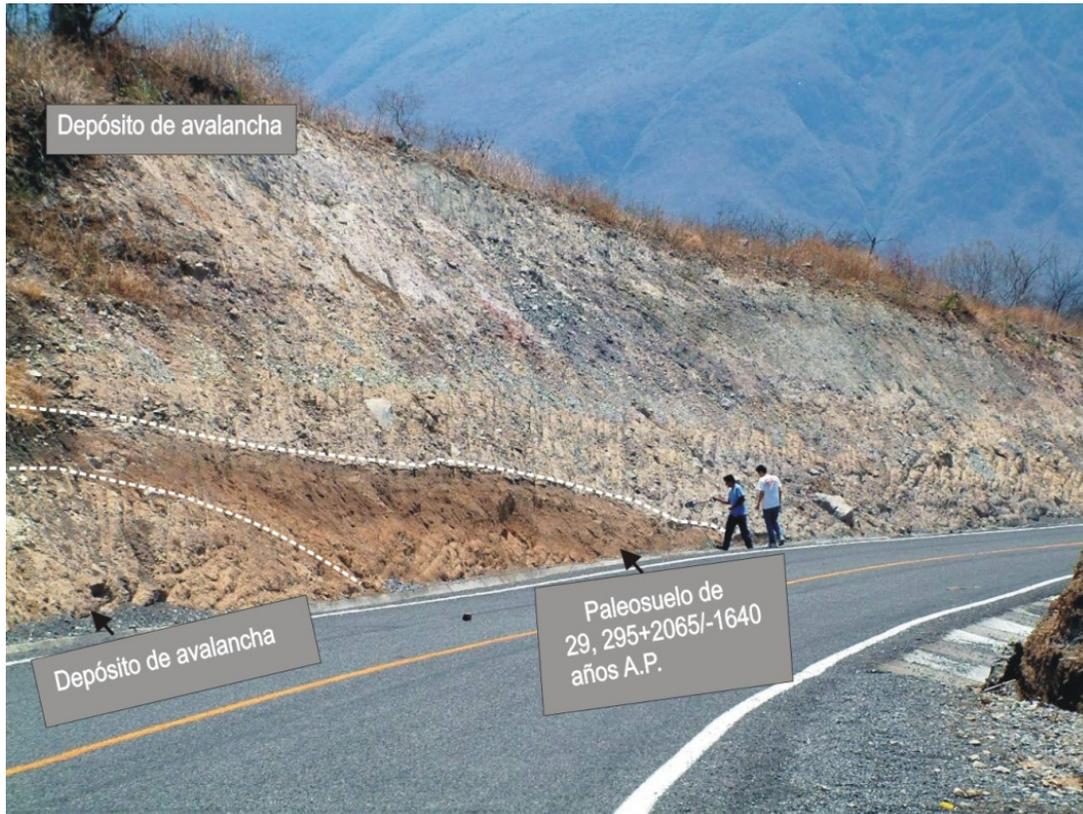


Figura 31. Imagen que muestra en la loc. 109, a dos depósitos de avalancha separados por un paleosuelo fechado en 29, 295 + 2065/-1640 años A.P. (modificada después de Cortés et al., 2005)

3.2.6. Miembro Nevado de Colima 5, MN5 (29 – 23 ka)

El MN5 está constituido por diez unidades de depósito distribuidas al ESE, a 19 km de la cima actual del Nevado. Estos depósitos constituyen la parte más reciente de la Formación Atenquique, como se muestra en la columna estratigráfica compuesta de la (Fig. 4). Se refieren a depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas, intercalados en secuencias de depósitos de flujos hiperconcentrados, depósitos de flujos de escombros y depósitos de material fluvial. A lo largo de la barranca Atenquique y el Río Tuxpan-Naranjo, forman una serie de terrazas de superficie plana y paredes casi verticales con alturas > 200 m. En este sector SE, cubren una superficie en forma de abanico de 41 km² con un volumen estimado de 8 km³.

3.2.6.1. Unidad Domo El Picacho (DP)

Este domo ocupa la parte central del Volcán Nevado de Colima (Fig. 5). Fue observado en las localidades 90 y 91. Consiste de un domo central y depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y depósitos de pómez y líticos de caída, así como gruesos flujos de lava que alcanzaron distancias de 8 km hacia el este. Algunos de estos flujos de lava al chocar contra el límite norte del cráter III de El Nevado, fueron desviados hacia el este. Algunos flujos de lava de la parte sur de la cima del domo, presentan fracturamiento con una dirección predominante NE20°, así como una intensa alteración hidrotermal que genera en la roca una coloración café ocre (Fig. 32 a). En donde la roca se encuentra poco alterada, ésta es de color gris oscuro, de textura fanerítica con plagioclasas, y pequeños cristales de hornblenda y posibles piroxenos. En el flanco O del domo, los flujos de lava, todavía muestran los efectos de la última glaciación. Sin embargo, los flujos de lava de la parte norte de la cima del domo no presentan alteración hidrotermal (Fig. 32 b). En muestra de mano la roca es de color gris claro de textura fanerítica, con fenocristales de hornblenda, plagioclasa y posibles piroxenos, por lo que se clasificó como una andesita. Robin et al., (1987) reportaron a estos flujos de lava como andesitas pobremente cristalizadas con plagioclasas, clinopiroxeno, ortopiroxeno y escasos minerales de hornblenda y un contenido de SiO₂ del 59%.

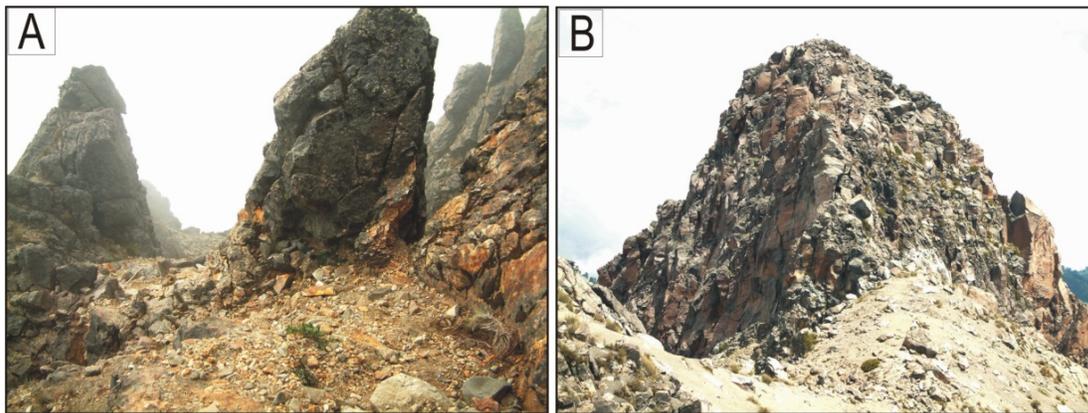


Figura 32. A) Imagen que muestra el grado de alteración hidrotermal y fracturamiento que presentan las rocas de la parte sur de la cima del domo el Picacho. B) Imagen que muestra los flujos masivos de lava sin alteración hidrotermal de la parte norte de la cima del Picacho.

Una muestra de roca (M10) colectada de uno de los flujos de lava en la base sur del domo (Figs. 5 y 6, loc. 90) fue datada por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 28 ± 8 ka. La roca en muestra de mano es de color gris oscuro compacta, de textura fanerítica fina con cristales de plagioclasa, piroxeno y escasa hornblenda, por lo que fue clasificada como andesita.

En el sector E, partes altas de la barranca Atenquique, cota 1900, los flujos de lava del domo el Picacho alcanzan espesores >40 m, y son subyacidos por depósitos masivos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de algunas decenas de metros. Las lavas son sobreyacidas por gruesos depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas. Savov et al. (2009) reportaron que los depósitos de lava inter-cráter asociados con el emplazamiento del domo, en su mayoría se encuentran cubiertos por depósitos de flujos de ceniza y pómez de caída asociados a la actividad eruptiva del Volcán de Colima.

3.2.6.2. Unidad Depósito de flujos piroclásticos Agua Escondida (27.68 ka)

En el sector SE (loc. 83, Fig.6) a lo largo de la B. Agua Escondida, cota 1118 m, aflora un depósito de flujos piroclásticos masivos con un espesor de ~ 7 m, formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita (10-30 cm de diámetro) soportados por una matriz de ceniza fina a gruesa de color rosáceo bastante deleznable. Los clastos de andesita son de color gris, negro y rojizo por alteración, de textura fanerítica a porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. El depósito contiene abundante pómez blanca subredondeada poco fibrosa (10-30 cm de diámetro) y trozos de madera bastante alterados, de los cuales algunos de ellos fueron fechados por ^{14}C en $27,680 \pm 280$ años A.P. Sobreyaciendo de forma discordante al depósito de flujos piroclásticos, se encuentra una secuencia volcanoclástica de ~70 m con depósitos de flujos piroclásticos intercalados.

3.2.6.3. Unidad Depósito de flujos piroclásticos (<27.05 ka)

En este mismo sector SE, a 1.5 km al E del poblado El Agosto, sobre el margen oeste de la Autopista Colima-Guadalajara (loc. 52, Fig.6) aflora un depósito masivo de flujo piroclástico de ceniza y bloques con un espesor ~20 m (Fig. 33). Este depósito está formado por clastos angulosos y subangulosos de andesitas (10-40 cm de diámetro), soportados por una matriz de ceniza fina a media de color gris poco endurecida. Los clastos de andesita en el depósito, son de color gris, negro y rojizo por alteración, de textura fanerítica a porfirítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. El depósito cubre a un paleosuelo de ~60 cm que fue fechado en $27,050 \pm 640/595$ años A.P. A su vez, el paleosuelo sobreyace ~50 m de depósitos de flujos hiperconcentrados y depósitos fluviales intercalados.

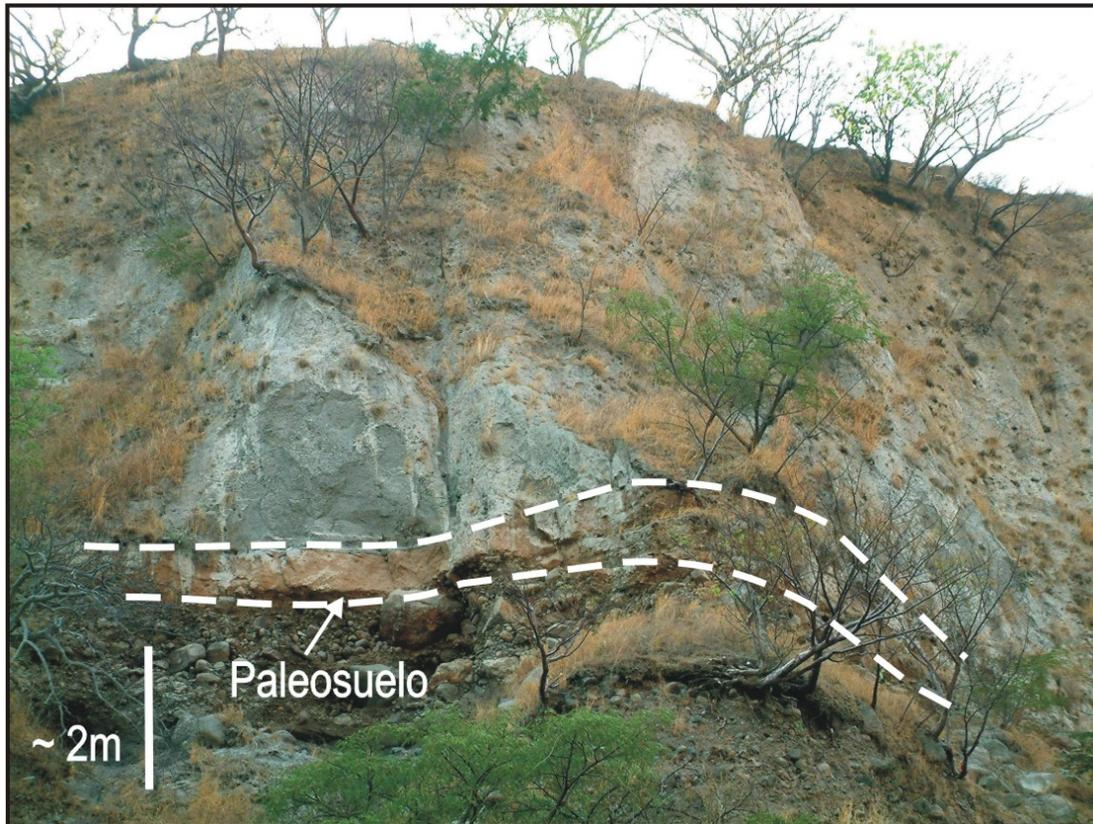


Figura 33. Depósito de flujo piroclástico que sobreyace a un paleosuelo fechado en 27,050 + 640/-595 A.P., al cual subyacen depósitos hiperconcentrados y fluviales.

3.2.6.4. Unidad Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (<26.25 ka)

En la loc. 37 (Fig. 6), sector SE sobre el margen oeste del camino que va del poblado de Atenquique a la estación de Microondas (C. Alto), aflora un depósito masivo de flujos piroclásticos de bloques y ceniza color amarillo de ~6 m de espesor. El depósito está formado por clastos angulosos a subangulosos de andesita de color gris, negro y rojizo por alteración, con tamaños que varían de 15-30 cm. Los clastos, presentan una textura fanerítica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno, soportados por una matriz de ceniza fina bastante deleznable. El depósito de flujos piroclásticos, sobreyace a un paleosuelo de ~40 cm que fue fechado por ^{14}C en 26,255 + 605/-560 años A.P. (Tabla 4). El paleosuelo a su vez, cubre a depósitos de flujo piroclástico de bloques y cenizas de espesor indeterminado.

3.2.6.5. Unidad Depósito de flujo piroclástico de ceniza (<23.55 ka)

A 16 km al SE de la cima actual del Nevado de Colima, sobre el margen sur de la B. Atenquique (Loc. 2, Fig. 6) esta unidad está representada por un depósito de flujo piroclástico de

ceniza y pómez de 1.6 m de espesor, bastante endurecido. El depósito está formado de ceniza y pómez subredondeada y alterada (1.5-3 cm de diámetro) y pequeños líticos subangulosos de andesita bastante alterados. El depósito sobreyace a un paleosuelo de 1.8 m de espesor, color ocre bastante compacto, el cual fue fechado por ^{14}C en 23,550 + 2390/-1840 años A.P. (Tabla 4), (Fig. 34 a) y a ~30 m de depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y flujos piroclásticos intercalados. El depósito de flujo piroclástico de ceniza está cubierto por depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y flujos piroclásticos intercalados que definen una pared casi vertical de más de 100 m de altura (Fig. 34 b).

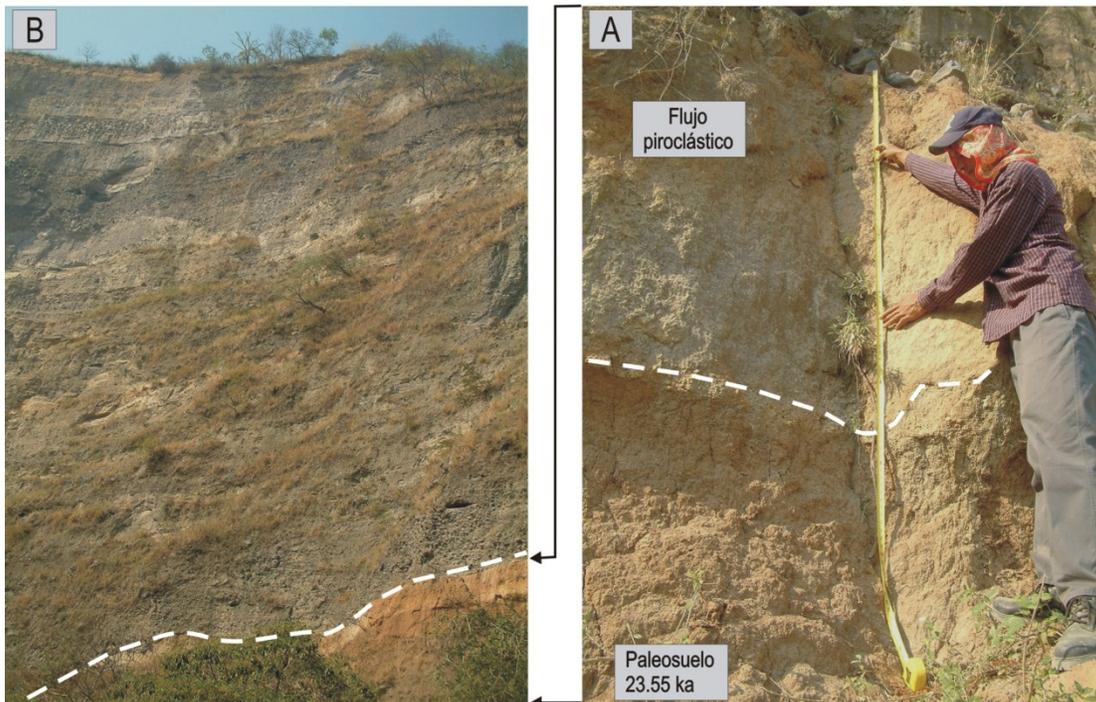


Figura 34. Paleosuelo fechado en 23,550 + 2390/-1840 años A.P, que subyace a una secuencia volcanoclástica de ~100 m de espesor, constituida por depósitos hiperconcentrados, fluviales y flujos piroclásticos intercalados.

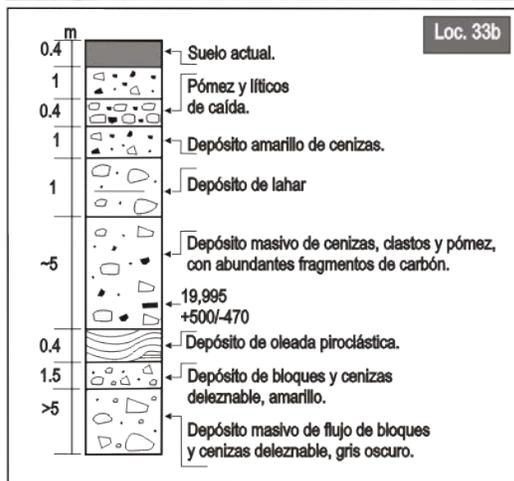
3.2.6.6. Unidad Depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez (19.99 ka)

En el sector SE, 2 km al NE de Juan Barragán, sobre el margen sur de B. El Zapote, loc 33, aflora un depósito masivo de ~5 m de flujo piroclástico de ceniza y pómez, de color gris claro poco compacto (Fig. 35 a). La pómez es poco fibrosa y subredondeada con tamaños de 5 a 10 cm, inmersa en una matriz de ceniza fina deleznable con estructuras de desgasificación y fragmentos de carbón uno de los cuales fue fechado en 19,995 + 500/-470 años A.P. En la base del depósito se encuentran lentes delgadas de oleadas piroclásticas con estratificación cruzada y acuñados lateralmente. El depósito de flujo piroclástico se encuentra en contacto directo con otro

depósito de ~2 m de espesor de flujos piroclásticos de bloques y cenizas color amarillo que transicionalmente cambia a un color gris oscuro formado por clastos angulosos y subangulosos de andesita con tamaños de 10 a 20 cm, de texturas fanerítica y porfírica, con plagioclasa, hornblenda y piroxeno. La columna está coronada por un depósito de flujos hiperconcentrados y depósitos de flujos piroclásticos amarillos de ceniza y pómez con líticos de caída intercalados.



