

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
INSTITUTO DE GEOLOGIA
DIRECTOR: ING. GUILLERMO P. SALAS

BOLETIN NUM. 61
DEL
INSTITUTO DE GEOLOGIA

FENOMENOS GEOLOGICOS
DE ALGUNOS VOLCANES MEXICANOS

LUIS BLÁSQUEZ L.
FEDERICO MOOSER
ARMANDO REYES LAGOS
JOSÉ L. LORENZO



MEXICO, D. F.
1961

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

RECTOR:
Dr. Ignacio Chávez

SECRETARIO GENERAL:
Dr. Roberto L. Mantilla Molina

DIRECTOR DE LA
INVESTIGACION CIENTIFICA:
Dr. Ignacio González Guzmán

INSTITUTO DE GEOLOGIA
Ciudad Universitaria
Villa Obregón (17), D. F.

DIRECTOR:
Ing. Guillermo P. Salas



INSTITUTO DE GEOLOGIA

PERSONAL TECNICO

INVESTIGADORES DE TIEMPO COMPLETO

<i>Arellano, Alberto R. V.</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Ayala C., Agustín</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Blásquez L., Luis</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Cserna, Zoltan de</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Fabregat, Dr. Francisco J.</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Fries, Carl, Jr.</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Schmitter, Eduardo</i>	<i>Primera categoría</i>
<i>Cserna, Gloria Alencaster de</i>	<i>Segunda categoría</i>
<i>Hungsberg, Ulrich</i>	<i>Segunda categoría</i>
<i>Ochoterena, Héctor</i>	<i>Segunda categoría</i>
<i>Gómez, Ruth Rojas de</i>	<i>Tercera categoría</i>

INVESTIGADORES DE CARRERA

Ruiz Elizondo, Jesús *Mooser, Federico*

INVESTIGADORES CIENTIFICOS

Bonet, Federico.
Butterlin, Jacques A.
Eguía Lis, Bernardo
Enciso de la Vega, Salvador
Espino Flores, Luis
García Vda. de Beguerisse, Esperanza
González Reyna, Jenaro
Ledezma Guerrero, Odilón
Limón Gutiérrez, Luis
Obregón Pérez, Alberto
Pantoja, Jerges
Rincón Orta, César
Rodríguez Cabo, José
Schroeder Gutiérrez, Esperanza
Velásquez González, Graciela
Yáñez Correa, Amado

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
INSTITUTO DE GEOLOGIA
DIRECTOR: ING. GUILLERMO P. SALAS

BOLETIN NUM. 61
DEL
INSTITUTO DE GEOLOGIA

FENOMENOS GEOLOGICOS
DE ALGUNOS VOLCANES MEXICANOS

LUIS BLÁSQUEZ L.
FEDERICO MOOSER
ARMANDO REYES LAGOS
JOSÉ L. LORENZO



MEXICO, D. F.

1961



C O N T E N I D O

	Pág.
PREAMBULO	IX

LOS GEISERES, SOLFATARAS Y MANANTIALES DE LA SIERRA DE SAN ANDRES, MICH.

Por Luis Blásquez L.

Introducción	1
Orografía	3
Geología	5
Fumarolas, Solfataras y Manantiales	11
Tabla Núm. 1.—Clasificación de manantiales	11
Tabla Núm. 2.—Análisis químicos de aguas	14
Instituto de Geología	23
Método Larios (Estudio geoquímico de las aguas)	24
Representación de los análisis por un punto	26
Tabla Núm. 3.—Porciento de salinidades y alcalinidades	28
Bibliografía	37

I L U S T R A C I O N E S

Fig. Núm. 1.—Orientación general del eje principal de la Serranía del Anáhuac	2
Fig. Núm. 2.—Carta de las lagunas de la Sierra de San Andrés	10
Fig. Núm. 3.—Aniones según los análisis de la Tabla Núm. 2	29
Fig. Núm. 4.—Cationes según los análisis de la Tabla Núm. 2	29
Fig. Núm. 5.—Cationes	30
Fig. Núm. 6.—Aniones	31
Fig. Núm. 7.—Salinidad y alcalinidad	32
Fig. Núm. 8.—Salinidad y alcalinidad	33
Fig. Núm. 9.—Salinidad y alcalinidad	34

LAS POSIBLES FUENTES DE ENERGIA GEOTERMICA EN LA REPUBLICA MEXICANA

Por Luis Blásquez L.

Introducción	39
Producción de vapor	39

	Pág.
Aguas hiper y mesotermales	45
Bibliografía	46

EL GRUPO VOLCANICO DE LAS TRES VIRGENES

Mpio. de Sta. Rosalía, Territorio de Baja California

Por los Ings. Federico Mooser y Armando Reyes Lagos.

El grupo volcánico de Las Tres Vírgenes	47
---	----

LOS VOLCANES DE COLIMA

Por el Ing. Federico Mooser.

Introducción	49
Historia geológica de los volcanes de Colima. Resumen	52
Forma, estructura y origen del Volcán de Colima	54
Historia de la actividad del Volcán de Colima	56
a) Actividad volcánica 1576-1912	60
b) Actividad volcánica 1913-1958	61
Forma y estructura del Nevado de Colima	65
Situación tectónica	67
Apéndice	70
Bibliografía	71

ILUSTRACIONES

Fig. Núm. 1.—Croquis de la región en que se hallan los volcanes de Colima	50
Fig. Núm. 2.—Vista de los dos volcanes desde el SW	53
Fig. Núm. 3.—Los volcanes de Colima vistos desde el poniente	53
Fig. Núm. 4.—Vista del Volcán de Fuego y el Volcancito desde el NW	55
Fig. Núm. 5.—Vista del Volcán de Fuego desde el Paso del Colimote... ..	57
Fig. Núm. 6.—Volcán Ceboruco	57
Fig. Núm. 7.—El Volcán de Fuego en 1906	59
Fig. Núm. 8.—Vista del Volcán de Fuego después de la erupción de 1913	59
Fig. Núm. 9.—El Volcán de Fuego y su tapón en 1941	62
Fig. Núm. 10.—Vista panorámica del tapón en el interior del cráter del Volcán de Fuego	62 y 63
Fig. Núm. 11.—El picacho del Nevado visto desde el norte	63
Fig. Núm. 12.—La Joya y la cúspide del Nevado	66
Fig. Núm. 13.—Vista del Nevado desde el noroeste	67
Fig. Núm. 14.—Barranca del Ojo de Agua	69

LAS NUEVAS SOLFATARAS DEL VOLCAN DE COLIMA

Por Armando Reyes Lagos.

Introducción	73
Localización	73

	Pág.
Breve historia sobre su actividad volcánica	73
Forma y estructura	74
Los depósitos de azufre	74

NOTAS SOBRE GEOLOGIA GLACIAL DEL NEVADO DE COLIMA

Por José L. Lorenzo.

Resumen	77
Bibliografía	92

ILUSTRACIONES

Croquis Núm. 1.—Región del Nevado de Colima	83
Croquis Núm. 2.—Cryolacolito	84
Fig. Núm. 1.—Cumbre del Nevado de Colima en su cara norte	78
Fig. Núm. 2.—Ladera sur del Nevado de Colima	78
Fig. Núm. 3.—Cryolacolito en la barranca NNO	82
Fig. Núm. 4.—Cryolacolito de mayores dimensiones	83
Fig. Núm. 5.—Rocas aborregadas en la barranca NNO	86
Fig. Núm. 6.—Rocas aborregadas en la barranca NNO	86
Fig. Núm. 7.—Rocas aborregadas en la barranca NNO	87
Fig. Núm. 8.—Parte superior de la morrena E. de la barranca NNO....	87
Fig. Núm. 9.—Parte media de la misma morrena	88
Fig. Núm. 10.—Morrena O del mismo avance de la Fig. Núm. 9	89
Fig. Núm. 11.—Area de rocas aborregadas en la barranca SSO.....	89
Fig. Núm. 12.—Las rocas aborregadas y la morrena E. del primer avance en la barranca SSO	90

LOS GLACIARES DE MEXICO

Por Luis Blásquez L.