Figura 35, loc 33. a) Depósito superior de flujos de ceniza con abundantes fragmentos de carbón fechados en 19,995 + 500/-470 años A.P. Las líneas punteadas representan los límites de depósitos inferiores de flujos de bloques y ceniza. b) Sección estratigráfica compuesta que muestra la secuencia de depósitos de flujos piroclásticos aflorantes en ésta localidad.



3.2.6.7. Unidad Depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez (<19.51ka)

En este mismo sector SE, a 1 km al norte del poblado de Agosto, Jalisco, aflora un depósito amarillo de flujo piroclástico de ceniza y pómez de ~1 m de espesor. Este depósito sobreyace a un paleosuelo de 40 cm datado en 19,515 + 350/-335 A.P. (Fig. 36 a) y al depósito de flujo piroclástico de ceniza y bloques <27.05 ka (Loc. 52, Fig. 33). En la loc 56, a 1 km al noroeste del poblado de Pialla, Jalisco, aflora un depósito de flujo

hiperconcentrado de 1.5 m de espesor sobre un paleosuelo de 40 cm (Fig. 36 b) fechado en 18,890 +415/-395 A.P. (Tabla 4). En esta localidad, el paleosuelo sobreyace a espesos depósitos volcanoclásticos que definen un gran abanico de forma alargada con una superficie plana de poca pendiente, sobre el cual se encuentra asentado el poblado de Pialla. Por la posición estratigráfica y cercanía de los puntos muestreados, es probable que se trate del mismo paleosuelo en ambas localidades.



Figura 36. Horizontes de paleosuelo en el sector SE, con edades muy similares que por su posición estratigráfica podría tratarse del mismo evento edáfico.

3.2.6.8. Unidad Secuencias volcanoclásticas no diferenciadas B. Alceseca.

En el sector SO, a lo largo del valle de B. Alceseca, existe una serie de terrazas formadas por espesos depósitos de flujos hiperconcentrados, flujos de escombros y depósitos fluviales intercalados definidos como (TBAI, Fig. 5). Las terrazas presentan paredes casi verticales con alturas que superan los 60 m, lo que dificultó hacer una descripción más detallada de sus depósitos. Morfológicamente, presentan una superficie plana con un bajo grado de disección, lo que sugiere, una edad relativamente reciente.

3.2.6.9. Unidad Depósito de flujo piroclástico de bloques y ceniza (>13.48 ka)

En el sector SO a 25 km de la cima actual del Nevado de Colima, sobre el margen E del río Armería, aflora un depósito masivo de flujo piroclástico de bloques y cenizas con un espesor de ~4 m. El depósito está constituido por clastos subangulosos y subredondeados de andesita (5-15 cm de diámetro) inmersos en una matriz de arena fina a gruesa bastante endurecida. Los clastos presentan una textura fanerítica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno (Fig. 37, loc. 98a). Este depósito es cubierto por un paleosuelo de 60 cm fechado en 13,480 + 350/-335 años A.P. (Fig. 37, loc. 98b). Sobreyaciendo en forma discordante al paleosuelo, se encuentran ~20 m de depósitos de flujos hiperconcentrados, fluviales y depósitos de sedimentos

lacustres intercalados, que definen una pequeña terraza de superficie plana. Sobre la terraza descansa un depósito masivo de avalancha que está formado por clastos subangulosos a subredondeados de andesita, con tamaños que varían de 10 a 40 cm, de textura porfírica con fenocristales de plagioclasa, piroxeno y hornblenda. Algunos de ellos presentan un fracturamiento con estructura de rompecabezas. Los clastos de andesita, se encuentran soportados por una matriz de arena fina a gruesa de color gris claro bastante endurecida, la cual presenta zonas verdosas y rojizas por alteración hidrotermal (Fig. 37, loc. 98c).

En esta localidad, el depósito de avalancha subyace de forma discordantemente, a un depósito masivo de flujo de escombros de ~20 m de espesor (DEM), el cual está formado por clastos subangulosos a subredondeados de andesita, con tamaños que varían de 10 a 20 cm, de textura fanerítica y porfírica con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno. Los clastos de andesita, están soportados por una matriz de arena fina a gruesa de color gris claro bastante endurecida, la cual contiene abundantes moldes de árboles de hasta 30 cm de diámetro. En algunos de estos moldes, se encontraron restos de materia orgánica que fue fechada en 3,315 + 225/-220 años A.P. (Tabla 4). El depósito de flujo de escombros está sobreyacido por una secuencia sedimentaria de ~10 m de espesor, formada por horizontes de arena fina y delgados horizontes de sedimentos lacustres (LRA) (Fig. 37, loc. 98 d)



Figura 37, loc. 98. a) Depósito de flujo piroclástico formado por pequeños clastos subangulosos de andesita y pequeños fragmentos de pómez subredondeada, soportados por una matriz arenosa compacta, b) paleosuelo que sobreyace al depósito de flujos piroclásticos, c) depósito de avalancha de escombros subyaciendo al depósito de flujos de escombros. Las líneas punteadas representan la traza de un paleosuelo acuñado lateralmente por procesos erosivos que separa a ambos depósitos, d) depósito de flujos de escombros. Las flechas señalan moldes de árboles dentro del depósito, el cual es cubierto por depósitos de sedimentos lacustres.

3.2.6.10. Unidad Depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez (<6.93 ka)

Este depósito se encuentra en el sector SO sobre el margen norte de la barranca Alceseca, a 25 km de la cima del Nevado de Colima, loc. 101, (Fig. 28 imagen superior). Es un depósito amarillo de ceniza y pómez de 1.5 a 3 m de espesor, que sobreyace de forma discordante a un paleosuelo de ~ 60 cm, que fue fechado en $6,930 \pm 180$ años A.P. (Tabla 2). En este sector, el depósito de flujo piroclástico de ceniza y pómez se encuentra ampliamente distribuido sobre depósitos asociados con la actividad del Volcán Nevado de Colima. Sin embargo, su edad < 6.9 ka A.P., nos permite asociarlo con la actividad eruptiva del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima).

Tabla 4. Relación de edades por ^{14}C obtenidas en este trabajo, asociadas con depósitos volcánicos del Nevado de Colima (ver fig. 5 para la ubicación de las muestras de roca y carbón analizadas)

No. Lab.	Mtra	Coordenadas		Edad (en años)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{‰}}$	Descripción
		N	W			
*A-14943	NC9	19°27'.511"	103°47'7.73"	134±40	-24.2	Madera en depto de FP?, adelante de B. Alceseca
*A-14944	NC10	19°29'.355"	103°46'6.42"	(135.8±0.6pMC)	-27.4	Madera en depto de FP., margen norte de B. El Huacal
A-14373	NC3	19°27.07"	103°30'6.19"	280±65	-24.4	Carbón en FP. zona de San Marcos, camino a J. Barragán
A-14946	NC12	19°28'31.11"	103°49'46.80"	3,315±225/-220*	-24.8	Huella de tronco en depósito F.E. adelante de Mazatan.
A-14945	NC11	19°30'2.70"	103°49'9.03"	6,930±180*	-22.1	Suelo que subyace a FP., después de B. Alceseca
A-14371	NC1	19°282.69"	103°31'1.65"	9,445±95	-24.4	Carbón en lahar sobre avalancha, margen S de B. Beltrán
A-15339	NC21	19°27'57.30"	103°49'49.09"	13,480+350/-335	-20.8	Suelo + lahar y lacustres. Margen E Río Armería, Mazatan.
A-14948	NC14	19°29'06.82"	103°29'03.79"	18,890+415/-395*	-21.0	Suelo que subyace a FP., zona de Piaila, Jal.
A-14949	NC15	19°30'45.48"	103°27'34.35"	19,515+350/-335*	-16.4	Suelo que subyace a FP., adelante de Agosto
A-14372	NC2	19°29.197"	103°30'9.63"	19,995+500/-470	-25.2	Carbón en FP., adelante de Juan Barragán, B. El Zapote
A-14375	NC5	19°32'.07"	103°27'.03"	23,550+2390/-1840	-13.3	Suelo en sec de lahar y FP., margen S de B. Atenquique.
A-14950	NC16	19°31'54.19"	103°30'2.18"	26,255+605/-560*	-20.4	Suelo que subyace a FP., camino a Microondas
A-14378	NC8	19°30'48.88"	103°26'.61"	27,050+640/-595	-13.8	Suelo que subyace a FP. Autopista Colima - Guadalajara.
A-15338	NC17	19°30'9.54"	103°26'9.78"	27,680±280	-23.8	Madera en FP, B. Agua Escondida, zona de Atenquique.
A-14947	NC13	19°27'.514"	103°47'7.32"	29,295+2065/-1640*	-20.8	Suelo + dos avalanchas antes de Mazatan, Jal.
A-14376	NC6	19°31'19.97"	103°36'.42"	31,715+2675/-2005	-20.3	Suelo, zona de Atenquique, Vía del FF.
A-14374	NC4	19°26'44.21"	103°27'.33"	33,310+835/-755	-26.8	Madera en avalancha inf?, Zona de Platanillo, B. Colomo.
A-15335	NC20	19°30.307"	103°49.88"	45,175+4355/-2810	-26.0	Carbón en FP, margen N de B. Alceseca, carretera a Zapotitlán.

Tabla 5: Lista de edades de K-Ar en muestras de rocas del Volcán Nevado de Colima, realizadas por otros autores en trabajos previos. Las coordenadas que se muestran en la tabla son aproximadas de acuerdo a la ubicación reportada por los autores.

M	Coordenadas aproximadas		Edades K-Ar en (ka)	Autor	Sector
	N	W			
10	19°35'26.33"	103°34'56.01"	140 ± 40	Allan (1986)	NE
9	19°34'30.26"	103°37'37.61"	150	Robin et al (1987)	SW
8	19°34'06.77"	103°37'01.33"	200	Robin et al (1987)	SW
7	19°30'35.41"	103°27'34.54"	260 ± 60	Robin et al (1987)	SE
6	19°35'23.53"	103°32'15.60"	290 ± 80	Allan (1986)	NE
5	19°36'37.87"	103°39'59.72"	350 ± 50	Allan (1986)	NW
4	19°36'47.46"	103°39'16.81"	370 ± 50	Robin et al (1987)	NW
3	19°30'46.31"	103°27'32.54"	380 ± 100	Robin et al (1987)	SE
2	19°36'25.96"	103°40'08.92"	530 ± 100	Robin et al (1987)	NW
1	19°38'29.35"	103°39'16.09"	950 ± 170	Allan (1986)	N

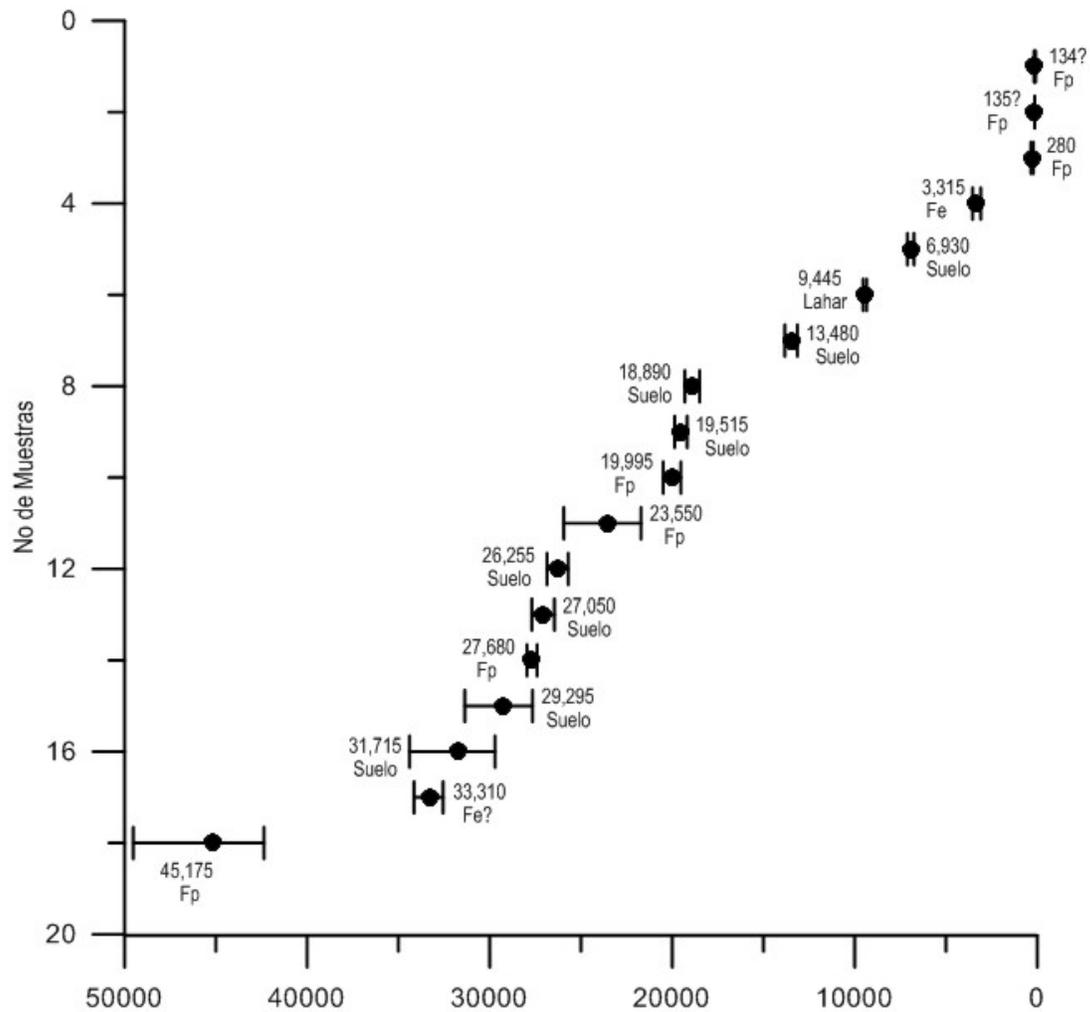


Figura 38. Gráfica de las edades convencionales de ^{14}C (años A.P.) e incertidumbre reportadas en la tabla 4. Estas edades fueron obtenidas en depósitos de flujos piroclásticos y paleosuelos en este trabajo para el edificio volcánico del Nevado de Colima. Abreviaturas: Fp = flujos piroclásticos, Fe = flujo de escombros. La ubicación de las muestras fechadas se presenta en el mapa geológico de la figura 5.

4. Granulometría de los depósitos de Avalancha

De los tres depósitos de avalancha de escombros identificados en el sector SE del volcán, únicamente se realizaron análisis granulométricos de dos de ellos, ya que son los que presentan los mejores y más representativos afloramientos en el área de estudio. Del depósito de avalancha de escombros (AVZ) que aflora a lo largo de las barracas Beltrán, El Zapote y El Limón en facies de matriz, se analizaron tres muestras colectadas en la porción inferior del afloramiento de las localidades 16, 21 y 28 (Fig. 6). Para el depósito de avalancha (AVP) que aflora a lo largo de las barrancas El Platanar, Piedra de Cal y Barranca Beltrán en su parte más distal, se analizaron seis muestras de las localidades, 8, 10, 13, 14, 15 y 18 (Fig. 6).

Los histogramas de distribución granulométrica de las muestras analizadas para el depósito de avalancha AVZ (Fig. 39 a), muestran una distribución polimodal con picos predominantes en -4ϕ , -3ϕ , 2ϕ y 4ϕ con un valor de ($\sigma\phi$) que varía de 2.7 a 3.1, lo que sugiere una mala clasificación para el depósito de avalancha. De igual forma, los histogramas de las muestras analizadas para el depósito de avalancha AVP, muestran una distribución polimodal con picos en -4ϕ , -2ϕ , 1ϕ , 3ϕ y 4ϕ y un valor de ($\sigma\phi$) que varía de 2 a >3 , lo que también sugiere una mala clasificación para este depósito de avalancha.

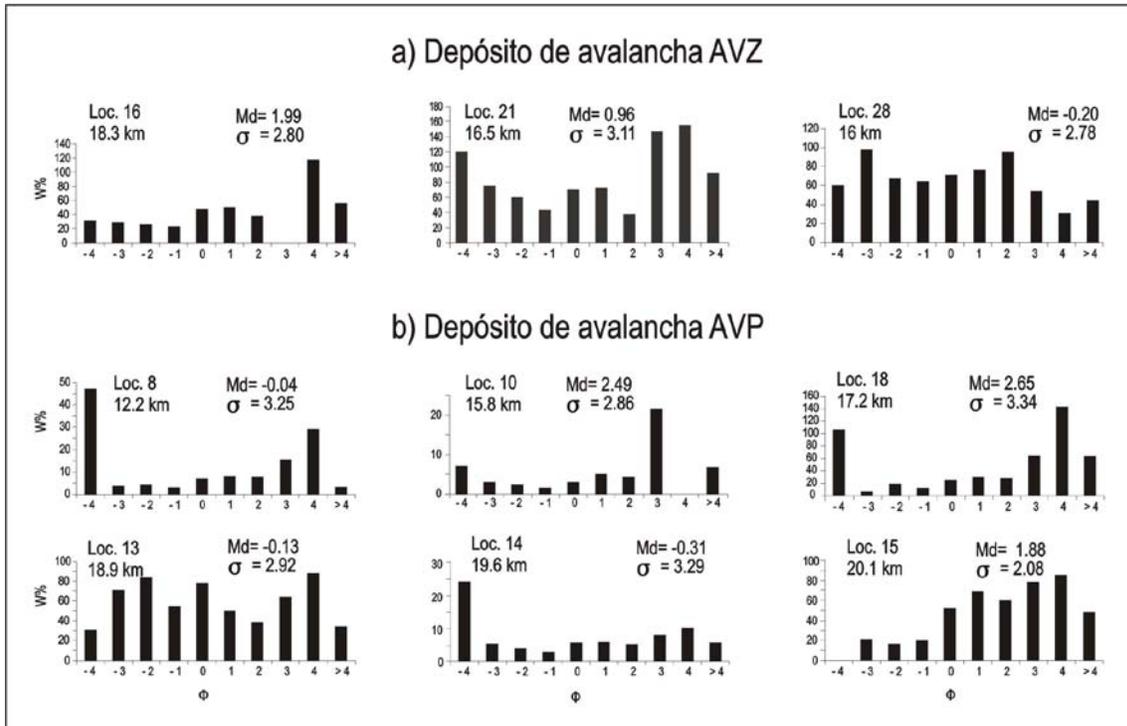


Figura 39. Histogramas de las características sedimentológicas de los depósitos de avalancha analizados del Volcán Nevado de Colima.