Resumen	93
Introducción	93
Localización	94
Relieve	94
Geología	97
Glaciación contemporánea	101
Bibliografía	108

TABLAS

Tabla Núm. 1.—Superficies de las cuencas hidrográficas	104
Tabla Núm. 2.—Areas ocupadas por la nieve en el Iztaccíhuatl. Invierno de 1944	105
Tabla Núm. 3.—Areas ocupadas por la nieve en el Iztaccíhuatl. Invierno de 1955	106
Tabla Núm. 4.—Areas y volúmenes de nieve y hielo	106

	Pág.
I L U S T R A C I O N E S	
Fig. Núm. 1.—Situación del Iztaccíhuatl y principales volcanes de México.	95
Fig. Núm. 2.—Perfil de la montaña Iztaccíhuatl	96
Fig. Núm. 3.—Flanco W del Iztaccíhuatl	98
Fig. Núm. 4.—Vertiente W del Iztaccíhuatl	98
Fig. Núm. 5.—El Iztaccíhuatl visto desde el norte	99
Fig. Núm. 6.—El Iztaccíhuatl visto de S a N	100
Fig. Núm. 7.—Vertiente oriental del Iztaccíhuatl	103

PREAMBULO

No obstante que durante los últimos años los lineamientos que se han dado a las investigaciones científicas en este Instituto de Geología, han sido encauzados, casi todos, a la ciencia aplicada, más que a la ciencia pura; no pasa inadvertida a la Dirección del mismo, la importancia de la investigación en las diversas disciplinas de la ciencia pura, de suerte que, en las medidas de la disponibilidad de tiempo y efectivo, los geólogos investigadores dependientes de esta Institución, efectúan ciertos estudios cuya aplicación no es discernible de inmediato.

Así, en la disciplina de vulcanología, se ha dado oportunidad a los autores que en este volumen presentan los resultados de algunos estudios realizados de dos años a la fecha, para que, basados en su experiencia, ataquen problemas que aporten conocimientos relacionados con varios de nuestros volcanes. En algunas ocasiones, los estudios de ciencia pura se efectuaron en relación con la confección de mapas regionales relativos a la geología de ciertas áreas y se reservó algún capítulo especial para investigación de ciencia pura. En otros casos se han estudiado los volcanes directamente, para explicar algún fenómeno que ha llamado la atención pública, juzgándose que es de la competencia directa de este Instituto, ofrecer a los interesados en la materia, alguna explicación de estos fenómenos.

La superficie de la República Mexicana debe gran parte de su geomorfología a fenómenos volcánicos y/o actividades de origen ígneo. Se estima que el 30% de la superficie de la República Mexicana está constituida por rocas ígneas y, de esta superficie, aproximadamente el 80% debe su origen a paleovulcanismo.

Por esto es que el estudio de los fenómenos volcánicos forma siempre parte del programa anual de investigaciones de este Instituto.

Los estudios que aquí se presentan a los interesados en la materia, sirven como secuela a los estudios de nuestros volcanes, que aparecieron

en volúmenes pasados, publicados por este Instituto y, a la vez, como base o punto de partida para futuros estudios que, sin duda, surgirán en el desarrollo de las actividades científicas.

El próximo volumen sobre vulcanología tardará algún tiempo en aparecer a la luz pública, pues se ha establecido la norma de reunir suficientes trabajos de cada especialidad o tema, para que el boletín respectivo resulte más completo, para su mayor eficacia como texto de referencia.

Se invita al lector a enviar a este Instituto sus comentarios por escrito, pues sólo mediante la crítica constructiva suelen aclararse problemas que una minoría estudia y atañen a una gran mayoría.

LOS GEISERES, SOLFATARAS Y MANANTIALES DE LA SIERRA DE SAN ANDRES, MICH.

Por LUIS BLÁSQUEZ L.

INTRODUCCIÓN

Ya en 1906 el distinguido geólogo don Paul Waitz, escribió un estudio sobre esta localidad, que tituló: *Phénomènes postparoxismiques dans la Sierra de San Andrés*, que fue publicado en la *Guide des excursions du X Congrès Géologique International, Mexique, 1906*. La intención de este trabajo era añadir algunas ideas sobre la composición química de las aguas y presentar un croquis un poco más completo de la región; pero al desarrollar la exposición de los datos, se abrió insospechadamente un amplísimo campo de investigación, partiendo de la interpretación geoquímica de los análisis de aguas, que por medio de fórmulas representativas, hizo evidente la conexión de los fenómenos postparoxísmicos de la sierra de San Andrés, con los de Ixtlán de los Hervores y Laguna del Platanal, teniendo que incluir numerosos manantiales termales, íntimamente relacionados con ellos.

En consecuencia, fue necesario ampliar más el estudio, principian-do con la parte fisiográfica y geomorfológica, para proseguir con otros aspectos inherentes a la cuestión.

Para visitar la sierra de San Andrés, saliendo de la ciudad de México, se sigue la carretera nacional que va a Guadalajara, Ruta número 15, y pasando por Ciudad Hidalgo, en el km. 205, se llega al km. 218.1 donde se encuentra un pequeño puente sobre el río Los Arcos. En este lugar entronca, a la derecha, un camino ordinario, sin revestimiento ni carpeta asfáltica, que pasa por el pequeño poblado de San Pedro Jácuaro, distante 6 km. de la carretera, en terreno plano, de poca pendiente y después de pasar un arroyo sin puente, se asciende la sierra de San Andrés, en un camino pedregoso de muy fuerte pendiente, de 15 a 20%, en unos 4 km. y se llega a la laguna de Los Azufres, ya en mejor camino, distante 10 km. de San Pedro.

La sierra de San Andrés está cubierta de bosques de encinos, pinos, oyameles y varias otras clases de árboles. La precipitación pluvial es alrededor de 1,400 mm. y la temperatura media anual, en las lagunas que se encuentran en su cima, de 10 a 12°C.

OROGRAFIA

Se tratará, para dar un panorama general, de la sierra que el Ing. don Pedro Sánchez ha llamado del "Eje Volcánico"^{1*} y el Ing. Ramiro Robles: "Cordillera Neovolcánica",² a la que el autor en estudio anterior propuso se denomine "Serranía del Anáhuac".³

El Ing. Sánchez dice que el "Eje Volcánico" está marcado por los volcanes Colima (19.22 - 103.3),** Tancitaro (19.25 - 102.25), Nevado de Toluca (19.06 - 99.45), Popocatepetl (19.01 - 98.37) y Citlaltépetl (19.00 - 97.15).

En realidad, no se trata de una sierra individualizada que constituya una unidad fisiográfica, sino de un complicado conjunto de sierras de diferentes orientaciones y características, al que se da el nombre de Serranía del Anáhuac, paralela a la Sierra Meridional o Sierra Madre del Sur.

La distribución de sus elevaciones, las principales de México y los diversos tramos que en ella pueden distinguirse, se relacionan con dos grandes sistemas orográficos, uno de mayor importancia que el otro. El primero ha sido denominado "Cordillerano";⁴ de orientación media 30°NW-SE; al segundo se le llamará "Michoacano", que probablemente coincide con el "Cascadiano", con orientación E-W.

Dada la complicación que presenta la orografía de esta parte del país (véase Fig. Núm. 1), se tratará, primero, de los elementos de la serranía, que corresponden a la parteaguas entre la vertiente del Pacífico y las cuencas endorreicas, de la altiplanicie, reuniendo sus datos en el siguiente cuadro:

Lados	Nombre de los vértices	Rumbo	Distancia km.
1 - 2	Concepción - Santa Clara.....	S 70 E	200
2 - 3	Santa Clara - San Andrés.....	N 63 E	114
3 - 4	San Andrés - Nevado de Toluca.....	S 50 E	116
4 - 5	Nevado de Toluca - Popocatepetl....	E	140

La línea recta que une los puntos extremos tiene rumbo S75E-500 kilómetros del punto 1, Concepción de Buenos Aires al punto 5. Popocatepetl.

* Al final de este estudio se incluye la bibliografía.

** Para facilitar la localización de los puntos se dan entre paréntesis las coordenadas geográficas, latitud al N y longitud al W del meridiano de Greenwich.

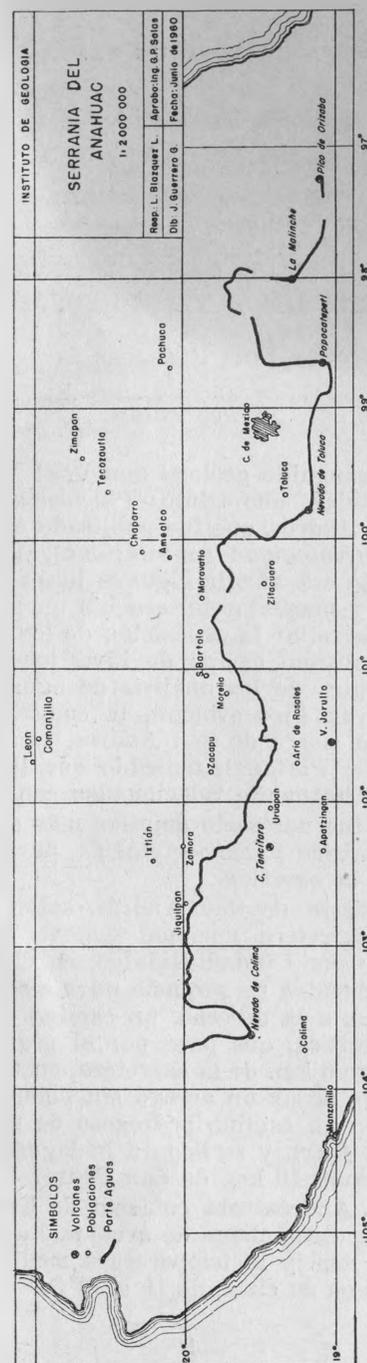


Fig. 1. Orientación general del eje principal de la Serranía del Anáhuac.

La línea recta Nevado de Colima-Popocatepetl tiene rumbo S87E-546 km. y pasa por los volcanes Tancítaro y Nevado de Toluca.

Para la mejor identificación de los puntos se dan a continuación sus coordenadas geográficas, incluyendo además su altitud en metros, reuniendo sus datos en el siguiente cuadro:

Punto	Nombre	Altura sobre el nivel del mar	Latitud N.	Longitud W. de Greenwich
1	Concepción.....	2 530	19.58	103.16
2	Santa Clara.....	2 440	19.21	101.32
3	San Andrés.....	3 940	19.48	100.35
4	Nevado de Toluca.....	4 600	19.07	99.45
5	Popocatepetl.....	5 452	19.02	98.38

La sierra de San Andrés ocupa la porción N del tramo comprendido entre Santa Clara y el cerro de San Andrés, cuya cima consiste en una elevada plataforma donde se levantan varios cerros y lomeríos, que separan pequeñas cuencas lacustres. La parte sur de esta sierra es conocida con el nombre de Ozumatlán.

Dentro de la zona referida, la cuenca más occidental y extensa es la de Piedra Labrada; en seguida, hacia el E, el grupo central de lagunas, formada por la laguna Larga, Ajolotes, llano de La Ardilla, llanos de Agua Fría y laguna de Los Azufres. La cuenca de La Compuerta está ligada con la de Agua Fría y con la de Los Jarros. La laguna Verde está a 5 km. al N del llano de Agua Fría y el llano de San Andrés es el más oriental y de mayor altura.

De este grupo de cuencas, el terreno desciende con fuerte pendiente hacia el SE, por San Pedro Jácuaró y Ciudad Hidalgo, formando la vertiente del río de Los Arcos. Hacia el NW desciende el terreno al lago de Cuitzeo y hacia el N al río Lerma.

Tanto en la vertiente del Arcos, como en la de Cuitzeo, se encuentran mesas bajas y alargadas, algunas con sus cubiertas inclinadas, denotando el movimiento de las efusiones riolíticas. El tipo de estas lomas puede verse entre San Pedro y Ciudad Hidalgo, y en las inmediaciones de este lugar.

Alturas sobre el nivel del mar de los lugares que en seguida se mencionan:

Sierra de San Andrés

	<i>Metros</i>
Cerro de San Andrés	3,450
Laguna de Los Azufres	2,855
El Currutaco	2,940
El Chillador	2,960
Laguna Larga	2,760
Llano de Ajolotes	2,812
Llano de La Ardilla	2,790
Llano de Agua Fría	2,885
Llano de La Compuerta	2,893
Llano de Los Jarros	2,875
Laguna Verde	2,855

Cuenca del río Tuzantla

San Pedro Jácuaró	2,157
Km. 218 carretera México-Guadalajara	2,075
Ciudad Hidalgo	2,040

Cuenca del lago de Cuitzeo

Salinas de Araro	1,835
Baños de Zimirao	1,845
Baños de Huingo	1,832
Baños de Atzimba	1,852
Zinapécuaro	1,874
Lago de Cuitzeo	1,828
Hervideros de San Agustín	1,828
Morelia (piso Catedral)	1,920
San José (hacienda)	1,860
Alvaro Obregón (San Bartolo)	1,846

GEOLOGIA

En la "Serranía del Anáhuac" se encuentran, principalmente, rocas efusivas que consisten en andesitas, como rocas más antiguas, riolitas y basaltos como las rocas más jóvenes.

Las andesitas son de colores rosados, grises y azulados y textura porfirítica, con fenocristales de hornblenda, augita, hiperstena, andesina, oligoclasa y albita. Se presentan algunas variedades que corresponden a la preponderancia de la hornblenda, la biotita o la hiperstena. Parece que la sucesión de las corrientes está en el orden que se han enumerado los minerales que forman las variedades antes indicadas.

Las andesitas de hiperstena están acompañadas por brechas y tobos y se presenta una subvariedad muy importante, que es una transición al basalto. Dicha andesita de hiperstena, interviene, en proporción

considerable, en la constitución geológica de esta serranía. Del volcán de Colima trata Ordóñez;⁵ de la sierra de Ozumatlán, en una parte pequeña, correspondiente a la cuenca del río Chiquito, de Morelia, Apolinar Hernández;⁶ de las sierras de San Andrés y Tlalpujahua, Flores,^{7, 8} y de una parte de las sierras de Patamba, Caurio, Santa Clara, Zirate y Ozumatlán el autor de este trabajo.⁹

La riolita forma gran parte de la sierra de Ozumatlán, particularmente en las mesas que se extienden desde los alrededores de Morelia hacia el lago de Cuitzeo y en la vertiente SE de la sierra de San Andrés.

El basalto constituye el mayor volumen de la "Serranía del Anáhuac", particularmente en las sierras de Patamba, Santa Clara, Ozumatlán y San Andrés.

Las andesitas más antiguas, que son las de hornblenda, descansan sobre pizarras sericíticas, posiblemente triásicas, en la sierra de Tlalpujahua, por Senguio, Aporo, Peña Redonda y los cerros Colorado y San Cristóbal.⁸ Se las ha considerado como miocénicas; forman corrientes muy importantes, superpuestas directamente, que en otras regiones, como en el mineral de Pachuca, alcanzan varios kilómetros de espesor. A estas estructuras se las llamará "Pachuqueñas".

Las andesitas posteriores, probablemente las hipersténicas, aparecen en corrientes con espesores de 50 a 200 m., alternando con brechas y tobas. Han sido observadas en otras regiones formando hasta 20 alternancias de lavas y material de proyección y alcanzando espesores hasta de 7 km. A estas estructuras se las llamará de "Las Cruces", por estar muy bien caracterizadas en la sierra de ese nombre.