Tabla 6. Presenta los porcentajes de las fracciones de grava, arena, limo y matriz de las muestras analizadas así como algunos parámetros estadísticos de su distribución granulométrica. También muestra los contenidos de las fracciones grava, arena, limo, matriz y los parámetros sedimentológicos según Folk (1980) de los depósitos de avalancha analizados del Volcán Nevado de Colima, en el sector SE. La descripción de las abreviaturas de la tabla son aquellas descritas en la sección de metodología.

Depósito AVZ

Loc.	Dist. Orig. (km)	Grava (-4Φ a 2Φ)	Arena (-1Φ a 4Φ)	Limo (5Φ a 8Φ)	Matriz (-1Φ a 9Φ)	Md	Mz	σ	Sk	K
28	16	78.8	386.3	115	499.4	-0.20	-0.25	2.78	0.01	0.82
21	16.5	254.6	524.6	91.6	616.2	0.96	0.47	3.11	-0.20	0.60
16	18.3	86.4	276.5	55.9	332.4	1.99	1.25	2.80	-0.40	0.83

Depósito AVP

Loc.	Dist. Orig. (km)	Grava (-4Φ a 2Φ)	Arena (-1Φ a 4Φ)	Limo (5Φ a 8Φ)	Matriz (-1Φ a 9Φ)	Md	Mz	σ	Sk	K
8	12.2	550.8	704.2	32.3	736.5	-0.04	-0.21	3.25	-0.05	0.44
10	15.8	125.3	356.7	67.6	424.3	2.49	0.74	2.86	-0.70	0.90
18	17.2	131.5	300.9	63.4	364.3	2.65	0.82	3.34	-0.64	0.60
13	18.9	186.2	335.6	34.7	370.3	-0.13	0.15	2.92	0.09	0.67
14	19.6	331.2	370.6	55.2	425.8	-0.31	-0.30	3.29	0.03	0.52
15	20.1	37.5	368.3	48.4	416.7	1.88	1.79	2.08	-0.16	0.90

Aun cuando el número de muestras analizadas para cada depósito de avalancha los resultados es limitado, se puede hacer algunas observaciones. Por ejemplo, el contenido de grava (-4Φ a 2Φ), arena (-1Φ a 4Φ) y limo (5Φ a 8Φ) en ambos depósitos disminuye con la distancia. Los parámetros Mz y Sk, Tabla 4, de las muestras analizadas para ambos depósitos de avalancha, aun cuando no muestran un patrón ordenado con la distancia, presentan valores inferiores a 1 y negativos, lo cual sugiere una abundancia de material grueso y mediano (arena principalmente). Igualmente, el parámetro (K) presenta valores <1, lo que indica una mala selección en ambos depósitos de avalancha.

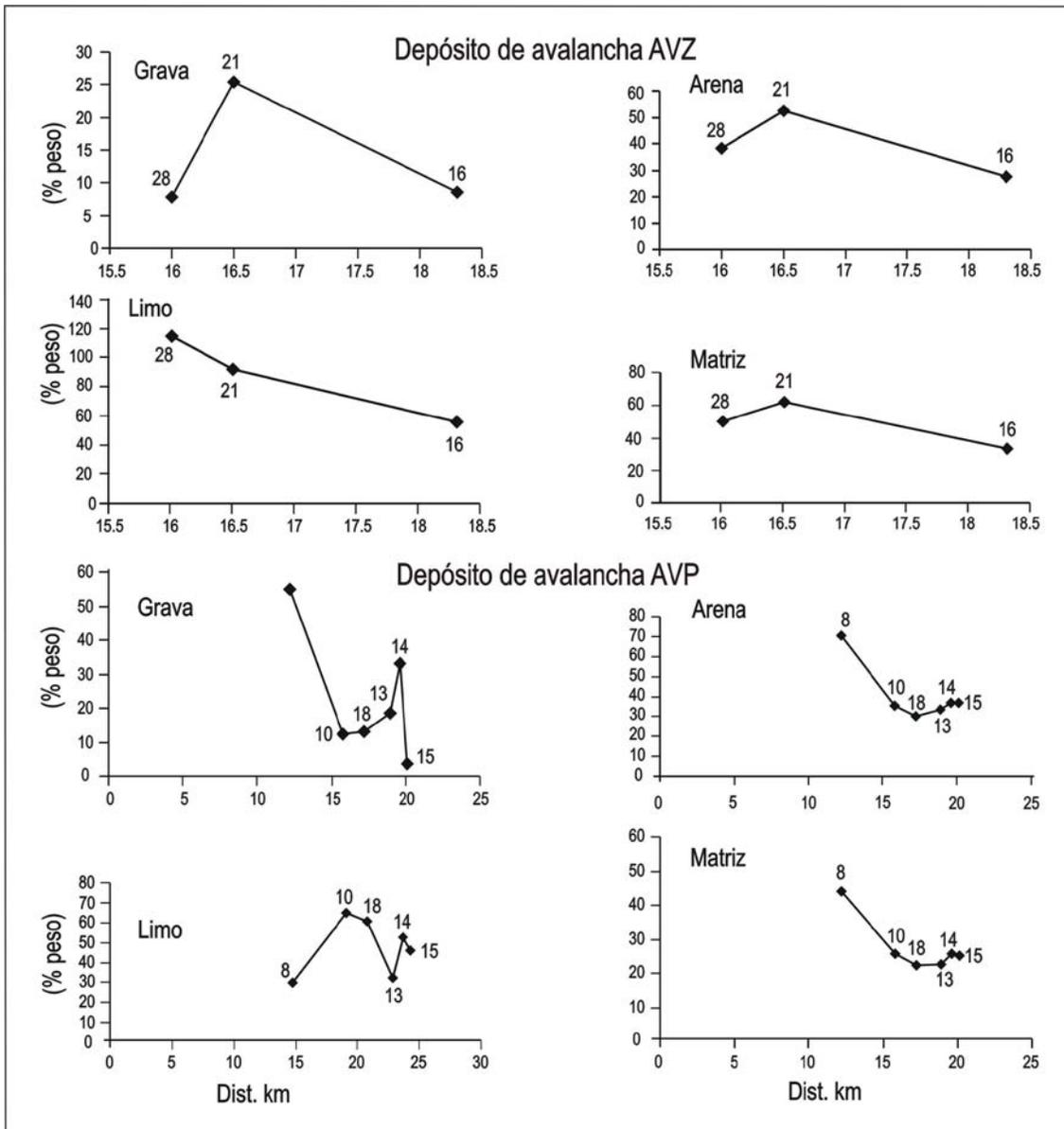


Figura 40. Gráficas de tendencias granulométricas de las muestras analizadas de los depósitos de avalancha del Volcán Nevado de Colima en el sector SE. Los números en cada gráfica, corresponden al número de localidad verificada durante el presente trabajo.

Las gráficas de los parámetros granulométricos de las muestras analizadas para el depósito de avalancha AVZ, muestran en cada fracción granulométrica una disminución en su contenido de material con la distancia. En el caso del depósito de avalancha AVP, aun cuando las gráficas de las fracciones de grava y limo, no presentan un patrón ordenado de forma gradual, de incremento o disminución, todas las gráficas muestran un decremento en su contenido con la distancia recorrida.

5. Geoquímica de elementos mayores

En la Tabla 7, se muestran los resultados de los análisis químicos de roca total de las muestras analizadas del Volcán Nevado de Colima, domos laterales y el Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima). La ubicación de las muestras de roca analizadas se presenta en las (Figs 5 y 41). Para el Nevado de Colima se analizaron 14 muestras de roca de flujos de lava asociados a las estructuras volcánicas definidas (este trabajo) como Miembros Nevado 1-4 (MN1-MN4), una para cada domo lateral como son: Domo Las Víboras (DLV), Domo Los Núñez (DLN), Domo Los Mazos (DLM), Domo El Playón (DP), dos para el Domo Alto (DA), y tres para el Paleofuego (PF) como se muestra en la Tabla 8. Por razones de espacio en la leyenda de los diagramas de variación química de elementos mayores y elementos traza (Figs. 42 y 43), se omite el término miembro. En los diagramas de variación química de elementos mayores (Fig. 42 a) se observa que el TiO_2 , MgO , CaO y Fe_2O_3 decrecen en abundancia en forma casi lineal con el incremento de SiO_2 , mientras que el MnO presenta una marcada dispersión. De acuerdo con Ewart (1982), las variaciones negativas de MgO y Fe_2O_3 podría deberse a la cristalización fraccionada del olivino y los piroxenos en las rocas más máficas y con el fraccionamiento de la hornblenda y la biotita (\pm piroxenos) en las rocas más evolucionadas. En tanto que la tendencia casi lineal negativa del Fe_2O_3 y del TiO_2 podría corresponder al fraccionamiento de la magnetita en las rocas intermedias y evolucionadas. La disminución del CaO y el aumento del K_2O con el incremento en sílice se debe al fraccionamiento de la plagioclasa (Wilson, 1989). El contenido de Na_2O también presenta una correlación positiva con el SiO_2 , aunque con una marcada dispersión en las rocas con mayor contenido de SiO_2 . En el caso particular del K_2O en los domos su contenido disminuye al incrementarse el sílice. El Al_2O_3 muestra un comportamiento bastante disperso, tanto en rocas con bajo o alto contenido de SiO_2 . En el caso del P_2O_5 se observa un ligero comportamiento oscilatorio, con pequeños incrementos y decrementos en las rocas del Nevado 4 y domos laterales, a excepción en la muestra M32, asociada al Paleofuego, en la cual, su contenido es alto, así como el de K_2O y TiO_2 . Las rocas del Nevado 4 analizadas, muestran una marcada dispersión en el contenido de MgO y Al_2O_3 , siendo este último más bajo en la muestra M17, aun cuando ésta presenta un contenido de SiO_2 alto, igualmente en la muestra M32 asociada al Paleofuego, con menor contenido de SiO_2 .

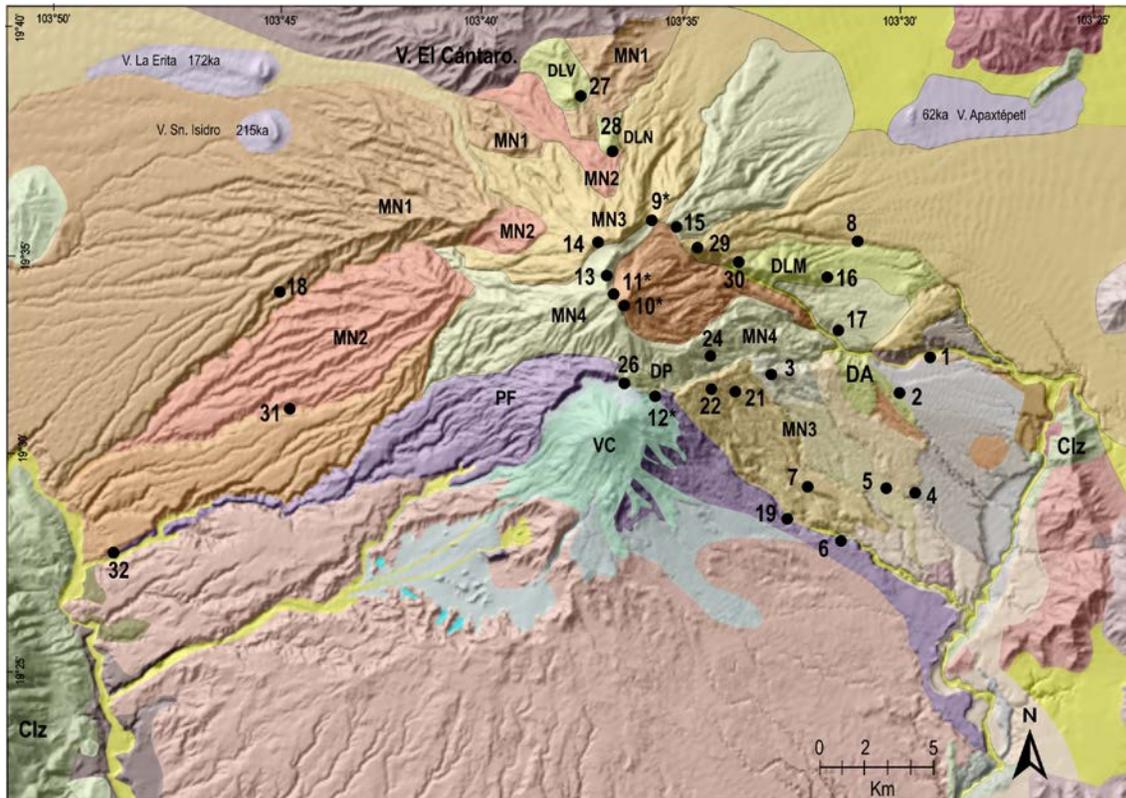


Figura 41. Muestra la ubicación de las rocas de flujos de lava del Volcán Nevado de Colima, domos laterales y Paleofuego, datadas por el método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y analizadas químicamente. Por razón de espacio se omite el prefijo M, dejando únicamente el número de la muestra. Abreviatura: MN1...4 = Miembros Nevado 1...4, DLV = Domo Las Víboras, DLN = Domo Los Núñez, DLM = Domo Los Mazos, DA = Domo Alto, PF = Paleofuego, DP = Domo El Playón. Las muestras del Nevado como la del Paleofuego con asterisco, carecen de análisis químicos.

Tabla 7. Análisis químicos de roca total del Volcán Nevado de Colima, domos laterales y Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima). La ubicación de las muestras se puede ver en las Figs. 5 y 41. Las muestras con asterisco están asociadas al Paleofuego. La muestra M26** corresponde al Domo El Playón.

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5	M6*	M7	M8
Lat. (N°)	19°32'10.73"	19°31'54.22"	19°31'55.73"	19°29'5.53"	19°29'6.65"	19°28'15.55"	19°29'5.30"	19°34'55.59"
Long. (W°)	103°29'41.88"	103°30'20.74"	103°32'33.38"	103°29'49.63"	103°29'53.18"	103°31'33.38"	103°31'31.04"	103°31'59.28"
%								
SiO ₂	53.30	59.18	59.87	59.05	56.88	58.76	59.92	59.87
TiO ₂	0.82	0.63	0.62	0.64	0.72	0.66	0.63	0.57
Al ₂ O ₃	17.90	17.70	18.04	17.37	17.16	17.70	17.50	17.89
Fe ₂ O ₃	7.56	5.67	5.50	5.71	6.66	6.05	5.52	5.40
MnO	0.11	0.10	0.09	0.09	0.11	0.10	0.09	0.09
MgO	5.50	2.89	2.09	2.92	4.38	3.13	2.67	2.39
CaO	8.04	5.97	5.55	6.02	7.23	6.13	5.55	5.61
Na ₂ O	3.98	4.56	5.00	4.59	4.06	4.40	4.58	4.75
K ₂ O	0.91	1.46	1.30	1.49	1.17	1.40	1.61	1.46
P ₂ O ₅	0.16	0.22	0.21	0.24	0.20	0.19	0.24	0.23
LOI	1.57	1.47	1.60	1.72	1.29	1.33	1.53	1.59
Total	98.28	98.38	98.27	98.12	98.57	98.52	98.31	98.26
ppm								
V	224	131	115	134	191	176	124	112
Cr	75	24	5	29	97	22	30	5
Zn	65	49	44	45	56	50	44	45
Rb	11	18	18	18	18	17	20	21
Sr	643	714	619	715	622	680	707	680
Y	15.01	14.49	15.03	14.58	15.22	14.24	15.06	14.87
Zr	73	148	147	150	103	109	166	159
Nb	2.72	5.16	5.14	5.38	3.99	3.84	5.38	5.23
Ba	354.74	540.82	472.64	555.88	425.08	481.27	600.17	595.33
La	7.8	14.27	11.16	14.03	11.1	12.39	15.27	14.17

Ce	17.55	31.62	26.36	32.29	24.18	27.71	34.74	32.26
Nd	11.5	16.34	13.49	16.1	13.63	14.57	16.75	15.97
Sm	2.78	3.33	3.04	3.47	3.1	3.19	3.54	3.48
Eu	0.94	1.07	0.95	1.07	0.97	0.97	1.08	1.05
Tb	0.44	0.45	0.44	0.46	0.45	0.44	0.49	0.47
Yb	1.22	1.25	1.37	1.23	1.28	1.13	1.27	1.33
Lu	0.18	0.2	0.21	0.2	0.2	0.18	0.21	0.22
Hf	1.91	2.86	2.58	2.76	2.31	2.26	3.07	2.87
Ta	0.26	0.4	0.43	0.42	0.32	0.37	0.39	0.45
Pb	5.37	5.98	5.65	6.22	5.52	5.54	5.66	6.49
Th	0.84	2.13	1.88	2.14	1.75	1.68	2.31	2.26
U	0.7	0.93	0.95	1.0	0.7	0.75	1.01	1.01