Las andesitas hornbléndicas se relacionan con emisiones que constituyen la mayor parte de las sierras del sistema cordillerano y están cubiertas por las hipersténicas en las mismas sierras, y en otras del mismo sistema aparecen, exclusivamente, sin intervención de las hornbléndicas, así como en sierras de orientación N60E o cercanas a ésta.

En la sierra de San Andrés se interceptan ambos sistemas de fracturas, encontrándose en el N-S la sierra de Agustinos.

Sobre la plataforma donde se asientan las lagunas de Los Azufres, Larga, Verde y demás cuencas de que se habló, se hallan pequeños aparatos volcánicos, basálticos, que constituyen los cerros que separan esas cuencas. En la misma sierra de San Andrés se encuentran otros elevados cerros basálticos, como los de Calabaza (19.54-100.33), del Pilar (19.53-100.32.3), La Capilla (19.52.3-100.33), Conejo (19.51-100.32), Coyote (19.50.30-100.29), Mesa de León (19.49-100.31), Lagunilla (19.48-100.31), Prieto (19.47-100.33), Tunas (19.49-100.29.3), Janimoro (19.46-100.31), La Joya (19.45-100.31) y Silleta (19.45-100.32).

En la planicie Maravatio-Senguio, intermedia entre las sierras de San Andrés y Tlalpujahua, se encuentran varios volcancitos aislados, como son los cerros de La Herradura (19.44-100.32.3), Arcalanes (19.44.3-100.30.3), La Cruz (19.43-100.29.3), San Vicente (19.46-100.28), Pelón (19.47-100.27), Bermejo (19.49-100.26), Nogales (19.47-100.27), Campana (19.47-100.24) y Molcajete (19.45-100.24).

Para explicar los fenómenos postparoxísmicos de la sierra de San Andrés, se debe incursionar en gran parte de la "Serranía del Anáhuac" y aun abarcar, someramente, una extensión considerable del territorio mexicano, descuidando la geología detallada de la sierra referida, que no es esencial para el estudio de sus géiseres y fumarolas.

Es muy importante llamar la atención sobre las diversas clases de fracturas que se encuentran en la serranía y en la región central de México, y las que se dividirán en cuatro tipos principales:

a) Las emisoras de rocas ígneas, rellenas por éstas, aun cuando sean de muy diversas edades, pues fluctúan desde el Triásico hasta el Pleistoceno, que pertenecen a los dos sistemas antes aludidos;

b) Aquellas por donde circularon aguas magmáticas que formaron yacimientos minerales;

c) Las que sirven de conducto a aguas termales, gases y vapores que emergen en la actualidad;

d) Las que no tienen manifestaciones volcánicas, metalíferas ni de manantiales o gases.

Se habló ya de las fracturas de la clase a). Respecto de las correspondientes a las clases b), c) y d), pertenecen también a los "Sistemas Cordillerano y Michoacano" y son paralelas a las de emisiones ígneas, sin que se pueda decir si en algunos casos coincidan con ellas. Se necesitarían extensos estudios geofísicos de los sistemas completos de fracturas, para dilucidar este asunto y otros muy importantes de geología económica. Algunas fracturas de la clase b) cortan a las formaciones marinas que sirven de base a las ígneas, pero no a las andesitas; otras atraviesan bien a las andesitas de hornblenda, pero no a las de hipertena; otras cortan a todas estas formaciones y a las riolitas, pero no a los basaltos; y las más recientes atraviesan también a las últimas rocas: estas intersecciones determinan la edad de las fracturas.

Por su importancia económica han sido mejor estudiadas las fracturas de la clase b). En las minas de Senguio (19.45-100.24), Aporo (19.40-100.24) y San Francisco de los Reyes⁷ (19.47-100.13) las vetas tienen rumbos N15-30W, las capas de las pizarras en las que arman tienen rumbos E-W y N80W. En Anganguero⁷ (19.38-100.17) existen vetas con rumbos N-S y E-W y también fracturas del Sistema Cordillerano.

En Tlalpujahua (19.50-100.11) y El Oro (19.48-100.08) el sistema de fracturas filonianas es "Cordillerano" N15-30W.⁷

Las litoclasas, seguramente paraclasas del grupo c), son también de los "Sistemas Cordillerano y Cascadiano" y, por consecuencia, paralelas a las a) y a las b). En la "Serranía del Anáhuac" son de mencionarse: la del "Sistema Cascadiano", que pasa cerca de la margen meridional del lago de Cuitzeo y forma la "Lista Blanca" en la sierra de San Andrés, tocando el límite meridional del llano de Agua Fría, donde se encuentran los cerros de "Las Humaredas". Cerca del margen del lago de Cuitzeo se encuentran los manantiales supertermales de Hervideros de San Agustín y el grupo de Zimirao, así como los termales de

los baños de San Juan, Zimirao y los de Huingo. En el mismo alineamiento, hacia el W, se encuentran después de estos manantiales del lago de Cuitzeo, las aguas termales de Zimbanguaro (19.59-101.30) al NW de Huaniqueo y las supertermales de Ixtlán de los Hervores (20.10-102.27).

Fracturas paralelas a ésta, hacia el sur, comprenden las emergencias de Pajacuarán (20.08-102.33) y laguna del Platanal (20.04-102.34) por el W; las emergencias de Chillador, Currutaco y laguna de Los Azufres, en la sierra de San Andrés, y por el E, los manantiales de San Lorenzo (19.41-100.3) y Jaripeo (19.39-100.30).

Estudiando la posición de otros manantiales hipertermales del Estado de Guanajuato, entre los que se cuentan los de Caldera de Cuitzeo (20.17-101.31) y Comanjilla (21.04-101.30) se ve que éstos están situados en una línea N-S que comprende a Zimbanguaro y que el hipertermales de San Bartolo (20.30-100.40) está en una línea N-S respecto a laguna Verde y laguna de Los Azufres. Es evidente que tratándose de varias fuentes de esta naturaleza, diseminadas en una región, se pueden encontrar varios alineamientos y que, en definitiva, sólo un buen estudio geofísico de fallas y diaclasas puede resolver sobre su verdadera relación de posición; pero aquí es claro el alineamiento de los numerosos manantiales hipertermales del lago de Cuitzeo y el de las fumarolas de la "Lista Blanca", así como que ambos alineamientos se corresponden, es decir forman uno solo.

La "Serranía del Anáhuac" forma el borde meridional de la altiplanicie mexicana, denominada en esta parte, por algunos autores, "Mesa Central" y representa también el límite de los sistemas montañosos "Cordillerano y Cascadiano". A partir de esta línea las condiciones geológicas cambian notablemente. En el litoral del Pacífico se encuentra una marcada deflexión y, en seguida, la costa tiene orientación media de S70E, hasta llegar a los 15°45' de latitud y 96°30' de longitud, donde se abre el golfo de Tehuantepec. La orientación del litoral es debida a la presencia de macizos arcaicos de rocas cristalinas, entre ellas el granito y el gneis, que condicionaron también la disposición del plegamiento de las rocas marinas, jurásicas y cretácicas.

Por el litoral del Golfo de México, las rocas marinas, también a partir de la misma línea, forman un arco que se hace más pronunciado al S del paralelo 18, contribuyendo a dar al país la forma de cornucopia que algunos autores han hecho notar. Para producir esta forma, contribuyen el Golfo de México con el mayor pronunciamiento de la curva de su litoral y la existencia del Golfo de Tehuantepec del lado del Pacífico, en la misma longitud geográfica.

Puede creerse que la cuenca transversal del Balsas, anterior a las actividades volcánicas del Terciario, marca también el límite de las corrientes del mismo período, no obstante que en muchos lugares de ella aparecen rocas efusivas, como núcleos aislados.

La misma cuenca se extendía al N hasta el límite meridional del Valle Salado de San Luis Potosí y Zacatecas y corresponde a la de un

río transversal, antecedente, con afluentes longitudinales subsecuentes. Su sorprendente desarrollo, pues casi llega al litoral del Golfo de México, hace pensar en la posibilidad de que se trate de una fosa tectónica.

Debe investigarse por qué las efusiones relacionadas con el "Sistema Cordillerano" no se extienden hacia el S de la "Serranía del Anáhuac".

Encontrándose en esta porción del país rocas premesozoicas, era de esperarse que las fallas del Terciario las afectaran y, al no suceder tal cosa, se abren interrogantes de mucho interés.

El autor supone que en esta porción central del país, se encuentra un bloque de rocas muy antiguas y de gran inestabilidad. Este bloque, movido por fuerzas epeirogénicas, sufrió un intenso levantamiento y actuó respecto a los sedimentos mesozoicos, ya plegados, como una gran intrusión. Para la producción de fracturas es necesario que se desarrollen esfuerzos de tensión, torsión, cortantes o de compresión. El levantamiento de este bloque produciría esfuerzos de tensión y cortantes, en toda su periferia, y de torsión en radios de gran alcance, que ocasionarían fracturas principalmente del tipo "Cordillerano", que pueden ligarse también con los esfuerzos orogénicos que produjeron el plegamiento del mismo tipo. "El Michoacano" asume un carácter local, más directamente en contacto con el bloque arqueozoico; movimientos sucesivos, acompañados con verdaderas intrusiones en este bloque y sus contornos, dio lugar a la repetición del fracturamiento, que por obedecer a la misma clase de esfuerzos, en iguales sentidos y de idénticos orígenes, produjo los mismos sistemas de fracturas, como son los clasificados en los tipos *a*, *b*, *c* y *d*.

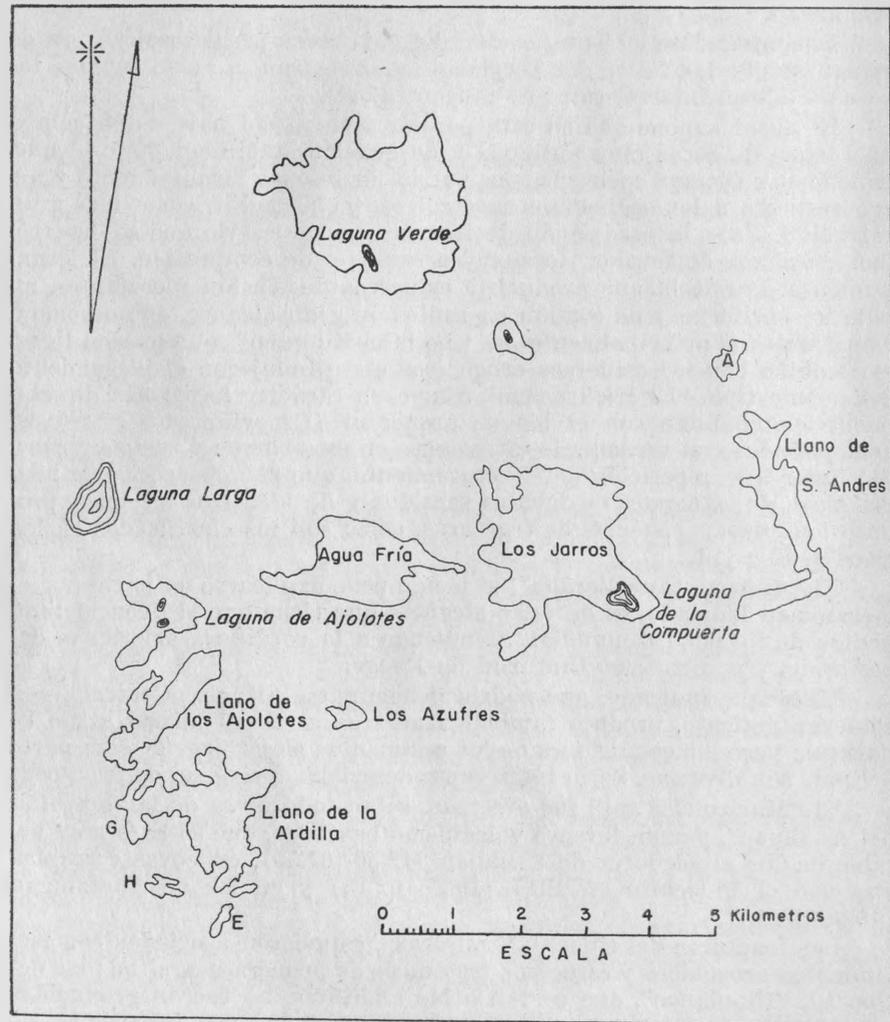
El "Sistema Cordillerano", si bien, puede explicarse en parte por el mecanismo indicado, es de tales alcances que tiene que ser considerado dentro de un cuadro mundial, atendiendo a la cordillera americana del borde del Pacífico y al Cinturón de Fuego.

El bloque indicado, que podría denominarse "Macizo Central", con su levantamiento, produjo también fracturas al S del mismo, como es natural; pero las condiciones de los sedimentos mesozoicos de esta parte del país son diversas. Sería interesante describir su sistema de fracturas.

El "Macizo Central" fue afectado, sobre todo cerca de la "Serranía del Anáhuac", por un intenso volcanismo basáltico, que se hace muy notable en los alrededores de Uruapan (19.50-101.56), en cuyas cercanías apareció el Parícutín en 1945 (19.27-102.15) y en los de Apatzingán (19.06-102.15).

Las fracturas del tipo *a*), "emisoras", estuvieron asociadas con movimientos orogénicos y esfuerzos tectónicos de primera magnitud; las del tipo *b*), "filonianas", que cortan a las andesitas, no fueron producidas ya por esfuerzos orogénicos y estuvieron asociadas con intrusiones de segunda magnitud, como residuos de la actividad orogénica; las del tipo *c*), "hidrotermales", están relacionadas con extrusiones e intrusiones menores, de tercera magnitud; y las del tipo *d*), "cuaternarias", se deben a movimientos epeirogénicos recientes y contemporáneos, generalmente locales.

FIGURA N° 2



CARTA DE LAS LAGUNAS DE LA SIERRA DE SAN ANDRES

Las fumarolas y solfataras de la sierra de San Andrés, el lago de Cuitzeo, Ixtlán de los Hervores y Laguna del Platanal, están relacionadas con el volcanismo reciente, probablemente con intrusiones, que acompañaron o siguieron a erupciones casi contemporáneas, que llegaron cerca de la superficie siguiendo las fracturas hidrotermales.

FUMAROLAS, SOLFATARAS Y MANANTIALES

Con anterioridad se ha establecido la siguiente distinción entre las aguas termales: hipotermas de menos de 30°C., mesotermas entre 30° y 45°C.; hipertermas entre 45° y la ebullición; supratermas con temperaturas superiores a la ebullición. También se ha propuesto una nomenclatura en relación con una nueva clasificación de manantiales¹⁰ incluida en la Tabla 1, que consigna las alturas, temperaturas, gastos hidráulicos, clasificación y situación respecto a la cabecera municipal, que en cada caso antecede a la lista de las emergencias que aquí interesan. (Fig. Núm. 2.)