Muestra	M13	M14	M15	M16	M17	M18	M19*	M21
Lat. (N°)	19°34'12.58"	19°35'8.74"	19°35'24.23"	19°34'5.34"	19°32'36.87"	19°33'57.35"	19°28'46.65"	19°31'53.47"
Long. (W°)	103°36'59.30"	103°36'47.29"	103°35'17.26"	103°31'49.81"	103°31'7.23"	103°44'59.83"	103°32'48.74"	103°33'33.29"
%								
SiO ₂	61.39	60.01	60.04	62.51	60.94	53.77	56.27	59.35
TiO ₂	0.58	0.59	0.54	0.50	0.57	0.75	0.75	0.74
Al ₂ O ₃	17.64	17.63	17.9	17.59	15.65	16.27	17.89	17.2
Fe ₂ O ₃	5.42	5.9	5.57	5.06	5.91	7.75	6.97	6.18
MnO	0.08	0.10	0.10	0.09	0.10	0.12	0.11	0.10
MgO	2.28	2.38	2.24	1.69	4.15	7.66	3.54	3.19
CaO	5.15	5.87	5.65	5.04	5.71	8.15	7.02	6.04
Na ₂ O	4.54	4.4	4.68	4.74	4.05	3.79	4.29	4.32
K ₂ O	1.46	1.32	1.27	1.42	1.73	0.79	1.02	1.59
P ₂ O ₅	0.17	0.21	0.2	0.22	0.15	0.19	0.21	0.25
LOI	0.1	-0.14	0.52	-0.03	-0.2	-0.24	-0.1	-0.21
Total	98.82	98.29	98.71	98.86	98.76	99.02	97.97	98.76

ppm

Se	10	10	9	6	16	22	17	14
Be	1	1	1	1	1	1	1	1
V	90	115	94	78	129	194	175	141
Cr	30	< 20	< 20	< 20	130	380	30	50
Co	12	13	60	9	17	29	18	14
Ni	16	12	13	11	69	169	23	27
Cu	26	20	18	16	80	49	45	35
Zn	47	56	60	52	51	64	96	77
Rb	21	17	15	20	25	8	13	20
Sr	567	696	662	637	470	679	710	716
Y	13	12.4	11.8	13	14.1	12.4	14.1	14.5
Zr	116	113	122	143	128	119	97	134
Nb	3.4	3.1	3.4	5.3	4.1	2.6	3	5.6
Sb	0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.8	< 0.2	< 0.2	0.2
Cs	0.4	0.4	0.2	0.2	0.4	0.1	0.1	0.3
Ba	544	510	501	589	570	317	400	682
La	12.2	11.9	9.88	13.8	13	9.52	11.3	17
Ce	26.2	26.5	24.7	32.2	28.4	20.2	25.3	37.9
Nd	13.8	14.2	12.1	15.3	14.7	12.7	14.6	19
Sm	3.14	3.06	2.86	3.12	3.17	3.11	3.25	4.06
Eu	0.92	0.98	0.97	0.94	0.86	0.95	1.05	1.16
Tb	0.45	0.42	0.41	0.42	0.47	0.43	0.49	0.52
Yb	1.57	1.41	1.44	1.54	1.66	1.32	1.57	1.65
Lu	0.26	0.23	0.23	0.25	0.28	0.21	0.26	0.27
Hf	3	2.7	3.1	3.6	3.4	3	2.5	3.3
Ta	0.21	0.24	0.63	0.31	0.21	0.15	0.23	0.33
Pb	< 3	< 3	3	< 3	< 3	< 3	6	< 3
Th	2.01	1.66	1.36	2.24	2.6	0.74	1.36	2.41
U	0.8	0.66	0.62	0.89	1.12	0.33	0.54	0.9

Muestra	M22	M24	M26**	M27	M28	M30	M31*	M32
Lat. (N°)	19°31'30.29"	19°32'01.32"	19°31'43.12"	19°38'41.95"	19°37'14.86"	19°27'56.81"	19°34'58.04"	19°34'53.67"
Long. (W°)	103°35'01.00"	103°35'20.99"	103°36'25.90"	103°37'34.03"	103°36'57.08"	103°49'21.64"	103°35'01.12"	103°34'41.71"
%								
SiO ₂	59.52	59.08	61.85	62.36	63.2	59.58	56.4	54.28
TiO ₂	0.70	0.75	0.66	0.42	0.38	0.69	0.65	1.06
Al ₂ O ₃	17.56	18.21	16.9	17.04	17.45	17.83	16.87	15.54
Fe ₂ O ₃	6.49	6.72	5.48	4.74	4.22	6.25	6.65	7.04
MnO	0.11	0.11	0.09	0.08	0.08	0.10	0.10	0.10
MgO	2.93	3.26	2.7	2.68	1.33	3.15	5.05	4.87
CaO	6.02	6.24	5.51	5.45	4.53	6.01	7.42	7.68
Na ₂ O	4.47	4.32	4.58	4.33	4.77	4.32	3.81	3.93
K ₂ O	1.42	1.33	1.34	1.36	1.44	1.47	1.15	2.82
P ₂ O ₅	0.19	0.20	0.17	0.17	0.17	0.19	0.19	0.7
LOI	-0.05	-0.06	-0.2	-0.03	0.38	-0.11	0.13	0.32
Total	99.36	100.2	99.09	98.63	97.95	99.49	98.44	98.35

ppm								
Se	15	16	13	10	6	14	20	18
Be	1	1	1	1	1	1	1	3
V	154	164	132	96	50	150	182	181
Cr	20	20	20	70	< 20	30	190	120
Co	16	17	13	12	7	16	21	19
Ni	20	21	24	35	7	25	97	48
Cu	38	35	30	25	17	37	28	85
Zn	67	60	58	57	58	62	58	70
Rb	16	14	18	13	21	17	12	26
Sr	687	667	584	790	647	670	720	1662
Y	15	13.1	12.6	8	8.9	13.9	11.1	28.2
Zr	110	99	110	95	110	113	85	219
Nb	2.8	3.2	2.8	3.1	2.7	3.4	2.3	6.6
Sb	< 0.2	0.3	< 0.2	< 0.2	< 0.2	0.2	< 0.2	0.2
Cs	0.4	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4
Ba	518	464	620	654	629	489	483	1253
La	12	10.8	12.3	12.8	10.5	11.7	11.8	43.7
Ce	27.7	24.6	25	26	23.4	26.5	25.3	108
Nd	14.7	13.4	13	12	10.9	14.4	14.4	58.9
Sm	3.08	3.11	2.94	2.21	2.25	3.41	2.94	10.9
Eu	0.99	0.96	0.92	0.73	0.69	1.01	0.94	2.75
Tb	0.45	0.47	0.44	0.28	0.29	0.46	0.39	1.17
Yb	1.56	1.58	1.45	0.92	1.08	1.6	1.14	2.4
Lu	0.25	0.26	0.23	0.15	0.18	0.26	0.18	0.39
Hf	2.9	2.6	2.9	2.3	2.6	3	2.3	5.8
Ta	0.23	0.13	0.21	0.19	0.23	0.17	0.15	0.33
Pb	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3	10	5
Th	1.66	1.4	1.47	1.48	1.59	1.62	1.32	3.9
U	0.68	0.6	0.56	0.56	0.6	0.63	0.52	1.29

Las rocas del Nevado 1, presentan un contenido de MgO de 7.4 %, bastante elevado con relación a las otras rocas del Nevado analizadas. De acuerdo con el diagrama de sílice-álcalis de (Le Bas et al., 1986), (Fig. 42b), las rocas del Nevado de Colima varían desde andesitas basálticas a andesitas ácidas (53.3 a 61.4 % de peso en Si₂O), igual que las rocas del Paleofuego (54.3 a 58.8 % de peso en Si₂O), con excepción de la roca M32 asociada al Paleofuego que clasifica como una traqui-andesita basáltica (Fig. 42b). En tanto, las rocas de los domos laterales son andesitas y dacitas con un contenido mayor de SiO₂ (59.1-63.2 % de peso en sílice). En el diagrama de K₂O vs SiO₂, las rocas analizadas, tanto del Nevado, como de los domos laterales y del Paleofuego corresponden a la serie calci-alcalina con un contenido de potasio intermedio, a excepción de la muestra M32 del Paleofuego (Fig. 41) que cae en el campo de la serie alcalina y se clasifica como una shoshonita (roca con alto contenido en potasio) (Fig. 42c).

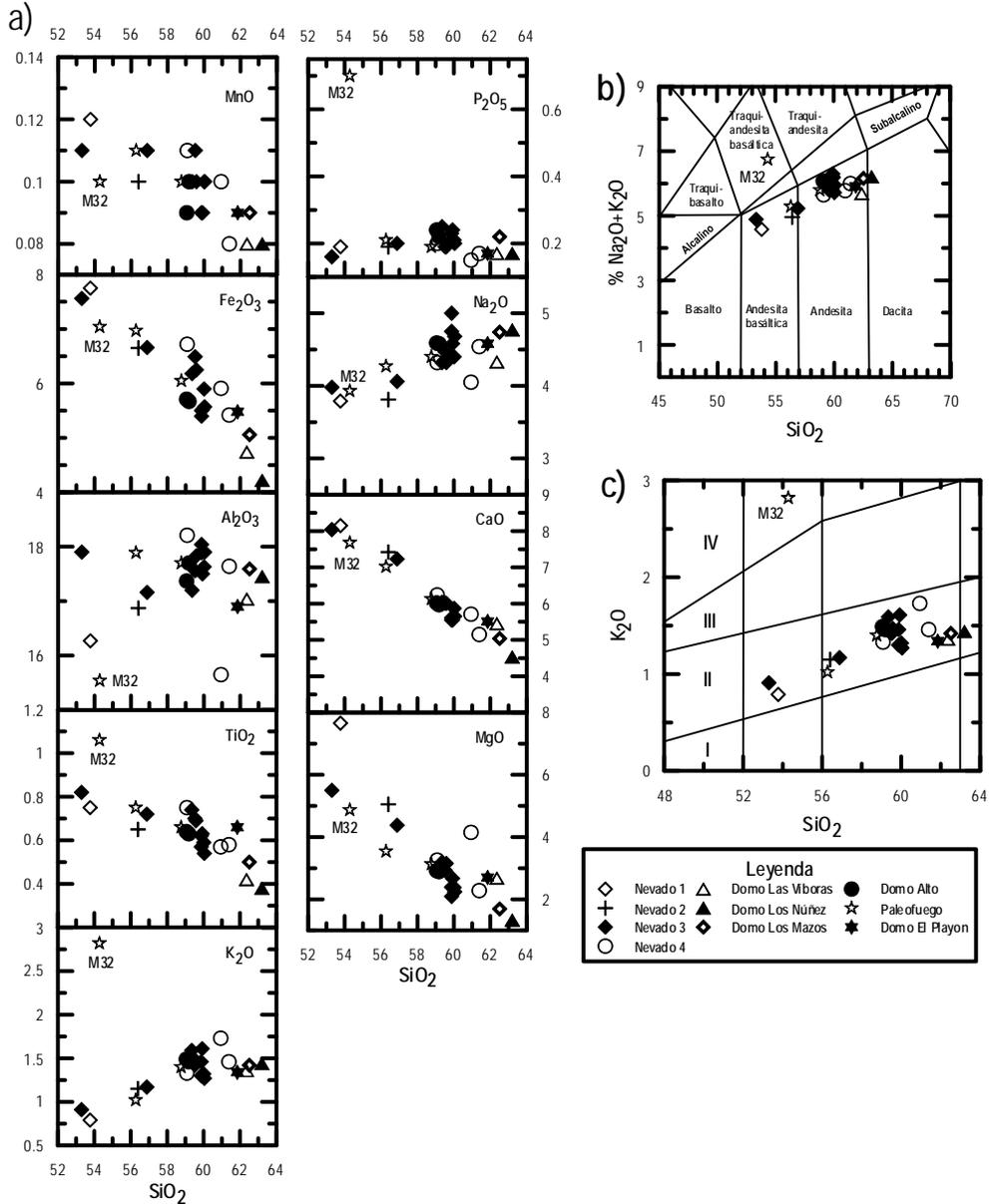


Figura 42. a) Diagramas binarios de elementos mayores de las muestras de roca analizadas de los flujos de lava del Volcán Nevado de Colima, domos laterales y Paleofuego, b) Clasificación química de las rocas del Nevado de Colima, domos laterales y del Paleofuego, de acuerdo al diagrama Silice-álcalis de (Le Bas et al., 1986), c) Diagrama de clasificación de SiO₂-K₂O de (Pecerillo y Taylor, 1976); las líneas a lo largo del K₂O limitan los campos de las series de las roca toleítica (I), calciocalina (II), calciocalina con alto contenido de K₂O (III) y shoshonítica (IV).

5.1. Geoquímica de elementos traza

A diferencia de los diagramas de elementos mayores, en los que, solamente el contenido de algunos de estos elementos es mayor en la roca M32, en los diagramas de variación química de los elementos traza, el contenido de estos elementos, es mayor en la roca M32 del Paleofuego, con respecto a las rocas analizadas del Nevado y domos laterales (Fig. 43). En

estos diagramas, la distribución de algunos elementos traza con respecto al contenido de SiO_2 , es menos definida y con mayor dispersión en algunos de ellos. Por ejemplo, el Zr presenta una correlación positiva con el SiO_2 bastante dispersa, con mayor contenido en algunas rocas del Nevado 3, disminuyendo en las rocas del Nevado 4 y en tres domos laterales, a excepción de la roca M32, en la cual su contenido es bastante elevado. El Rb muestra también una correlación positiva con el SiO_2 , aunque con una dispersión considerable. El Ba presenta una distribución positiva con el SiO_2 , más o menos definida con un ligero incremento en algunas rocas del Nevado 3. En tanto, el La y Ce muestran una distribución bimodal, con contenidos máximos en algunas rocas del Nevado 3 y Domo Alto, para volver a disminuir en las rocas del Nevado 4 y en los otros domos laterales (Fig. 40). En el caso del Sr y Y, muestran una distribución negativa con el SiO_2 con cierta dispersión, siendo esta mayor en las rocas de los domos laterales. La disminución del Sr, aunada al aumento de Rb con respecto del sílice, podría ser indicativa de la cristalización fraccionada de la plagioclasa (Castro-Govea, 2007).

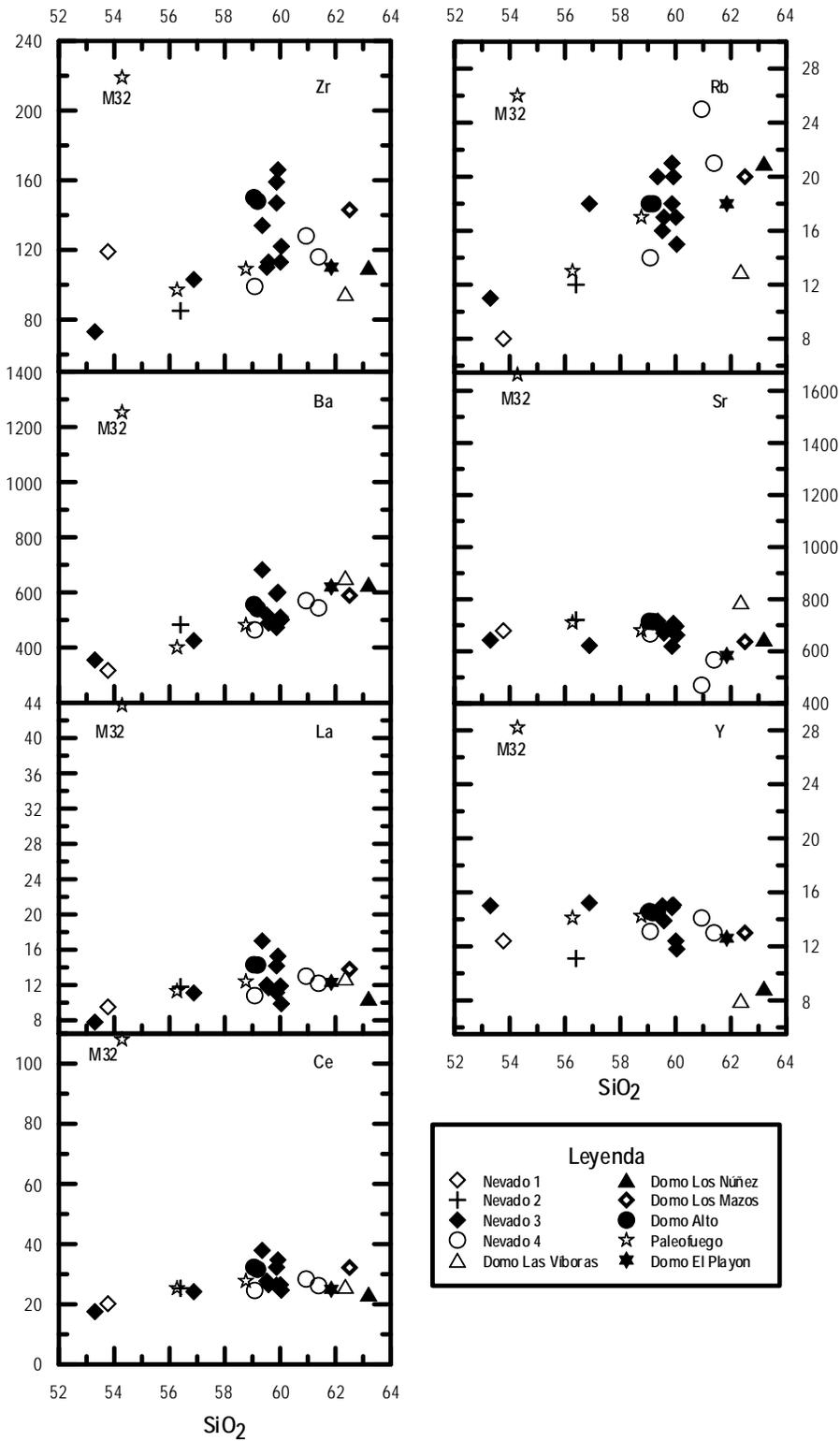


Figura 43. Diagramas de variación química de algunos elementos traza de las rocas analizadas del Nevado de Colima, domos laterales y el Paleofuego.

Tabla 8. Resumen del % SiO₂, MgO, Fe₂O₃ y su variación en las muestras de roca asociadas a las diferentes estructuras volcánicas del Nevado de Colima y domos laterales, analizadas químicamente. (Ver fig. 41 para ubicación de muestras).

Estructura volcánica	M.A.	% SiO ₂	Variación	% MgO	Variación	% Fe ₂ O ₃	Variación	% K ₂ O	Variación
DP	M26	61.85	61.85	2.7	2.7	5.48	5.48	1.34	1.34
PF	M32	54.28	54.28 a 58.76	4.87	3.13 a 4.87	7.04	6.05 a 7.04	2.86	1.02 a 2.86
	M19	56.27		3.54		6.97		1.02	
	M6	58.76		3.13		6.05		1.40	
DA	M4	59.05	59.05 a	2.92	2.86 a	5.71	5.67 a	1.49	1.46 a
	M2	59.18	59.18	2.86	2.92	5.67	5.71	1.46	1.49
DLM	M16	62.51	62.51	1.69	1.69	5.06	5.06	1.42	1.42
DLN	M28	63.2	63.2	1.33	1.33	4.22	4.22	1.44	1.44
DLV	M27	62.36	62.36	2.68	2.68	4.74	4.74	1.36	1.36
Nevado 4	M24	59.08	59.08 a 61.39	3.26	2.28 a 4.15	6.72	5.42 a 6.72	1.33	1.33 a 1.73
	M17	60.94		4.15		5.91		1.73	
	M13	61.39		2.28		5.42		1.46	
Nevado 3	M30	59.58	53.30 a 60.04	3.15	2.09 a 5.5	6.25	5.4 a 7.56	1.47	1.17 a 1.61
	M22	59.52		2.93		6.49		1.42	
	M21	59.35		3.19		6.18		1.59	
	M15	60.04		2.24		5.57		1.27	
	M14	60.01		2.38		5.9		1.32	
	M8	59.87		2.39		5.4		1.46	
	M7	59.92		2.67		5.52		1.61	
	M5	56.88		4.38		6.66		1.17	
	M3	59.87		2.09		5.5		1.3	
M1	53.30	5.5	7.56	0.91					
Nevado 2	M31	56.4	56.4	5.05	5.05	6.65	6.65	1.15	1.15
Nevado 1	M18	53.77	53.77	7.66	7.66	7.75	7.75	0.79	0.79

Abreviaciones: DLV = Domo Las Víboras, DLN = Domo Los Núñez, DLM = Domo Los Mazos, DA = Domo Alto, DP = Domo El Playón, M.A. = Muestra analizada.