Tabla Núm. 1
CLASIFICACIÓN DE MANANTIALES

Nombre	Altura mt.	Temp. agua	Gasto hidráulico lt.p.s.	Dist. km.	Rumbo	Clasificación	Situación
CIUDAD HIDALGO (19.41-102.35)							
Los Azufres (1,3,4).....	2 855	42	0.5	15.0	N56W	Lívgico	34
Pozo Hediondo.....	—	—	0.0	—	—	—	—
San Alejo (2).....	2 789	36	5.0	20.0	N56W	Lívgico	31
Maritaro.....	2 790	85.5	0.5	20.0	N49W	Lívgico	31
Laguna Verde (18).....	2 870	85.5	0.1	21.5	N36W	Lívgico	34
El Chino.....	2 790	36	0.3	19.4	N50W	Lívgico	31
Las Humaredas.....	2 870	101	0.5	14.5	N45W	Lívgico	34
El Chillador.....	2 940	103	0.1	15.7	N54W	Lívgico	32
El Currutaco (17).....	2 940	87	0.0	15.8	N56W	Lívgico	32
Laguna Larga (15,19)...	2 760	32	0.5	19.9	N56W	Lásico	34
Ajolotes (28).....	2 789	52	1.5	18.4	N58W	Lásico	32
San Lorenzo (35).....	1 940	30	2.3	6.2	S65E	Lívgico	22
Jaripeo (37,38).....	1 925	27.2	5.8	10.0	S70E	Lívgico	22
ZINAPECUARO (19.53-100.40)							
Baños de Huingo (20)...	1 832	52	—	6.0	N20W	Rásico	10
Zimirao.....	1 845	87	2.0	5.6	N28W	Rásico	12
Zimirao (21).....	1 832	101	0.6	5.7	N28W	Rásico	10
Atzimba (34).....	1 852	32	200	1.4	N80W	Rásico	12
ALVARO OBREGON (19.52-101.00.3)							
San Juan (22).....	1 832	5	0.7	12.5	N65W	Rásico	10
CUITZEO (19.58-101.07)							
San Agustín (23).....	1 832	89	2.0	12.5	S30W	Rásico	10

N o m b r e	Altura mt.	Temp. agua	Gasto hidráulico lt.p.s.	Dist. km.	Rumbo	Clasificación	Situación
HUANIQUEO (19.56-101.26)							
Zimbanguaro.....	2 015	32	6.0	2.0	N50W	Rásico	10
IXTLAN DE LOS HERVORES (20.10-102.24)							
El Salitre (6).....	1 530	93.5	3.0	4.0	S38E	Lígvico	10
Pozo Verde (9).....	1 530	60.0	0.2	5.5	S28E	Lígvico	10
Pozo Blanco (8).....	1 530	85	0.1	4.5	S28E	Lígvico	10
Baño Grande (7).....	1 530	85	0.5	4.6	S29E	Lígvico	10
Baño Viejo (10).....	1 530	93	0.3	4.9	S30E	Lígvico	10
JIQUILPAN (19.59-102.32)							
Laguna El Platanal (24)	1 532	32	3	4.0	N57W	Lígvico	10
Pozo Prieto (25).....	1 532	96	1	3.5	N56W	Lígvico	10
PAJACUARAN (20.08-102.33)							
Pajacuarán.....	1 532	32	60	1.0	E	Rásico	10
MORELIA (19.42-101.11)							
Cointzio (40).....	1 909	32	10	7.3	S29W	Rásico	10
ZITACUARO (19.26-100.20)							
San José Purúa (30,39)	1545	32	—	15.0	N69W	Lívico	42
CUITZEO DE ABASOLO, GTO. (20.27-100.31)							
Caldera de Cuitzeo (112)	1 705	85	8	0.8	W	Rávico	10
LEON, GTO. (21.07-101.40)							
Comanjilla (33).....	1 915	94	7	22.0	S79W	Lígvico	21
APASEO, GTO. (20.33-100.42)							
San Bartolo (26).....	1 800	93.3	3	4.0	S	Lígvico	10
TECOZAUTLA, HGO. (20.33-99.43)							
Pathé (27).....	1 665	100	3	9.0	N55W	Lívico	43
Mothó.....	1 670	60	2	7.5	N39W	Lívico	42
Tarshidhó (32).....	1 586	48	6	7.5	N16W	Lívico	43
TEMAXCALCINGO (19.55-99.56)							
Tepetongo (11).....	2 316	32	15	18.0	N80W	Rásico	22

En la Tabla 2 aparece la composición química de algunas de estas aguas, y precediéndola los nombres de los manantiales correspondientes a los números que encabezan las columnas.

Lista de las emergencias que aparecen en la Tabla Núm. 2 a las que se refieren los números que encabezan las columnas.

1. Laguna de Los Azufres.
2. Manantial San Alejo.
3. Laguna de Los Azufres.
4. Laguna de Los Azufres, Geiser del W.
5. Laguna Larga.
6. Pozo de El Salitre de Ixtlán.
7. Baño Grande Ixtlán.
8. Pozo Blanco de Ixtlán.
9. Pozo Verde de Ixtlán.
10. Baño Viejo de Ixtlán.
11. Baños de Tepetongo.
12. Cuitzeo de Abasolo, Gto.
13. Laguna de los Volcanes, B. C.
14. Devils Inkpot Yellowstone National Park.
15. Bench Spring, Yellowstone, National Park.
16. Yellow Lake, crater del Taal, Luzzon, Filipinas.
17. El Currutaco.
18. Laguna Verde.
19. Laguna Larga.
20. Baños de Huingo.
21. Hervideros de Zimirao.
22. Baños de San Juan.
23. Hervideros de San Agustín.
24. Laguna del Platanal.
25. Hervideros de lodo de Jiquilpan.
26. Hervideros de San Bartolo, Apaseo.
27. Hervideros de Izi-Pathé.
28. Ajolotes.
29. Taimeo.
30. El Paraíso, San José Purúa.
31. San José Purúa.
32. Tashidhó.
33. Comanjilla.
34. Atzimba 1945.
35. San Lorenzo 1932.
36. San Lorenzo 1944.
37. Jaripeo 1932.
38. Jaripeo 1944.
39. San José Purúa 1942.
40. Cointzio, Morelia, 1932.

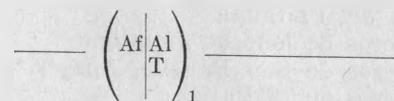
Tabla Núm. 2
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	1	2	3	4	5
Cl.	—	10	21	21	7
SO ₄	181	31	618	258	44
SO ₄ libre	193	—	—	—	—
Na.	60	8	70	38	14
K.	19	1	50	55	13
Li.	—	—	—	—	—
Ca.	9	8	3	15	2
Mg.	2	2	—	—	—
Fe.	2	—	4	—	—
SiO ₂	236	134	—	—	—
Residuo	761	271	—	—	—

VALORES DE REACCIÓN — Mg. POR LITRO

Ácidos fuertes (Af)	3.76	0.93	4.59	5.97	1.12
Ácidos débiles (Ad)	—	—	—	—	—
Alcalis (Al)	3.11	0.35	4.34	5.23	0.96
Tierras alcalinas (T)	0.65	0.58	0.15	0.74	0.12



PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁)	6.22	0.70	8.64	10.46	1.92
Salinidad secundaria (S ₂)	1.30	1.16	0.30	1.48	0.24
Alcalinidad secundaria (A ₂)	—	—	—	—	—
Salinidad total	7.52	1.86	9.18	11.94	2.24
Concentración	1.50	0.37	1.84	2.39	0.48
Unidades Curie (10 ⁻¹²)	116	—	—	—	—
Núm. Larios	47	27	47	47	47

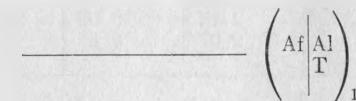
Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	6	7	8	9	10
Cl.	240	443	436	471	436
SO ₄	293	229	253	292	249
SO ₄ libre	—	—	—	52	—
Na.	383	350	341	437	354
K.	24	18	22	6	24
Li.	3	3	3	—	3
Ca.	15	20	24	20	17
Mg.	—	—	—	—	—
Fe.	1	—	—	1	—
SiO ₂	204	195	204	240	186
Residuo	1 443	1 474	1 442	1 588	1 386

VALORES DE REACCIÓN — Mg. POR LITRO

Ácidos fuertes (Af)	18.47	17.17	17.30	19.4	17.37
Ácidos débiles (Ad)	—	—	—	1.3	—
Alcalis (Al)	17.69	16.15	16.06	19.1	16.51
Tierras alcalinas (T)	0.77	1.02	1.24	1.6	0.86



PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁)	35.38	32.30	32.12	38.20	33.02
Salinidad secundaria (S ₂)	1.56	2.04	2.48	0.60	1.72
Alcalinidad secundaria (A ₂)	—	—	—	2.60	—
Salinidad total	36.94	34.34	34.60	41.40	34.74
Concentración	7.35	6.87	6.93	8.29	6.95
Unidades Curie (10 ⁻¹²)	—	—	—	—	—
Núm. Larios	45	44	44	45	44

Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	11	12	13	14	15
Cl.	66	172	7 850	—	—
SO ₄	15	165	814	6	138
HCO ₃	123	—	—	2 279	—
HPO ₄	—	—	—	—	—
CO ₂ libre	—	—	—	43	—
Na.	38	183	4 465	980	57
K.	19	42	988	79	10
Li.	—	—	—	—	—
Ca.	25	12	336	39	—
Mg.	10	3	11	12	—
Fe.	—	—	—	—	—
Al ₂ O ₃	—	—	38	—	—
SiO ₂	27	79	167	89	241
Residuo	264	960	—	3 365	—

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af)	2.17	8.89	237.9	47.28	2.81
Acidos débiles (Ad)	2.03	—	—	—	—
Alcalis (Al)	2.14	8.02	220.30	44.01	2.81
Tierras alcalinas (T)	2.07	0.87	17.60	2.94	—

$$\left(\begin{array}{c} \text{Af} \\ \text{Al} \\ \text{T} \end{array} \right)_1$$

PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁)	4.28	16.04	440.6	88.02	5.62
Salinidad secundaria (S ₂)	—	1.74	35.2	5.88	—
Alcalinidad secundaria (A ₂)	4.08	—	—	—	—
Salinidad total	8.42	17.78	475.8	94.56	5.62
Concentración	1.68	3.56	95.0	18.90	1.12
Radioactividad	—	—	—	—	—
Unidades Curie	—	—	—	—	—
Ph.	—	—	—	—	—
Núm. Larios	32	45	44	47	47

Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	16	17	18	19	20
Cl.	12 755	7	—	596	472
SO ₄	2 564	412	146	514	57
NO ₃	—	—	—	12	—
HCO ₃	—	—	—	314	233
HPO ₄	340	—	1	—	—
CO ₂ libre	1 584	2 870	—	—	—
Na.	6 515	71	18	665	362
K.	372	4	6	52	2
Li.	—	—	—	8	8
Ca.	151	31	22	28	28
Mg.	264	41	11	—	—
Fe.	211	6	81	—	—
Al ₂ O ₃	—	—	4	—	—
SiO ₂	640	544	168	61	164
Residuo	26 989	4 984	816	2 310	1 276

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af)	412.95	8.78	3.04	27.69	14.51
Acidos débiles (Ad)	10.74	—	—	5.15	3.92
Alcalis (Al)	292.97	3.41	0.92	31.43	16.99
Tierras alcalinas (T)	29.23	4.96	1.98	1.38	1.42

$$\left(\begin{array}{c} \text{Af} \\ \text{T} \\ \text{Al} \end{array} \right)_2$$

PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁)	585.94	6.82	3.96	55.38	29.02
Salinidad secundaria (S ₂)	58.46	9.92	1.84	—	—
Alcalinidad primaria (A ₁)	—	—	—	7.48	4.96
Alcalinidad secundaria (A ₂)	—	—	—	2.32	2.88
Salinidad total	847.00	17.56	6.14	65.68	36.86
Concentración	109.50	—	1.23	13.13	7.37
Radioactividad	—	—	—	—	—
Unidades Curie	—	116.4	5.5	—	303.3
Ph.	—	4.6	2.9	8.3	—
Núm. Larios	44	57	07	45	44

Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	21	22	23	24	25
Cl.	1 102	241	223	472	559
SO ₄	141	560	479	334	580
NO ₃	—	40	1	—	—
HCO ₃	269	903	750	464	886
Na.....	777	644	637	533	708
K.....	30	24	22	17	56
Li.....	20	4	4	4	—
Ca.....	21	88	12	54	151
Mg.....	—	5	—	12	31
Fe.....	—	—	—	—	24
SiO ₂	256	214	273	191	160
Residuo.....	2 676	2 727	1 937	1 970	2 708

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af).....	34.02	25.34	16.25	20.20	27.88
Acidos débiles (Ad).....	4.56	14.83	12.30	7.70	14.55
Alcalis (Al).....	37.50	29.23	24.49	24.22	32.23
Tierras alcalinas (T).....	1.04	4.83	0.58	3.68	10.08



PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁).....	63.04	50.68	32.50	40.40	55.64
Alcalinidad primaria (A ₁).....	6.96	7.78	16.48	8.04	8.82
Alcalinidad secundaria (A ₂).....	2.16	9.66	8.12	7.36	—
Salinidad total.....	77.16	68.12	57.10	55.80	84.62
Concentración.....	15.40	13.60	11.40	11.17	16.92
Unidades Curie.....	63.1	—	—	597.1	—
Ph.....	6.9	—	7.2	6.1	—
Núm. Larios.....	44	43	49	40	40

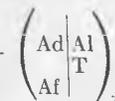
Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	26	27	28	29	30
Cl.	100	118	21	2	163
SO ₄	166	143	96	18	13
NO ₃	—	—	—	—	2
HCO ₃	289	290	217	143	950
Na.....	46	148	100	31	269
K.....	136	46	10	6	4
Li.....	9	—	6	—	9
Ca.....	55	40	14	12	26
Mg.....	23	23	—	6	66
Fe.....	16	24	—	—	—
SiO ₂	89	202	148	120	128
Residuo.....	819	1 064	587	277	1 175

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af).....	6.32	6.29	2.61	0.43	4.89
Acidos débiles (Ad).....	5.60	4.76	3.61	2.40	15.60
Alcalis (Al).....	6.70	7.01	5.42	1.51	12.25
Tierras alcalinas (T).....	5.22	4.04	0.68	1.07	6.75



PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁).....	12.64	12.58	5.22	0.86	9.78
Alcalinidad primaria (A ₁).....	0.76	1.44	5.62	2.16	14.72
Alcalinidad secundaria (A ₂).....	10.44	8.08	1.60	2.64	16.48
Salinidad total.....	23.84	22.10	12.44	5.66	40.98
Concentración.....	4.78	4.42	2.49	1.00	8.00
Unidades Curie.....	—	—	—	411.3	—
Ph.....	—	—	6.1	6.5	—
Núm. Larios.....	00	30	49	31	51

Tabla Núm. 2 (continúa)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	31	32	33	34	35
Cl.	134	10	26	19	21
SO ₄	75	10	45	—	46
NO ₃	—	—	—	1	—
HCO ₃	2 667	139	357	90	1 293
HOP ₄	—	—	21	—	—
Na.....	827	41	75	14	208
K.....	168	3	36	2	23
Li.....	—	—	5	—	—
Ca.....	118	14	20	8	146
Mg.....	36	3	11	3	97
Fe.....	—	—	14	—	50
SiO ₂	154	58	134	96	122
Residuo.....	2 828	238	549	250	1 323

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af).....	5.32	0.54	1.67	0.54	1.61
Acidos débiles (Ad).....	43.73	2.28	6.13	1.46	22.63
Alcalis (Al).....	40.23	1.87	4.90	0.67	9.22
Tierras alcalinas (T).....	8.82	0.97	1.90	0.69	14.62

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ad T} \\ \text{Al} \end{array} \right)_5$$

PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁).....	10.64	1.08	3.34	1.08	3.22
Alcalinidad primaria (A ₁).....	69.82	2.66	8.46	0.26	15.22
Alcalinidad secundaria (A ₂).....	17.64	1.90	3.80	1.38	29.24
Salinidad total.....	98.10	5.64	15.60	4.00	47.68
Concentración.....	19.65	1.13	3.02	0.80	9.56
Unidad Curie.....	—	—	—	186.7	—
Ph.....	—	—	—	7.1	—
Núm. Larios.....	41	31	31	31	01