Tabla 9. Resumen del % SiO₂, MgO, Fe₂O₃ y K₂O en rocas asociadas a diferentes estructuras volcánicas del Nevado de Colima, analizadas químicamente por otros autores.

Estructura volcánica	% SiO ₂	% MgO	% Fe ₂ O ₃	% K ₂ O	Autor
	59.4**	4.1**	5.4**	1.9**	Robin et al., (1991)
	59*	3.8*	3.88*	1.45*	
	52.4 – 57.20	4.4 – 7.35	3.26 – 4.48	0.90 – 1.2	
Nevado III	60.24 - 60.59	3.58 – 4.05	5.71 – 6.46	1.8 – 1.92	Calanchi et al., (1995)
	58.9 – 59.4	3.5 – 4.1	3.86 – 5.4	1.45 – 1.9	Robin et al., (1987)
Nevado II	59.78 – 64.39	2.43 – 3.45	5.41 – 6.39	1.25 – 1.69	Calanchi et al (1995)
Nevado IB	63.2	1.80	4.82	1.54	Robin et al., (1987)
Nevado IA	57.5 – 61.3	2 – 4.3	3.89 – 5.63	1.1 – 1.4	

*Lava representativa pre-última caldera del Nevado de Colima.

**Lava representativa post-última caldera del Nevado (Robin et al., 1991).

6. Discusión e interpretación

La información y evidencias de campo, obtenidas durante el desarrollo del presente estudio, aunadas a los análisis químicos, fechamientos radiométricos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C (este trabajo) (Tablas 3-4) y K-Ar de estudios previos (tabla 5), muestran que el Volcán Nevado de Colima, tuvo una historia eruptiva muy intensa y bastante compleja, dado que experimentó grandes eventos explosivos, algunos de éstos provocaron el colapso lateral del edificio dejando cráteres remanentes en su cima y depósitos de avalanchas de escombros distribuidos, tanto en el sector SE como en el sector SO del actual Nevado de Colima. A lo largo de su historia eruptiva, el Nevado de Colima experimentó el emplazamiento lateral de domos periféricos, de los cuales, algunos de ellos fueron afectados posteriormente por la Falla Tamazula. Con base en el análisis de esta información obtenida durante el presente estudio y la ya existente se presenta a continuación la interpretación de la historia eruptiva del Volcán Nevado de Colima y su evolución en el Complejo Volcánico de Colima (CVC).

6.1. Historia eruptiva del Volcán Nevado de Colima y su evolución en el CVC.

Con base en las edades de K-Ar reportadas por Allan (1986) del Volcán el Cántaro, se consideraba que la actividad de éste, había finalizado hace ~950 mil años A.P. y que el Domo Las Víboras, ubicado casi en la base del flanco NO del Volcán Nevado de Colima (DLV, Fig. 41) estaba asociado a la historia eruptiva del Cántaro. Sin embargo, el fechamiento de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de este trabajo (M27) de un flujo de lava del domo dio una edad de 713 ± 25 ka. Por lo tanto su emplazamiento ocurrió al final de la actividad eruptiva del Volcán el Cántaro. El Volcán Nevado de Colima inició su formación hace ~530 ka, en otras palabras, unos ~180 ka años después del emplazamiento del domo Las Víboras. Las nuevas edades del Volcán Nevado de Colima permitieron dividir su historia eruptiva en cinco fases de construcción definidas como Miembros Nevado (MN1 a MN5) que comprenden una edad que va de ~530 mil a 29 mil años A.P.

En las secciones esquemáticas de las figuras (45, 45a y 46) se muestran las diferentes fases de construcción y eventos de destrucción que experimentó el Nevado de Colima durante la evolución de su actividad eruptiva dentro del Complejo Volcánico de Colima, así como su relación con la Falla Tamazula, la cual se considera, que ha jugado un papel importante en la migración hacia el sur, de la actividad magmática y su posible influencia en la generación de avalanchas de escombros en el CVC.

Mooser (1961) fue el primero en observar la existencia de dos remanentes de cráteres (que denominó estructuras de caldera) en la cima del Volcán Nevado de Colima. Posteriormente, en un trabajo un poco más detallado Robin et al. (1987) presentaron un mapa geológico general y análisis químicos de roca total y algunos fechamientos de K-Ar de flujos de lava asociados. Con base en estas edades y la distribución de algunos depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas y depósitos de flujos de cenizas, estos autores, dividieron la evolución del Nevado en tres periodos que denominaron Nevado I, II y III (Fig.44 a). El periodo Nevado I, lo subdividieron en dos subperiodos (IA y IB). El subperiodo IA, lo definen como un periodo predominantemente extrusivo que representa la mayor parte del edificio primitivo del Nevado de Colima, el cual alcanzó una base de ~25 km de diámetro e inicio su actividad hace $\sim 530 \pm 100$ ka, finalizando con una gran erupción explosiva que generó considerables flujos de ceniza que se emplazaron sobre su flanco ONO, alcanzando distancias de 25 km a partir de la fuente. El evento destruyó gran parte del edificio volcánico formando una caldera de ~8 km de diámetro, definida como C1 (Robin et al., 1987). Según estos autores, durante el sub-periodo IB, la actividad del Nevado fue principalmente explosiva con la formación de domos en el área de la cima y sobre los flancos, los cuales durante su emplazamiento generaron abundantes flujos piroclásticos, finalizando hace ~200 mil a 300 mil años A.P. con la formación de la caldera C2 (Fig. 44a). Desafortunadamente, estos autores, no reportan las coordenadas con la ubicación exacta de las rocas que fecharon sobre el flanco NO del volcán. Tampoco mencionan si las muestras analizadas fueron tomadas de depósitos de lava superficiales, intermedios o basales, con respecto a la columna estratigráfica. Estos autores, analizaron químicamente cuatro muestras de roca de flujos de lavas del sector NO, que asocian al periodo Nevado IA, obteniendo contenidos variables de sílice (57.5-61.3 %), MgO (2-4.3 %) Fe_2O_3 (3.9-5.6 %) y K_2O (1.1-1.4 %) (tabla 7). De acuerdo con la posible posición estratigráfica de los flujos de lava analizados por dichos autores, se considera que éstos están asociados con la actividad eruptiva del MN2 (este trabajo) y no con el periodo Nevado IA. Además, las evidencias de campo muestran la existencia de gruesas secuencias volcanoclásticas formadas por depósitos de flujos de escombros, depósitos de flujos hiperconcentrados y depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y bloques intercalados, conformando la base de la columna estratigráfica del edificio MN1 (Fig. 7, este trabajo), lo cual indica, que el inicio de construcción del primitivo Nevado de Colima, estuvo marcado por erupciones explosivas y no únicamente efusivas con generación de flujos de lava

como es sugerido por (Robin et al., 1987). Algunos flujos de escombros durante su emplazamiento chocaron con las calizas basales del flanco E de Cerro Grande obstruyendo el cauce del Río Armería, generando lagos temporales, en los cuales se depositaron gruesas secuencias de sedimentos lacustres.

El flujo de lava asociado con el edificio MN1, en el sector SO, presenta una posición intermedia dentro de la columna estratigráfica (Fig. 7). Los análisis químicos de roca total de este flujo de lava (M18, Fig. 41) arrojaron un contenido de SiO₂ de 53.8 %, 7.7 % de MgO, 7.7 % de Fe₂O₃ y 0.8% de K₂O, Tabla 5. De acuerdo al diagrama sílice vs. álcalis de (Le Bas et al., 1986) el flujo de lava es una andesita basáltica. Para este mismo periodo, (Robin et al., 1987) reportaron andesitas porfídicas con plagioclasas, orto y clinopiroxenos con un contenido de SiO₂ que varía de (57-59 %) y andesitas menos porfídicas pero con mayor contenido de SiO₂ (61-62 %). Sin embargo, como ya se mencionó, estos autores no reportan la ubicación exacta de los flujos de lava analizados, que permita relacionarlos a dicho periodo. Con base en ello, y a evidencias de campo, se considera que los flujos de lava y depósitos de flujos piroclásticos analizados por estos autores, están asociados a periodos de construcción más recientes, y no con el periodo Nevado IA, o (MN1, Fig. 44 b, este trabajo). Ellos sugieren que el periodo Nevado IA, finalizó con una gran erupción explosiva que generó gruesos y extensos depósitos de flujos de ceniza que definieron informalmente como "*yellow ashes*", los cuales en las inmediaciones del poblado de Telcruz, sector O, presentan espesores que varían de 50 a 70 m. La erupción habría destruido gran parte de la cima del volcán dejando en su lugar una estructura de caldera de ~8 km de diámetro que definen como C1 (Fig. 44 a). De acuerdo con las evidencias de campo sobre la distribución y posición estratigráfica del depósito de ceniza "*yellow ashes*" de (Robin et al., 1987), se considera que se trata del mismo depósito de ceniza descrito en la loc. 101 (Fig. 25) a 25 km de la cima actual del Nevado de Colima, el cual fue datado por ¹⁴C en 45,175 ± 4355/-2810 años A.P.

Como ya se mencionó en el capítulo de descripción, en esta localidad, el depósito de ceniza es separado de otro depósito superior de ceniza de menor espesor, por un paleosuelo que fue fechado por ¹⁴C en 6,930 ± 180 años A.P. La edad del depósito inferior de flujos de ceniza y edades de ⁴⁰Ar/³⁹Ar, indican que el depósito de ceniza fue generado por una gran erupción explosiva durante la construcción del MN4 (este trabajo), y no por la erupción asociada con la estructura de caldera C1, final del periodo Nevado IA de (Robin et al., 1987). En cuanto, al

depósito de ceniza superior que lo sobreyace, se considera que éste puede estar asociado con el evento que generó la avalancha de 7 mil años, del Volcán de Colima (Cortés et al., 2010 b).



Figura 44. A) modelo digital de elevación del terreno de los volcanes de Colima que muestra los periodos de evolución del Nevado de Colima, definidos por Robin et. al., (1987) como: Nevado I, II, y III. B) modelo digital, que muestra las principales fases de construcción del Nevado, en las que se dividió su estratigrafía (este trabajo), definida como miembros Nevado de Colima 1-5 (MN1-MN5). Abreviaciones: NC, Nevado de Colima, PF, Paleofuego, VdC, Volcán de Colima, DLV, Domo Las Víboras, DLN, Domo Los Núñez, DLM, Domo Los Mazos, DA, Domo Alto, DP, Domo El Playón.

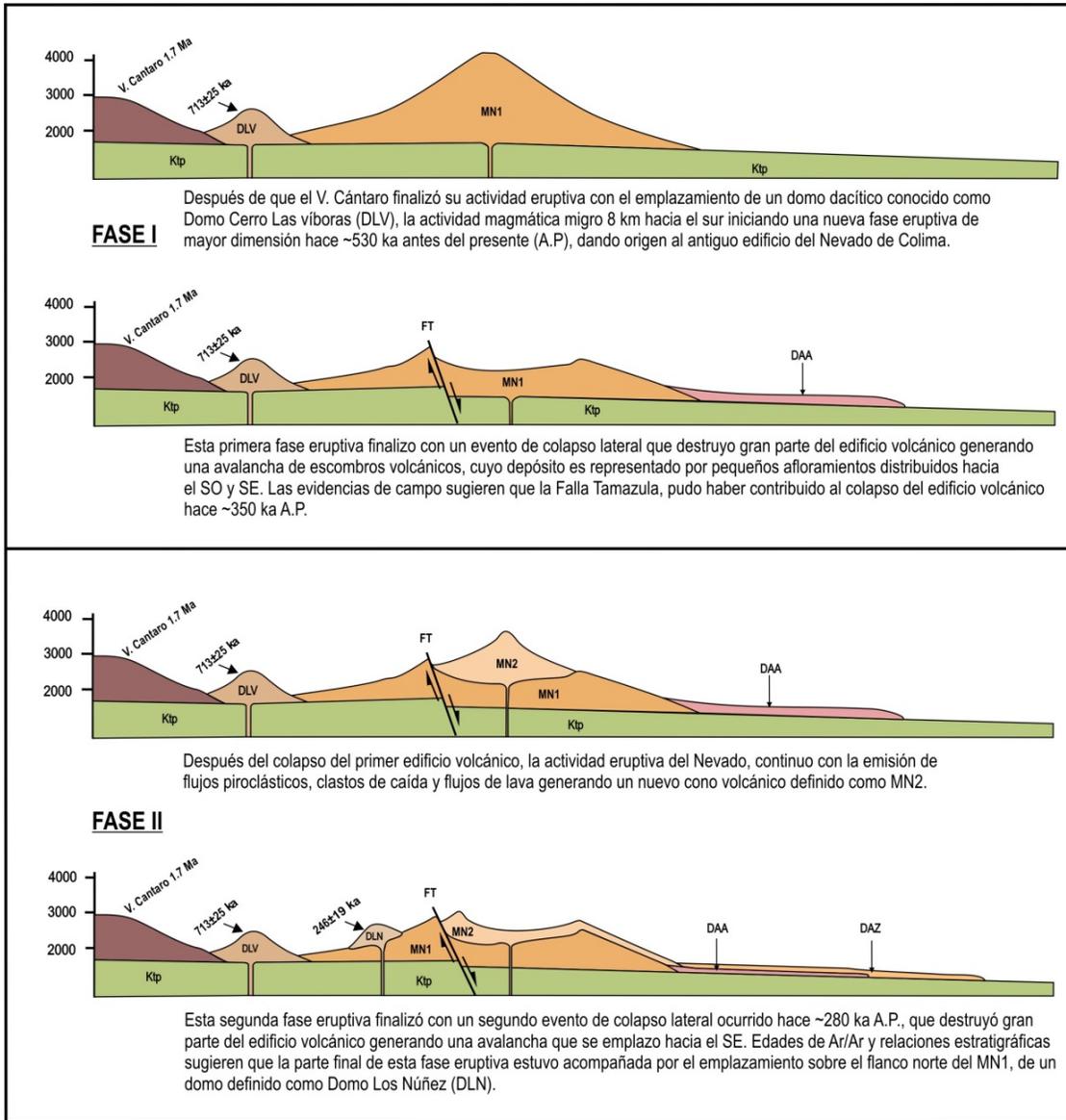


Figura 45. Secciones esquemáticas transversales N-S del Complejo Volcánico de Colima, que muestran las dos primeras fases de construcción del Nevado de Colima, con sus estructuras volcánicas asociadas. Abreviatura: Ktp. Calizas masivas del Cretácico de la Formación Tepames, DAA. Depósito de avalancha Atenquique, DAZ. Depósito de avalancha El Zapote, DLV. Domo Las Víboras, DLN. Domo Los Núñez, FT. Falla Tamazula.

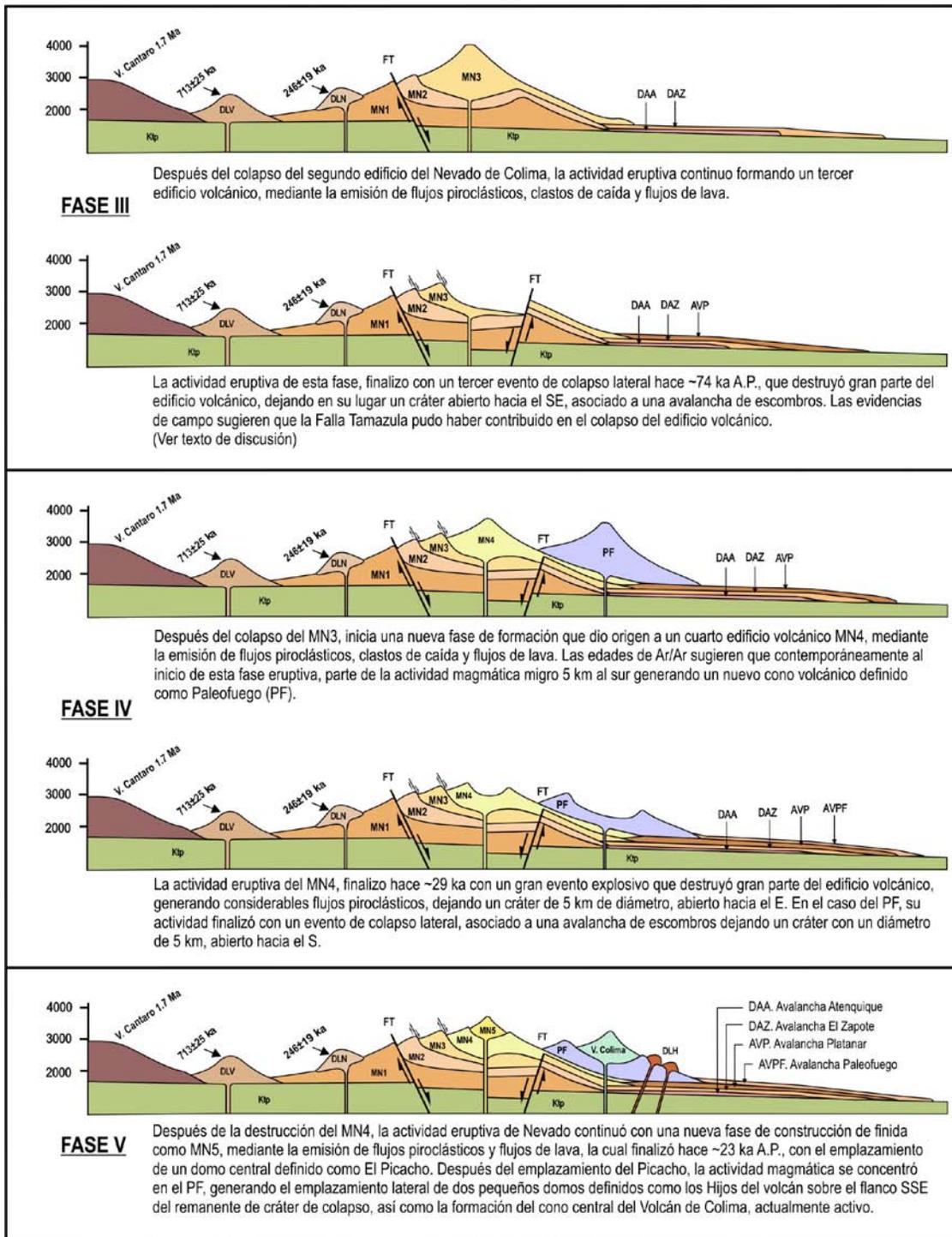


Figura 45a. Secciones esquemáticas transversales N-S del Complejo Volcánico de Colima, que muestran las fases de construcción del Nevado de Colima, con sus edificio volcánicos asociados y su relación con el Paleofuego y Volcán de Colima. Abreviatura: Ktp. Calizas masivas del Cretácico de la Formación Tepames, DAA. Depósito de avalancha Atenquique, DAZ. Depósito de avalancha El Zapote, DLV. Domo Las Víboras, DLN. Domo Los Núñez, FT. Falla Tamazula, PF. Paleofuego, DLH. Domos Los Hijos del Volcán.

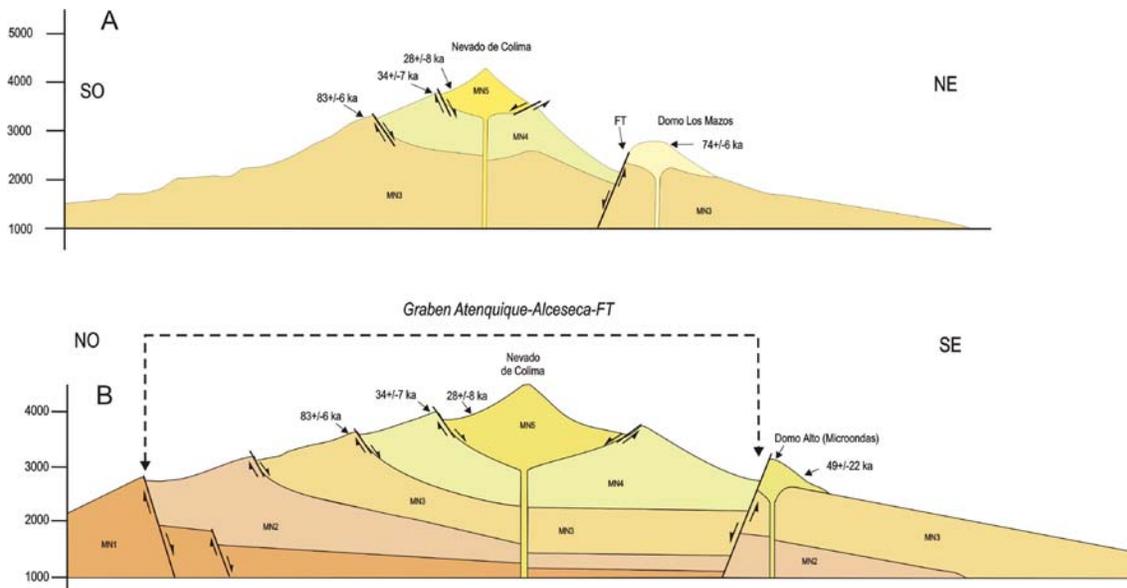


Figura 46. Secciones esquemáticas transversales SO-NE y NO-SE, en las que se puede apreciar como la FT afecta a domos laterales. Por ejemplo, en la sección A, el límite norte de la FT afecta al Domo Los Mazos y en la sección b, podemos ver como su límite sur afecta al Domo Alto (Microondas). La abreviatura en cada estructura de las secciones, es la misma del mapa geológico de la figura 5.

La existencia de escasos y pequeños afloramientos de depósitos de avalancha en el sector SO a lo largo de la Barranca Alceseca (locs. 68 a, 74 a, Fig. 9) y sector E, Barranca Atenquique (loc. 80, Fig. 13), sugiere que la actividad eruptiva del primitivo Nevado de Colima MN1, finalizó con un gran evento explosivo que destruyó gran parte de su edificio, generando un cráter de colapso lateral, cuyos remanentes se pueden observar en la (Figs. 3, 44 b). En los pequeños afloramientos de avalancha, no se encontraron depósitos de flujos piroclásticos que se pudieran asociar con el evento de colapso, sin embargo, la existencia de gruesas secuencias volcánicas de depósitos de flujos de escombros y flujos hiperconcentrados sobreyaciendo, sugiere que durante esta fase eruptiva del antiguo Nevado de Colima, existió un ambiente más húmedo que hoy en día, e incluso la existencia de glaciares en la cima del Nevado y veranos extremos, que favorecieron su formación.

El límite sur del remanente principal del MN1 (Fig. 44 b) está definido por la traza de la Falla Tamazula, la cual pudo haber jugado un papel importante en el colapso del primitivo edificio del Nevado de Colima.

6.1.2. Edificio Nevado de Colima MN2 (350-280 ka?)

Después de la destrucción del primer edificio del Nevado de Colima, inició una nueva fase de construcción hace ~350 mil años con la formación de un segundo edificio MN2 de menor tamaño (Figs. 5 y 44 b). Este segundo edificio del Nevado de Colima, pudo haber tenido una base aproximada de 11 km y una altura de 1.8 km con un volumen ~57 km³. Durante esta fase de construcción, el Nevado de Colima generó derrames de lava, flujos piroclásticos de bloques y ceniza, flujos de ceniza y pómez de caída. El espesor que presentan los depósitos de ceniza y pómez ~10 m, en el sector SO a 20 km de la fuente (Fig. 10, loc. 62), sugieren erupciones de gran magnitud y muy explosivas posiblemente de tipo pliniano. Igual que en la fase de construcción previa, la presencia de gruesas secuencias volcanoclásticas de depósitos de flujos de escombros y flujos hiperconcentrados, con espesores que superan los 200 m (Fig. 10 loc. 59), sugiere la existencia de un ambiente más húmedo que favoreció la erosión y removilización de gran parte de los depósitos de flujos piroclásticos y formación de estas gruesas secuencias volcanoclásticas. No existen paleosuelos intercalados entre las secuencias volcanoclásticas, que indiquen periodos de reposo, sin embargo, algunos depósitos de flujos de escombros, presentan un número considerable de moldes de troncos de árboles, lo cual sugiere que antes de su formación, existía una vegetación más o menos desarrollada, lo que significa, que si hubo un tiempo considerable de quietud entre un evento y otro. La ausencia de paleosuelos entre las secuencias volcanoclásticas posiblemente se deba, a que, estos fueron erosionados por los flujos de escombros durante su emplazamiento.

Un flujo de lava (Fig. 5, M31) generado casi al final de esta fase eruptiva MN2, fue datado por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 300 ± 95 ka (tabla1), por lo que, la edad exacta del inicio de construcción del segundo edificio del Nevado es mayor. Las evidencias de campo y relaciones estratigráficas, sugieren que esta segunda fase de construcción del Nevado, finalizó con una gran erupción que colapsó gran parte de edificio volcánico, dejando en su lugar un cráter remanente de forma irregular en herradura. De acuerdo a la distribución de sus depósitos de lavas remanentes este cráter pudo haber alcanzado un diámetro de ~7 km (Figs. 5 y 44b). El evento generó una avalancha de escombros que fue definida en el capítulo previo como avalancha El Zapote DAZ, la cual se emplazó hacia el sector SSE, a lo largo de las barrancas Beltrán y Zapote, en donde sus depósitos alcanzan los 80 m de espesor. En este sector, el depósito se encuentra subyaciendo a flujos de lava fechados por ⁴⁰Ar/³⁹Ar en 184 ± 10 ka. La presencia de grandes

bloques de sedimentos lacustres dentro del depósito de avalancha, sugiere que durante su emplazamiento la avalancha arrasó lagos temporales en donde ocurría sedimentación lacustre, asimilando grandes bloques de estos depósitos. La avalancha El Zapote claramente obstruyó el drenaje entorno al volcán, así como el cauce del Río Tuxpan-Naranjo, provocando la formación de lagos temporales en los que se depositaron gruesas secuencias de sedimentos lacustres, que actualmente se encuentran sobre su margen Oeste y en la desembocadura de la barranca Beltrán.

Esta avalancha ha sido correlacionada por otros autores con la última estructura de caldera del Nevado de Colima, ocurrida hace 18,500 años A.P., (Robin et al., 1987; Stoopes y Sheridan, 1992; Capra-Pedol, 2000; Capra y Macías, 2002).

Inicialmente, Stoopes y Sherdian (1992) concluyeron que la avalancha había viajado a lo largo de los valles de los ríos Tuxpan-Naranjo y Salado, hasta alcanzar la costa del Pacífico, a una distancia de 120 km de la cima del volcán, siendo una de las más grandes en el mundo. Posteriormente, Capra-Pedol (2000) y Capra y Macías (2002) concluyeron que la avalancha sólo viajó 25 km hasta el cauce del río Naranjo, en donde, el depósito formó una represa que bloqueó el drenaje dando lugar a la formación de un lago temporal. Pocos días después, la represa cedió originando un flujo de escombros, que viajó a lo largo de los ríos Tuxpan-Naranjo y Salado hasta el Océano Pacífico. Sin embargo, las evidencias de campo y las relaciones estratigráficas, así como las edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, nos permiten concluir que la avalancha fue generada por el colapso del segundo edificio del Nevado MN2 (Fig. 44b) y no por el colapso del Nevado II de (Robin et al. 1987), (Fig. 44a). La extensión del depósito es igual a la reportada por (Stoopes y Sheridan, 1992; Capra-Pedol, 2000; Capra y Macías, 2002), aunque la edad no corresponde con la reportada anteriormente por estos autores, por lo que es necesario aclarar.

La edad de 18,500 años A.P. obtenida por Stoopes y Sheridan (1992) asignada al depósito de avalancha, fue obtenida en un depósito distribuido al S del poblado de Cuauhtémoc y no en el sector SE, en donde el depósito de avalancha del Nevado de Colima está expuesto antes de haberse emplazado a lo largo del valle del Río Tuxpan-Naranjo. Con base en el trabajo de campo realizado por Komorowski et al. (1997) y a las nuevas evidencias de campo, aunado a nuevos fechamientos de madera carbonizada dentro del mismo depósito en localidades diferentes, al SSO del Volcán de Colima, Cortés et al. (2010) confirmaron la edad de 18,500 años A.P., ya reportada. Además, el análisis sobre la distribución del depósito, y la existencia

única de bloques de escoria con flogopita en el depósito, encontrados en las diferentes localidades verificadas, nos permite concluir, que esta avalancha está asociada con la actividad eruptiva del volcán Paleofuego, y no con la formación de la última caldera del Nevado de Colima como ha sido inicialmente reportado por los autores arriba mencionados. Adicionalmente, como ya se mencionó con anterioridad, las edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en lavas del Nevado, sugieren que el último cráter del Nevado de Colima fue generado por un evento explosivo ocurrido hace ~29 mil años, por lo que, el evento de 18,500 años no pudo haberse originado en dicho volcán.

6.1.3. Edificio Nevado de Colima MN3 (280 - <74 ka?).

Después de la destrucción del segundo edificio del Nevado de Colima MN3 hace ~280 mil años, inició una nueva fase de construcción generando un tercer edificio MN3, con el emplazamiento de flujos de lava seguido de actividad más explosiva que generó flujos piroclásticos y caída de pómez. Este nuevo edificio tuvo una base aproximada de 15 km con una altura de ~ 2 km, y un volumen de ~123 km³. Esta fase de construcción del MN3 estuvo acompañada por el emplazamiento lateral del domo Los Núñez (DLN) hace ~246 mil años sobre el flanco N del segundo edificio MN2. La re-movilización secundaria de los depósitos de flujos piroclásticos del MN3, generó en el sector SE, una serie de secuencias volcanoclásticas que definen grandes abanicos de superficie plana y pendiente suave con espesores >200 m, que constituyen parte de la Formación Atenquique. A lo largo del valle del Río Tuxpan-Naranjo, las secuencias volcanoclásticas definen una serie de terrazas con paredes que superan los 200 m de altura. Su existencia sugiere que durante esta fase de construcción, también existió un ambiente más húmedo que en la actualidad que favoreció su formación. En este mismo sector SE, los flujos de lava generados durante esta fase se encuentran expuestos a 16 km de la fuente y sobreyacen al depósito de avalancha El Zapote, arriba mencionado. La edad más antigua obtenida de uno de estos flujos de lava es de 184 ± 10 ka, y la más reciente es de 76 ± 28 ka. Estas edades radiométricas y las relaciones estratigráficas sugieren que las últimas etapas de construcción del edificio MN3, estuvieron acompañadas por el emplazamiento de un domo lateral sobre el flanco NE, definido de manera informal como Domo Los Mazos hace 74 ± 6 ka. En este mismo sector NE, Allan (1986), reportó 2 edades de K-Ar, de 290 ± 80 y 140 ± 40 ka, obtenidas de flujos de lava asociados con el MN3 (LvNE, fig. 5). Sin embargo, estas edades difieren considerablemente con dos edades obtenidas (este trabajo) con el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de flujos de

lava que formaron parte del cráter asociado al edificio MN3, en su límite norte. La más antigua de ellas, es de 106 ± 8 ka (Tabla 3, loc. 89) y la más joven de 61 ± 8 ka, obtenida en un flujo de lava expuesto en la parte superior del límite norte del cráter del MN3 (loc. 95) (Fig. 6). Sin embargo, lo reciente de esta última edad, permite considerar que el flujo de lava del cual se obtuvo la muestra, podría estar asociado con la actividad del MN4. Como se puede ver, la diferencia que existe entre las edades de Allan (1986) y éste trabajo, es de varias decenas de miles de años, pero como no se cuenta con la ubicación exacta de los flujos de lava datados por dicho autor, no se puede decir que se trata de los mismos flujos de lava, y que la diferencia de edades podría deberse al método de fechamiento aplicado. Lo más probable es que se trata de flujos de lava diferentes. La actividad eruptiva de esta fase de formación MN3, finalizó con un gran evento que provocó el colapso de una gran parte del edificio volcánico, formando un cráter de forma irregular de (~6.5 km de diámetro), abierto hacia el SE, asociado a una avalancha de escombros, cuyo depósito se encuentra aflorando en las partes altas de la Barranca El Platanar, locs. (8 y 9) y Barranca El Limón, loc. 13 (Fig. 22). El área expuesta es bastante restringida debido a que el depósito se encuentra subyaciendo a gruesas secuencias volcánicas y depósitos de flujos piroclásticos más recientes. La ausencia de depósitos de flujos piroclásticos cubriendo directamente al depósito de avalancha que se puedan asociar con el evento, posiblemente se debe a que estos fueron erosionados durante el emplazamiento de los flujos hiperconcentrados y flujos de escombros que lo sobreyacen. El depósito de avalancha se caracteriza por presentar una granulometría fina de pequeños clastos de andesita soportados por una matriz abundante de arena fina a gruesa, bastante deleznable debido a una fuerte alteración hidrotermal (Fig. 22, locs.8 y 9), la cual pudo haber debilitado al edificio volcánico favoreciendo su colapso (Zimelman et al., 2004). Sin embargo, el análisis por difracción de rayos X, de dos muestras del depósito de avalancha en su fase de matriz, locs. (8 y 9), realizado por *T. Puig*, en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Departamento de Geoquímica del Instituto de Geología, no arrojaron la presencia de minerales de arcilla, únicamente plagioclasa de composición intermedia (Albita y Anortita). Otro factor que pudo haber contribuido al colapso del edificio volcánico, es el hecho, de que los flujos de lava asociados con este edificio MN3, expuestos en el sector SE, se encuentran afectados por la traza de la Falla Tamazula, por lo que, existe la posibilidad de que su colapso pudo haber sido influenciado por actividad sismo-tectónica (Siebe et al., 1993).

6.1.4. Edificio Nevado de Colima MN4 (>73 - 29 ka)

Tiempo después del colapso del MN3, la actividad eruptiva del Nevado, inicia una nueva fase de formación, con la construcción de un nuevo edificio volcánico de menor dimensión, definido como MN4 (Fig. 5). El edificio pudo haber tenido una base de 7 km y una altura aproximada de 1.3 km, y un volumen de $\sim 16 \text{ km}^3$. La construcción de MN4 comenzó nuevamente con la emisión de flujos de lava, flujos piroclásticos de bloques y ceniza y caídas de piroclastos. Los flujos de lava en el sector E, alcanzan distancias de 9 km a partir de su fuente de origen. Uno de estos flujos de lava, expuesto sobre el flanco SE (parte media) (M24, Fig. 5) fue datado por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en $73 \pm 16 \text{ ka}$, lo cual sugiere, que la edad de inicio de esta fase de construcción MN4 es mayor. Durante esta fase de actividad, el Nevado de Colima experimentó erupciones muy explosivas de gran magnitud que generaron gruesos depósitos de flujos piroclásticos expuestos a 13 km al E (Fig. 27, loc. 54) y a 25 km al SO de la cima del actual Nevado de Colima (Fig. 28, loc. 101), los cuales, inicialmente fueron reportados por Robin et al. (1987) en las inmediaciones del poblado Telcruz, que definen como *"yellow ashes"*, y que asocian con la formación de la caldera C1 del Nevado I (MN1 de este trabajo). Sin embargo, edades de radiocarbono, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y relaciones estratigráficas, nos permiten asociarlos con las etapas finales de formación del edificio MN4. Estos mismos autores, sugieren que durante la parte final de actividad del edificio que definen como Nevado II (MN4 este trabajo), estuvo acompañada por el emplazamiento lateral sobre su flanco sur, de un nuevo cono volcánico definido como Paleofuego. Sin embargo, las edades radiométricas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenidas durante el presente trabajo, en flujos de lava del Paleofuego, sugieren que el emplazamiento de este nuevo cono volcánico, pudo haber iniciado contemporáneamente con la parte final de la fase de construcción del edificio MN3. La fase de construcción del MN4, estuvo acompañada por el emplazamiento de dos domo laterales, el primero de ellos sobre el flanco NE, hace $\sim 74 \pm 6 \text{ ka}$, definido como Domo Los Mazos (este trabajo). El segundo de ellos, sobre el flanco SE, definido como Domo Alto hace $\sim 49 \pm 12 \text{ ka}$ (Tabla 3), (M2, Fig. 5). Los dos domos fueron afectados por la Falla Tamazula (Figs. 21 y 24). Es posible que la reactivación de forma sectorial de esta falla haya interactuado con el evento eruptivo que finalizó con la fase de construcción del MN4.

De acuerdo con edades radiométricas de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, la actividad eruptiva de la fase de construcción del MN4, finalizó hace aproximadamente 29 mil años A.P., con un evento explosivo que destruyó gran parte de la cima del edificio volcánico dejando en su lugar un cráter de 5 km

de diámetro (IV este trabajo), abierto hacia el E (Figs. 3, 5 y 44b). El evento generó considerables flujos piroclásticos de bloques y ceniza, cuyos depósitos afloran al E a 18 km de la fuente con espesores >20 m (Cortés et al., 2005, 2010). Como ya se mencionó en los capítulos previos, Robin et al. (1987) reportaron a este cráter como caldera C3 generada por un evento de colapso lateral tipo Monte Santa Elena, del edificio volcánico que definen como Nevado II, asociada con la una avalancha de escombros ocurrida hace 18,500 años A.P., y que posteriormente fue estudiada por (Stoopes y Sheridan, 1992; Capra-Pedol, 2000; Capra y Macías, 2002). Sin embargo, durante el presente estudio no se encontraron en el sector E, evidencias sobre la existencia de un depósito de avalancha que pudiera estar asociada con el colapso del edificio MN4, a excepción de un pequeño afloramiento de depósito de avalancha expuesto a 2 km al E del poblado de Agosto, sobre el margen O del Río Tuxpan-Naranjo y a 3 km al sur de la Planta Papelera de Atenquique. La posición estratigráfica y mínima distribución que presenta el depósito de avalancha, sugieren que este, tiene una edad mayor a la del evento que finalizó con la fase de construcción del MN4.

Como ya se mencionó, Robin et al., (1987) reportaron dos edades de K-Ar obtenidas de flujos de lava asociados con el edificio del Nevado II (MN4 este trabajo). La primera de ellas de 200,000 años AP., de un flujo de lava que forma parte de la pared interna de la caldera C3 (último remanente de cráter del MN4 este trabajo). La segunda de 150 000 años AP (Tabla 5), obtenida de un flujo de lava que desbordó el límite superior de la caldera C3 (cráter del MN3 este trabajo) sobre su flanco SO. Sin embargo, durante el presente estudio, se obtuvieron dos edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ más recientes para el cráter IV (Fig.44b), que las reportadas por Robin et al., (1987). La primera de ellas de 34 ± 7 ka, se obtuvo de un flujo de lava de la pared interna del cráter IV en su límite SO (M11, Fig. 5) y la otra de 30 ± 12 ka (Tabla 3), se obtuvo de un flujo de lava expuesto en la cima del límite SO del cráter (M13, Fig. 5). Ambas edades son congruentes con la relación estratigráfica que presentan los flujos de lava analizados. La diferencia que existe entre las edades de Robin et al. (1987) y este trabajo, que es de varias decenas de miles de años, la cual podría ser debido al método de fechamiento aplicado.

6.1.5. Edificio Nevado de Colima MN5 (~28 ka)

Después de la destrucción del edificio MN4, la actividad eruptiva del Nevado continuo con una nueva fase de construcción, mediante el emplazamiento de un domo central denominado El

Picacho (con una edad ~ 28 ka A.P), el cual representa la cima actual del Nevado. El domo tiene una base de ~3.8 km con una altura de 1.1 km, y un volumen estimado de ~ 4.5 km³. Esta nueva fase de construcción generó flujos de lava y considerables flujos piroclásticos de bloques y cenizas que se emplazaron hacia el E, a lo largo de la barranca Atenquique, en donde su removilización posterior originó gruesas secuencias volcaniclásticas, que formaron una serie de terrazas de paredes verticales >200 m de altura, que constituyen la parte más reciente de la Formación Atenquique. Dentro de estas secuencias volcaniclásticas, existen horizontes de paleosuelos intercalados, que muestran los efectos de una fuerte erosión. Su existencia sugiere que durante esta última fase de construcción del Nevado MN5, existieron periodos de inactividad volcánica que favoreció su desarrollo, seguidos de cortos periodos de erosión. Edades de C14 obtenidas en algunos de depósitos de flujos piroclásticos y horizontes de suelo, sugieren que el domo El Picacho pudo haber finalizado su actividad eruptiva hace ~ 23 mil años A.P. Además, indican que las secuencias volcaniclásticas fueron generadas entre 33.3 ka y 19 ka, es decir, durante un lapso de 14,000 años. Esto indica que la mayor parte de las secuencias volcaniclásticas más jóvenes de la Formación Atenquique, en la zona del poblado del mismo nombre, se generaron durante la evolución del Domo El Picacho.

Las lavas del flanco S-SO del Domo El Picacho, presentan huellas de la última máxima glaciación ocurrida hace 18000 mil años (Lorenzo, 1961; Heine, 1975; 1988; Caballero et al., 2010). Este hecho, indica que en los volcanes de Colima (Nevado y Paleofuego) se tuvo la existencia de glaciares en sus cumbres durante el Pleistoceno tardío, con ambientes más húmedos que hoy en día, que favoreció la re-movilización de la mayor parte de los depósitos de flujos piroclásticos, generando las gruesas secuencias volcaniclásticas que constituyen la Formación Atenquique. Este hecho, aunado a edades de ¹⁴C, permite concluir que los depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez de color amarillo, con edades de <19,000 años A.P., ampliamente distribuidos en el sector ESE del Nevado de Colima, sobre estas secuencias volcaniclásticas, fueron generados por la actividad eruptiva del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima), y no por el Nevado de Colima, como lo habían considerado Cortés et al. (2005; 2010).

7. Factores de inestabilidad del Volcán Nevado de Colima.

Existen varios factores que contribuyen a la inestabilidad y colapso de un edificio volcánico. Algunos están relacionados directamente con la actividad magmática del mismo volcán (Gorshkov, 1959; Swanson et al., 1976; Voight et al. 1983 and Glicken, 1996), una excesiva inclinación de sus flancos (Voight et al. 1983; Begét and Kienle, 1992), un alto grado de alteración hidrotermal (Voight et al. 1983; López and William, 1993; Carrasco-Núñez et al., 1993; Day, 1996; van Wyk de Vries and Francis 1997; Reid et al., 2001) y actividad sísmica local (Francis and Self, 1987; Carracedo, 1994).

Estudios realizados a finales de los ochenta y recientes, en varios estratovolcanes del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), sugieren que la tectónica regional ha influido en la evolución y estilo de su actividad eruptiva. Por ejemplo, el Volcán Jocotitlán (3950 msnm) localizado en la parte central del CVTM, presenta en su flanco NE una estructura de colapso gravitacional asociada a una avalancha de escombros (Siebe et al., 1992). Según estos autores, el colapso del edificio, estuvo controlado por un régimen de esfuerzos tectónicos de extensión regional, debido a que el volcán se ubica a solo 10 km al S de las fallas activas del graben de Acambay de dirección E-O. Otro caso es el Volcán Nevado de Toluca, un estratovolcán andesítico-dacítico complejo, del Plioceno-tardío-Holoceno, ubicado en el sector Centro-Este del CVTM, en la intersección de tres sistemas de fallas regionales de dirección NNE-SSO, NE-SO, E-O (Demant, 1978; Suter, et al., 1992; García Palomo, et al., 1996; 2002, 2006; Norini et al., 2004). Estos últimos autores, consideran que la cinemática transtensiva lateral derecha que se relaciona con la reactivación del Sistema NNE-SSO durante el Pleistoceno-temprano, favoreció la actividad magmática del volcán y el emplazamiento de domos andesíticos.

En el caso del Complejo Volcánico de Colima (CVC), que tiene una orientación general N-S, se ubica en la intersección de dos estructuras regionales; el Graben de Colima de dirección N-S y un sistema de fallas con dirección NE-SO, definido como Falla Tamazula (FT) (Garduño et al., 1998) (Fig. 2). En el sector oeste del CVC, el límite norte de la FT está definido por la Barranca Alceseca que intersecta al Volcán Nevado de Colima, en tanto que, su límite sur está definido por la Barranca La Lumbre, que intersecta al Volcán de Colima, formando así un pequeño graben definido como graben Atenquique-Alceseca (Garduño et al., 1998) (Fig. 2). El límite norte de la FT en su parte central, se encuentra interrumpido por dos remanentes de cráter definidos como MN2 y MN3 (Fig.5), generados por eventos de colapso lateral, asociados a

depósitos de avalancha de escombros. De igual forma, el límite sur de la falla en su parte central está interrumpido por el flanco norte del cráter de colapso lateral del Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima).

Loera et al. (2006), en su estudio de anomalías magnéticas realizado en el CVC, reportaron la existencia de tres fallas geológicas, que consideran de carácter regional, que definen como; 1) Falla Montitlán, con dirección N-S, que intersecta tanto al Volcán Nevado de Colima como al Volcán de Colima, la cual ha jugado un papel importante en la migración hacia el sur del vulcanismo del CVC, 2) Falla La Escondida con dirección O-E ubicada a ~ 12 km al sur del Volcán de Colima, y 3) Falla La Lumbre con dirección SO-NE de carácter regional, que coincide con el límite sur de la FT. Todas estas estructuras en la zona del CVC, forman un sistema de fallas conjugadas, de las cuales, algunas de ellas han funcionado como vía de ascenso del magma favoreciendo la migración de la actividad magmática hacia el sur y el emplazamiento de domos laterales sobre los flancos NE y SE del Nevado de Colima. Después de algunas decenas de miles de años, la reactivación sectorial de estas estructuras colapsó parte de dichos domos. Por ejemplo, el Domo Los Mazos emplazado sobre el flanco NE del Nevado de Colima, del cual se obtuvo una edad por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de 74 ± 6 ka, fue afectado por una falla normal de dirección NO-SE (Figs. 21 a y 46a). De igual forma, el Domo Alto emplazado sobre el flanco SE del Nevado, fechado en 49 ± 22 ka, fue afectado por la FT (Figs. 24 y 46b). El análisis de estas edades, junto con las edades del penúltimo edificio del Nevado MN4 (M11= 34 ± 7 ka, M13= 30 ± 12 ka) y Domo El Picacho (M10= 28 ± 8 ka) así como las obtenidas en lavas del Paleofuego (M19= 97 ± 13 ka, M32= 69 ± 8 ka, M6= 44 ± 15 ka y M12= 22 ± 6 ka), Tabla 3 (ver Fig. 41 para ubicación de muestras analizadas), sugiere que en el Pleistoceno tardío, contemporáneamente con las últimas fases de construcción del Nevado de Colima, el Paleofuego estaba ya en construcción, y se daba el emplazamiento de los domos mencionados.

Sin que sea una conclusión definitiva, este proceso podría repetirse en el futuro, es decir, que de forma contemporánea a la actividad eruptiva del actual Volcán de Colima, se presente actividad volcánica en la zona del Nevado de Colima, debido a la reactivación de una de estas falla conjugadas.

Lo anterior soporta la hipótesis de Garduño et al. (1998) quienes consideraron que la FT, ha jugado un papel importante en el proceso de migración del vulcanismo hacia el sur y en la generación de avalanchas gravitacionales en el CVC.

Norini et al. (2010) consideran que la FT no existe, ya que las estructuras E-O que ellos reportan y que podrían estar asociadas con la falla, no continúan fuera del CVC. Ellos consideran que son estructuras locales superficiales, generadas por la expansión gravitacional hacia el sur de todo el CVC debido a su propio peso sobre el relleno sedimentario del graben de Colima, y no por una tectónica regional asociada con la FT. Esto implicaría que los cráteres de colapso gravitacional lateral que presenta el Nevado de Colima, tuvieran su eje de abertura hacia el sur, lo cual se cumple solamente en el primero de éstos. El segundo y tercero, presentan su eje de abertura hacia el SE y el último de ellos hacia el NE.

Sin embargo, Domínguez (1997, comunicación personal) mediante la instalación de una estación sísmica por un periodo de 4 meses sobre el límite norte de la FT, en las inmediaciones de la ciudad de Tamazula, detectó eventos locales que asocia a dicha falla, los cuales confirman su existencia y actividad de forma regional, como ha sido sugerido por (Garduño et al., 1998).

8. Conclusiones.

- El VNC inicio su formación al sur del volcán Cántaro hace $\sim 530 \pm 100$ ka A.P y se mantuvo activo hasta hace $\sim 23,000$ años A.P., con el emplazamiento del domo El Picacho.
- Sus rocas presentan un carácter calcalcalino intermedio con composiciones que varían de andesitas basálticas a andesitas ácidas
- Durante su historia eruptiva se formaron cuatro edificios volcánicos que fueron destruidos por cuatro colapsos ocurridos hace ~ 350 ka, ~ 280 ka, ~ 74 ka y $\sim 29,000$ años A.P, los tres primeros generaron avalanchas de escombros y la última un flujo de bloques y cenizas.
- Durante su emplazamiento las avalanchas obstruyeron el cauce de los ríos Armería en el sector Oeste y Tuxpan-Naranja en el sector Este, generando lagos temporales que favorecieron el depósito de gruesas secuencias de sedimentos lacustres.
- La existencia de depósitos espesos de flujos piroclásticos de ceniza y pómez, sugiere que los tres eventos de colapso que generaron avalanchas de escombros tuvieron una componente magmática asociada.
- Durante su evolución el VNC estuvo acompañado por el emplazamiento lateral de pequeños domos periféricos sobre sus flancos con edades entre 246 y 49 ka.

- Algunos de estos domos y edificios del Nevado han sido afectados por la Falla Tamazula, lo que indica que esta falla ha estado activa durante diferentes periodos.
- Las nuevas edades de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ reportadas en este trabajo muestran que el tercer edificio del Nevado de Colima y el volcán Paleofuego (antiguo edificio del Volcán de Colima) estuvieron activos de forma contemporánea, lo que provee nuevas evidencias de la actividad volcánica del CVC.

Bibliografía

- Allan, J.F., Nelson, S.A., Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., Wopat, M., Wallace, J.P., 1991. Pliocene-recent rifting in SW Mexico and associated volcanism: an exotic terrain in the making. *AAPG Mem.* 47, 425–445.
- Allan, J.F., y Carmichael, I.S.E., 1984, Lamprophyric lavas in the Colima Graben, SW Mexico: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 88, p. 203–216.
- Allan, J.F., 1986, Geology of the northern Colima and Zacoalco Grabens, southwest Mexico–Late Cenozoic rifting in the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 97, p. 473–485.
- Allan, J.F., 1981. The Colima Graben, SW Mexico, *EOS Transactions American Geophysical Union, Abstracts*, 62-45: 1034.
- Arreola, J.M., 1903. The recent eruptions of Colima. *Journal of Geology* 11: 749-763.
- Aston, F. W. 1921. The mass spectra of the alkali metals. *Phil. Mag.*, ser. 6, 42, 436-441.
- Bailey, D.K., 1974. Continental rifting and alkaline magmatism, in Sorenson, H., ed., *The alkaline rocks* New York, J. Wiley and Sons., p. 148-159.
- Bandy, W., Mortera-Gutierrez, C., Urrutia-Fucugauchi, J., and Hilde, T. W. C., 1995. The subducted Rivera-Cocos plate boundary: Where is it, what is it, and what is its relationship to the Colima rift?, *Geophys. Res. Lett.*, V. 22, p. 3075-3078.
- Begét J E, Kienle J., 1992. Cyclic formation of debris avalanches at Mount St. Augustine volcano. *Nature*, 356: 701-704
- Blatter, D.L., Carmichael, I.S.E., Deino, A.L. y Renne, P.R., 2001. Neogene volcanism at the front of the Mexican volcanic belt: basaltic andesites to dacites, with contemporaneous shoshonites and high TiO₂ lava. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 113, 1324-1342.
- Bourgois, J., Renard, V., Aubouin, J, Bandy, W., Barrier, E., Calmus, T., Carfantan, J-C., Guerrero, J., Mamerickx, J., Mercier de Lepinay, B., Michaud, F., Sosson, M. (1988a). La jonction orientale de la dorsale Est-Pacifique avec la zone de fracture de Rivera au large du Mexique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, V. 307, serie 11, 617-66.
- Bourgois, J., Renard, V., Aubouin, J, Bandy, W., Barrier, E., Calmus, T., Carfantan, J-C., Guerrero, J., Mamerickx, J., Mercier de Lepinay, B., Michaud, F., Sosson, M. (1988b). Fragmentation en cours du bord Ouest du continent Nord Américain: les frontières sous-marines du bloc Jalisco (Mexique). *C. R. Acad. Soc. Paris*, V. 307, série 1. 1121-1130.
- Bourgois, J., Michaud, F. 1991. Active fragmentation of the North American plate at the Mexican triple junction area off Manzanillo, *Geo-Marine Letters* 11:59-65.
- Caballero, M., Lozano-García, S., Vázquez-Selem, L., Ortega, B., 2010. Evidencias de cambios climático y ambiental en registros glaciales y en cuencas lacustres del centro de México durante el último máximo glacial. *Bol. Soc. Geo, Mex.*
- Campa, M.F., y Ramírez, J., 1979, La evolución geológica y la metalogénesis del noroccidente de Guerrero: *Universidad Autónoma de Guerrero, Serie Técnico-Científica*, No. 1, 102 p.
- Capra, L., 2000. Colapsos de edificios volcánicos: Transformación de avalanchas de escombros en flujos de escombros cohesivos. Los casos del Monte Santa Elena (EEUU), Nevado de Toluca y Nevado de Colima (México). Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México. 177p.
- Capra, L., and Macías, J.L., 2002. The cohesive Naranjo debris-flow deposit (10 km³): A dam breakout flow derived from the Pleistocene debris avalanche deposit of Nevado de Colima volcano (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 117, p. 213-235.

- Carmichael I.S.E., Frey, H.M., Lange, R.A., and Hall, C.M, 2006, The Pleistocene cinder cones surrounding Volcán Colima, Mexico re-visited: eruption ages and volumes, oxidation states, and sulfur content. *Bulletin of Volcanology*, v. 68, p. 407-419.
- Carmichael, I.S.E., Turner, F.J., and Verhoogen, J., 1974. *Igneous petrology*: New York, McGraw-Hill, p. 739.
- Carracedo J C (1994) The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *J Volcanol Geotherm Res*, 60: 225-241
- Carrasco-Núñez G, Vallance J W., Rose W I., 1993. A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico: Implications for hazard assessment. *J Volcanol Geotherm Res*, 59: 35-46
- Castro-Govea, R., 2007. Historia eruptiva del volcán La Malinche y estudio del emplazamiento del flujo piroclástico Pilares Superior. *Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Doctorado*, 158 p.
- Cortés, A., Garduño, V.H., Macías, J.L., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J.C., Saucedo, R., and Gavilanes, J.C., 2010. Geological mapping of the Colima volcanic complex (Mexico) and implications for hazard assessment. *The Geological Society of American Special Paper* 464-12, p. 1-16
- Cortés, A., Garduño, V.H., Navarro-Ochoa, C., Komorowski, J.C., Saucedo, R., Macías, J.L., and Gavilanes, J.C., 2005, Carta geológica del Complejo Volcánico de Colima, con Geología del Complejo Volcánico de Colima: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas y Mineras 10, scale 1:100,000, 1 sheet, 37 text.
- Day S (1996) Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes. *In: McGuire, W.J., Jones, A.P., Neuberg, J. (Eds.), Volcano Instability on the Earth and other Planets. Spec Publ Geol Soc Lond*, 110: 77-94
- De La Cruz-Reyna, S., 1993. The historical eruptive activity of Colima Volcano, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 55, p. 51-68.
- Demant, A. 1979. Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Revista, v.3, p. 39-57.
- Demant, A. 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. UNAM, Instituto de. Geología, Revista, 2 No2: 172-186.
- Díaz, E. G., and Mooser, Federico, 1972. Formación del granben de Chapala: Mazatlán, México, Soc. Geol. Mexicana, Convención Nacional, 2, Mem., p. 144-145 (abstract)
- Ewart, A., 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesite-basaltic compositional range. En R.S. Thorpe (Ed.), *Andesites*, John Wiley & Sons, p. 25-95.
- Ferrari, L.R.E., J., Aguirre-Díaz, G., Venegas-Salgado, S. 1997. Tectonics and volcanims of the western Mexican Volcanic Belt. In Aguirre-Díaz, G., Aranda Gómez, J.Carrasco-Núñez, G. (Eds.) *Magmatims and Tectonics in Central and Northwestern Mexico- aselection of the 1997 IAVCEI General Assembly excursion*. Instituto de Geología, UNAM (reporte): 85-129.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquaré, G. y Tibaldi, A., 1994. Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to present. *Geofís. Int.*, 33-1, 1-9.
- Folk, R. L., 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin, Texas, Hemphill Publishing Co., 183 p.
- Francis P W, Self S (1987) Collapsing Volcanoes. *Scientific American*. 256-6: 90-97p.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Espíndola, J.M., 1996. Marco Geológico Estructural de la Región del Nevado de Toluca, Edo. De México. *Actas INAGEQ*, 2, 115-120.

- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Espíndola, J.M., and Garduño, V.H., 2002, Geology of Nevado de Toluca volcano and surrounding areas, central Mexico: Geological Society of America Map and Chart Series MCH089, 1 Sheet, 26 p. text.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.C., Hughes, S., Saucedo, R., Espíndola, J.M., Escobar, R., and Layer, P., 2006, Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, Mexico-Guatemala. *In*: Rose, W.I., Bluth, G.J.S., Carr, M.J., Ewert, J., Patino, L., and Vallance, J., Volcanic Hazards in Central America. Geological Society of America Special Paper 412, p. 39-57.
- Garduño, M.V., Tibaldi, A., 1991, Kinematic evolution of the continental active triple junction of Western Mexican Volcanic Belt: C.R. Acad. Sci. Paris, t. xxx, 1-6.
- Garduño, V.H., Saucedo, R., Jiménez, S., Gavilanes, J.C., Cortés, A., and Uribe, R.M., 1998, La Falla Tamazula, limite suroriental del bloque Jalisco, y sus relaciones con el Complejo Volcánico de Colima, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 15, p. 132-144.
- Glicken, H., (1996). Rockslide avalanche of May 18, 1980, Mount St. Helens Volcano, Washington, U. S. Department of the Interior, USGS: Open File Report 96-677, 88p.
- Glicken, H., (1991). Sedimentary architecture of large volcanic-debris avalanche: Sedimentation in Volcanic Settings, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication No. 45, p. 99-106.
- Gastil, R.G.K., D. Jansky, W.A. 1978. Reconnaissance geology of west-Central Nayarit, México. Geological Society of America Bulletin, map chart series Mc-24:1-8.
- Gorshkov G S (1959) Gigantic eruption of the volcano Bezymianny. *Bull Volcanol*, 20: 77-109
- Grajales-Nishimura, J. and López-Infanzón, M., 1983, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el prospecto Tomatlán-Guerrero-Jalisco. Proyecto C-1160, Instituto Mexicano del Petróleo, México D.F.
- Hasenaka, T. y Carmichael. I.S.E., 1985. The cinder cones of Michoaca-Guanajuato, central Mexico: Their age, volumen and distribution, and magma discharge rate. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 25, 105-124
- Hedberg, H.D., 1985. Guía Estratigráfica Internacional.
- Heine, K., 1975. Studien zur jungquartären Glazialmorphologie Mexikanischer Vulkane. *In*: W. Lauer (Editor), Das Mexiko-Projekt der Deutschen Forschungs-gemeinschaft, 7: 1-178.
- Heine, K., 1988. Late Quaternary glacial chronology of the Mexican Volcanoes. *Die Geowissenschaften*, 6/7: 197-205.
- Heier, K. S., and J. A. S. Adams 1964. The geochemistry of the alkali metals. *In* Physics and Chemistry of the Earth, vol 5, pp. 253-381, Pergamon Press.
- Herrera, C., 1967. Geología de los Volcanes de Colima. Tesis de Lic., Fac. Ing. UNAM. 62 pp.
- Kerle, N., van Wyk de Vries, B., 2001. The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua- investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 105, p. 49-63.
- Komorowski, J.C., Navarro, C., Cortés, A., Saucedo, R., Gavilanes, J.C., 1997, The Colima Complex: Quaternary multiple debris avalanche deposits, historical pyroclastic sequences (pre-1913, 1991 and 1994), IAVCEI, Puerto Vallarta, México, 1997, Plenary Assembly, Fieldtrip guidebook: Guadalajara, Jalisco, Gobierno del Estado de Jalisco, Secretaría General, Unidad Editorial, 1-38.
- Lange, R., Carmichael, I.S., (1991). Apotassic volcanic front in western México: Lamprophyric and related lavas of San Sebastian. *Geological society of America Bulletin*, 103: 928 – 940.

- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A. y Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks base on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, v. 27-3, p. 745-750.
- Loera, L.H., Urrutía-Fucugauchi, J., Valdivia, A. L., (2006). Magnetic Characteristics of Fracture Zones and Constraints on the Subsurface Structure of Colima Volcanic Complex. Western Mexico.
- López D, Williams S (1993) Catastrophic volcano collapse: relation to hydrothermal alteration. *Science*, 260: 1794–1796
- Lorenzo, J. L., 1961. Notas sobre geología glacial del Nevado de Colima: Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geología, Bol. 61, p. 77-92.
- Lorenzo, J. L., 1964. Los glaciares de México (2ª Edición). Monografías del Instituto de Geofísica, UNAM, 1, 124p.
- Luhr, J.F., 2002, Petrology and geochemistry of the 1991 and 1998-1999 lava flows from Volcán de Colima, México: Implications for the end of the current eruptive cycle. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 117, p. 169-194.
- Luhr, J., and Carmichael, I.S.E., 1990, Geology of Volcán de Colima: Boletín del Instituto de Geología, no.107, p. 101, + plates.
- Luhr, J.F., and Carmichael, I.S.E., 1990b, Petrological monitoring of cyclic eruptive activity at Volcán Colima, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 42, p. 235-260.
- Luhr, J.F., Allan, J.F., Carmichael, I.S.E., Nelson, S.A., Hasenaka, T., 1989. Primitive alca-alkaline and alkaline rock types from the western Mexican volcanic belt. *J. Geophys. Res.* 94: 4515-4530.
- Luhr, J.F., and Prestegard, K. L., 1988, Caldera formation at Volcán de Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 35, p. 335-348.
- Luhr, J.F., Nelson, S.A., Allan, J.F., and Carmichael, I.S.E., 1985, Active rifting in southwestern Mexico: manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump: *Geology*, v. 13, p. 54-57.
- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1982. The Colima Volcanic Complex, Mexico: III Ash-and Scoria-Fall Deposits from the Upper Slopes of Volcán Colima. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 262-275.
- Luhr, J.F., 1981, Colima: history cyclicity of eruptions, *Volcano News* 7: p. 1-3.
- Luhr, J.F., Carmichael, I.S.E., 1981. The Colima Volcanic Complex, México. Part II, Late Quaternary cinder cones: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76 (2), 127-147.
- Luhr, J.F. and Carmichael, I.S.E. 1980, The Colima volcanic complex México I. postcaldera andesites from Volcán Colima. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 71: 343-372.
- Macdonal, R., 1974. Tectonic settings and magma associations: *Bulletin Volcanologique*, v. 38, p. 575-593.
- Macías, J.L., Capaccioni, B., Conticelli, S., Giannini, M., Martini, M., and Rodríguez, S., 1993, Volatile elements in alkaline and calc-alkaline rocks from the Colima graben, Mexico: Constraints on their genesis and evolution: *Geofísica Internacional*, v.32 (4), p. 575-589.
- Martín Del Pozzo, A. L., Romero, V. H. Ruiz – Kitcher. R. E., 1987, Los flujos piroclásticos del Volcán de Colima. México, *Geofísica Internacional*, 26-2: 291-307.
- Martín Del Pozzo, A.L., Lugo-Hubb, J. Vázquez-Selem, I., 1990. Multiple debris avalanche events in Colima, México. *EOS Transactions, American Geophysical Union*. October 23 1990, 71-43: 1720.

- Martínez-Serrano, R.G., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Hernández-Bernal, M.S., Hernández-Treviño, T., Morales-Contreras, J.J. y Macías, J.L., 2004. Sr, Nd and Pb isotope and geochemical data from the Quaternary Nevado de Toluca volcano, a source of recent adakitic magmatism, and the Tenango Volcanic Field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 138, p. 77-110.
- Medina-Martínez, F., 1983. Analysis of the eruptive history of the Volcán Colima, México, 1560-1980. *Geofísica Internacional*, v. 22, p.157-178.
- Merrihue, C., and G. Turner 1966. Potassium-argon dating by activation with fast neutrons. *J. Geophys. Res.*, 71 - 2852-2857.
- Mooser, F., 1961, Los volcanes de Colima: Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto Geología, v. 61, p. 49-71.
- Mora, J.C., Macías, J. L., Saucedo, R., Orlando, A., Manetti, P., and Vaselli, O., 2002, Petrology of the 1998-2000 products of Volcán de Colima, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 117, p. 195-212.
- Navarro, C., Komorowski, J.C., Cortés, A., 1994, Depósitos de avalanchas de escombros en el Complejo Volcánico de Colima: evidencias geológicas y edades C14 para múltiples eventos. Nuevas preguntas a previas interpretaciones, un problema aun no resuelto. Universidad de Colima, Abs., Cuarta Reunión Internacional Volcán de Colima-Volcán de Colima: A Decade Volcano Workshop, Colima, p. 49-50.
- Navarro, C., Gavilanes, J.C., and Cortés, A., 2002, Movement and emplacement of lava flows at Volcán de Colima, México: November 1998–February 1999, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 117, p. 155-167.
- Nier, A. O. 1935. Evidence for the existence of an isotope of potassium of mass 40. *Phys. Rev.*, 48, 283-284.
- Norini, G., Gropelli, G., Capra, L., Beni, E., 2004. Morphological analysis of Nevado de Toluca volcano (Mexico): new insights into the structure and evolution of an andesitic to dacitic stratovolcano. *Geomorphology*, v. 62 p 47–61
- Norini, G., Capra, L., Gropelli, G., Agliardi, F., Pola, A and Cortes, A., 2010. Structural architecture of the Colima Volcanic Complex. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 115, B12209, doi:10.1029/2010JB007649
- Ordoñez, E., (1897-1898). Les volcans Colima et Ceboruco, en *Memorias de la Sociedad Científica "Antonio Alzate"*, núm. 11, México, pp. 326-329.
- Pardo, M., and Suarez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco Block in Western of Mexico: *Geophysical Research Letters*, v. 320, 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 of Geophysical Research*, v. 100, p. 12,357–12,373.
- Pantoja-Alor, Jerjes, y Estrada-Barraza Samuel, 1986. Estratigrafía de los alrededores de la Mina de fierro El Encino. Jalisco: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. v. 47, p. 1-15.
- Peccerillo, A. y Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v. 58, p. 63-81.
- Ponce, L.R., Gaulon, G., Suárez, G. and Lomas, 1992. Geometry and the state of stress of the down going Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 773-776.
- Reid M, Sisson T, Brien D (2001) Volcano collapse promoted by hydrothermal alteration and edifice shape Mount Rainier, Washington. *Geology*, 29: 779–782

- Righter, K., Carmichael, I.S.E., Becker, T.A., y Renne, P.R., 1995. Pliocene-Quaternary volcanism and faulting at the intersection of the Gulf of California and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 107, p. 612-626.
- Robin, J., Mossand, P., Camus, G., Cantagrel, J. M., Gourgaund, A., and Vincent, P. M., 1987, Eruptive history of the Colima volcanic complex (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 31, p. 99-113.
- Rodríguez-Elizarrarás, S. R., 1995, Estratigrafía y estructura del Volcán de Colima, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 12, p. 22-46.
- Rodríguez-Elizarrarás, S., Siebe, C., Komorowski, J., Espíndola, J., and Saucedo, R., 1991. Field observations of pristine block and ash flow deposits emplaced April 16-17, 1991 at Volcán de Colima, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 48, p. 399-412.
- Rodríguez-Elizarrarás S., 1995, Consideraciones Preliminares sobre riesgo en el Volcán de Colima, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol.12 No 1: 47-51.
- Saucedo, R., 2001. Erupciones de 1991 y 1998-1999 del Volcán de Colima: Mecanismos de transporte y depositación de los flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Tesis Doctoral, UNAM, México, D.F.
- Saucedo, R., Komorowski, J.C., Macías, J.L. Sheridan, M.F., 1997. Modeling of pyroclastic flows generate during the 1913 eruption of Colima Volcano, México. AGU fall Meeting, San Francisco, Eos, Transaction, American Geophysical Union.
- Saucedo, R., Macías, J., Bursik, M., Mora, J., Gavilanes, J., and Cortes, A., 2002, Emplacement of pyroclastic flows during the 1998-1999 eruption of Volcán de Colima, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 117, p. 129-153.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sarocchi, D., Bursik, M.I., Rupp, B., 2008. The rain-triggered Atenquique volcanoclastic debris flow of October 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 132 (1-2), 69-83.
- Schaaf, P., Stimac, J., Siebe, C., and Macías, J.L., 2005, Geochemical evidence for mantle origin and crustal processes in volcanic rocks from Popocatepetl and surrounding monogenetic volcanoes, central Mexico: *Journal of Petrology*, v. 46, p. 1243-1282.
- Schuster, R. L., y Crandell, D. R., (1984). Catastrophic debris avalanches from volcanoes, in IV International Symposium on Landslides Proceedings, p. 567- 572.
- Scott, K.M., Vallance, J., Kerle, N., Macías, J.L., Strauch, W., Devoli, G., 2005. Catastrophic precipitation triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: occurrence, bulking and transformation: *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 56-79.
- Siebe, C., Rodríguez-Lara, V., Schaaf, P. Y Abrams, M., 2004. Geochemistry, Sr-Nd isotope composition, and tectonic setting of Holocene Pelado, Guespalapa and Chichinautzin scoria cones, south of Mexico city. *J. Volnol. Geotherm. Res.*, V. 130, p. 197-226.
- Siebe, C., Komorowski, J.C., and Sheridan, M. F., 1992. Morphology and emplacement collapse of an unusual debris avalanche deposit at Jocotitlán Volcano, Central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, v. 54, p. 573-589.
- Singh, S.K., and Pardo, M., 1993, Geometry of the Benioff Zone and state of stress in the overriding plate in central Mexico: *Geophysical Research Letters*, v. 20, p. 1483-1486
- Sheridan, M.F., Siebe, C., Bonnard, C., Strauch, W., Navarro, M., Cruz Calero, J., Buitrago, T.N., 1998. Report on the 30 October, 1998 avalanche and breakout flow of Casita Volcano, Nicaragua triggered by hurricane Mitch. *Bull. Glob. Volcano Net.* 23 (10), 7-8.

- Serpa, L., Smith, S., Katz, C., Skidmore, C., Slon, R., y Pavlis, T., 1992. A Geophysical investigation of the southern Jalisco Block in the State of Colima, México: *Geofísica Internacional (México)*, v. 31, No. 4. p. 475-492.
- Smith, G. A., y Fritz, W. J., 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation: *Geology*, v. 17, p. 375-376.
- Smith, G.A., 1990. A geologic reconnaissance study of a Middle Cretaceous marine volcanic arc: The stratigraphic evolution and subsequent strike-slip fragmentation of the Colima Basin: Symposium on the Tectonics, Geophysics, and Volcanism of México, University of New Orleans, Louisiana.
- Stoopes, G.R., and Sheridan, M., 1992. Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico: Implications for long-runout landslides (<100 km) and hazard assessment: *Geology*, v. 20, p. 299-302.
- Suter, M., Quintero, o. and Jhonson, A.C., 1992. Active Faults and State of Stress in the Central Part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, México 1. The Venta de Bravo Fault. *J. Geophys. Res.* 97, 11983-11993.
- Swanson D, DuffieldW, Fiske R (1976) Displacement of the south flank of Kilauea volcano: the result of forceful intrusion of magma into the rift zones. *U S Geol. Surv Prof Pap*, 963: 93 pp
- Thorpe, R. S., Gibson, I. L., and Vizcaíno, J.S., 1977. Andesitic pyroclastic flows from Colima Volcano: *Nature*, v. 265, p. 724-725.
- van Wyk de Vries B, Francis P., 1997. Catastrophic collapse at stratovolcanoes induced by gradual volcano spreading. *Nature*, 387: 387-390
- Vidal, R., Campa, M.F., Huitrón, B., Alencaster, G., 1980. El Conjunto Petrotectónico de Zihuatanejo, Guerrero-Coalcomán, Michoacán. *Sec. Geol. Mexicana, resúmenes de la V Convención Geológica Nacional.*, p.p. 111-112.
- Voight, B., Glicken, H., Janda, R.J., y Douglass, P.M., (1981). Catastrophic rockslide avalanche of May 18. In: P. W. Lipman and Mullineaux, eds. The 1980 eruptions of Mount St. Helens Washington. U.S. Geological Survey professional paper. v.1250, p. 347-377.
- Voight B, Janda R J, Glicken H, Douglass P M (1983) Nature and mechanics of the Mount St Helens rockslide-avalanche of 18 May 1981. *Geotechnique*, 33: 243-273
- Von Weizsacker, C. F. 1937. Über die Möglichkeit eines dualen β -Zerfalls von Kalium. *Physik. Zeitschrift*, 38, 623-624.
- Waitz, P., 1920. El volcán Jorullo (Calendario de Momo y Minerva para el año de 1859, México 1858). *Men Rev. Soc. Cient. Antonio Alzate, México* 37, 278-290.
- Waitz, P., 1935. Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima, *Memorias de la Soc. Cient. Antonio Alzate*, tomo, 53: p. 349-383.
- Wallace, P.L.J. and Carmichael I.S.E., 1989. Minette lavas and associated leucitites from the western front of the MVB: petrology, chemistry and origin: *Contributions to Mineralogy and Petrology* v. 103, p. 470-492.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Londres, Unwin Hyman, 466 p.
- Zimbelman D R, Watters R, Firth I, Breit G, Carrasco-Núñez G (2004) Stratovolcan stability assessment methods and results from Citlaltépetl, Mexico. *Bull Volcanol*, 66: 66-79