Tabla Núm. 2 (concluye)
ANÁLISIS QUÍMICOS DE AGUAS

MILIGRAMOS POR LITRO

	36	37	38	39	40
Cl.	11	21	8	162	11
SO ₄	—	46	—	8	3
HCO ₃	1 395	1 293	843	256	353
Na.....	103	208	85	245	60
K.....	1	23	1	25	4
Ca.....	173	146	105	125	26
Mg.....	122	97	62	93	21
Fe.....	—	50	—	2	—
SiO ₂	129	122	100	133	79
Residuo.....	1 268	1 323	890	1 412	571

VALORES DE REACCION — Mg. POR LITRO

Acidos fuertes (Af).....	0.32	1.61	0.24	4.72	0.41
Acidos débiles (Ad).....	22.88	22.23	13.83	20.56	4.79
Alcalis (Al).....	4.53	9.22	3.72	11.33	2.70
Tierras alcalinas (T).....	18.66	14.62	10.33	13.92	3.49

$$\left(\begin{array}{c} \text{Ad T} \\ \text{Al} \end{array} \right)_5$$

PROPIEDADES

Salinidad primaria (S ₁).....	0.62	3.22	0.48	9.44	0.82
Alcalinidad primaria (A ₁).....	8.42	15.22	6.96	13.22	4.58
Alcalinidad secundaria (A ₂).....	37.34	29.24	20.70	27.90	5.00
Salinidad total.....	46.78	47.68	28.14	50.56	10.40
Concentración.....	9.38	9.56	5.01	10.10	2.00
Unidades Curie.....	—	—	—	11.0	244.3
Ph.....	6.4	—	6.7	6.8	6.8
Núm. Larios.....	81	01	01	01	01

Antes de presentar las fórmulas comparativas de los análisis explicados en un trabajo anterior del autor de este estudio ¹¹ y en otras publicaciones ¹² se hará una breve descripción de ellas para facilitar su aplicación.

Se escribe primero el radical que tenga el mayor valor y a su derecha el que tenga el valor inmediato inferior si es del grupo opuesto. Si es del mismo grupo, supongamos aniones, se escribe abajo del primero, después el tercer radical en orden decreciente, teniendo cuidado de que en un lado queden los aniones y en el otro los cationes; pero haciendo siempre que los valores vayan disminuyendo de izquierda a derecha y de arriba abajo.

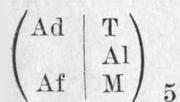
Los radicales se expresan en equivalentes de miligramos de hidrógeno. Los símbolos usados son:

Radicales positivos o cationes

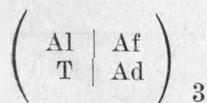
- Al Alcalis
- T Tierra alcalina
- M Metales

Radicales negativos o aniones

- Af Acidos fuertes
- Ad Acidos débiles

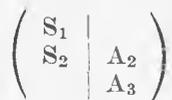


La fórmula 5 expresa que los ácidos débiles tienen el valor más alto de reacción y que los siguen en magnitud las tierras alcalinas, álcalis, ácidos fuertes y metales.



La fórmula 3 expresa que los alcalinos tienen el valor mayor y que les siguen los ácidos fuertes, tierras y ácidos débiles.

Se denomina también S₁ la salinidad primaria, S₂ la salinidad secundaria, A₁ la alcalinidad primaria, A₂ la alcalinidad secundaria y A₃ la alcalinidad terciaria. La fórmula:



Expresa que la salinidad primaria es la mayor, siguiéndole la salinidad secundaria y las alcalinidades secundarias y terciarias.

Como ejemplo de aplicación de estas ideas se incluye el análisis 30 de San José Purúa.

INSTITUTO DE GEOLOGIA

Análisis de Aguas

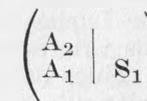
Análisis Núm. 30, colectada por el Ing. José Gómez Tagle. Marzo, 1945, procedente de las fuentes termales de El Paraíso. Balneario de San José Purúa. Municipalidad de Zitácuaro, Mich.

Mg. por litro	Coeficiente reacción	Valores de reacción			Porcentaje	Fórmula
		-	+	Radicales		
Cl.....	163.3	0.0282	4.60			$\left(\begin{array}{c c} \text{Ad} & \text{Al} \\ \text{Af} & \text{T} \end{array} \right)$
SO ₄	12.8	208	0.27			
NO ₃	1.0	161	0.02	4.89 Af	11.9	
HCO ₃	949.9	164	15.60	15.60 Ad	38.1	
Na.....	269.4	435		11.70		
K.....	3.8	256		0.09		
Li.....	3.2	1441		0.46	12.25 Al	
Ca.....	26.0	499		1.30		
Mg.....	66.3	822		5.45		
Otros.....	—	—		1.49	8.24 T	
Residuo...	1 675.2		20.49	20.49	40.98	100.0

Propiedades

Salinidad primaria 11.9 Af + 11.9 Al = 23.8 S₁
 Alcalinidad primaria 29.9 Al - 11.9 Af + 18 Ad = 36.0 A₁
 Alcalinidad secundaria 20.1 T + 20.1 Ad = 40.2 A₂
 100.0

Fórmula



$$\text{Concentración} = \frac{\text{Salinidad total}}{\text{Salinidad normal}} = \frac{40.98}{5} = 8.2$$

Atendiendo a las fórmulas de las aguas de Ixtlán de los Hervores, 6-10 se ve que hay identidad de origen, pues corresponden a la fórmula 1, que señala la mayor actividad química, se podría decir, juventud. Es de llamar la atención, que precisamente esas aguas sean las de menor concentración (11 p. 36).

Las aguas de los manantiales 17-18 tienen la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Af} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \end{array} \right)_2$$

Puede verse que los álcalis pasan al tercer lugar. Un grado aún menor de actividad, corresponde a la fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Al} & \text{Af} \\ \hline \text{T} & \text{Ad} \end{array} \right)_3$$

donde los álcalis ocupan el primer lugar, como ocurre en las aguas del balneario de Huingo 20 y las 19 a 27.

En cuarto lugar, mostrando consanguinidad con estas aguas están las de Ajolotes 28, y las del 29 al 33, cuya fórmula es:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{Al} \\ \hline \text{Af} & \text{T} \end{array} \right)_4$$

Vienen al final las aguas de fórmula:

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline \text{Af} & \text{M} \end{array} \right)_5$$

que corresponden a los manantiales 34 ó 40 de Jaripeo, de San José Purúa, San Lorenzo y otros. Figura Núm. 2.

METODO LARIOS

Para completar la identificación de estas aguas, se utilizará el método del distinguido geoquímico don Hermión Larios, que aparece publicado en la revista *Ingeniería Hidráulica*.¹²

El señor Larios reduce los valores de los aniones a porcientos y, asimismo, los valores de los cationes. En cuanto a los primeros, coloca el grupo de ácidos débiles representado por HCO_3 en el vértice superior *A*, de un triángulo equilátero, cuya base se apoya en el eje *O-X*; al grupo SO_4 lo coloca en el origen *C* de ejes coordenados cartesianos, y al grupo *Cl* y demás ácidos fuertes, en el vértice más alejado *B*. (Fig. 3.)

Para situar los puntos dentro del triángulo se sigue el método gráfico explicado por Larios; pero el cálculo es tan simple que en la mayoría de los casos es preferible recurrir a él. Si el punto debe situarse atendiendo a las relaciones: $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$, se partirá del vértice del triángulo *Ca* (Fig. 4) y se medirán *Na* de *Ca* hacia *Na* marcando el punto provisional *b*. Después se trazará una paralela a $\text{Ca} \rightarrow \text{Mg}$ y se

medirá a partir de *b* la magnitud *Mg*, marcando el punto definitivo que representa los cationes, bases o radicales positivos.

Si se trata de la relación $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg}$, se medirá *Ca* sobre la línea $\text{Na} \rightarrow \text{Ca}$, situando un punto provisional y trazando desde éste una paralela a *Mg*, *Ca* para medir desde él la magnitud *Mg*.

En las Figuras 5 a 8 se marcan los casos de situación de puntos. De ellos se deduce la regla de que la primera línea está marcada por el mayor valor y el que le sigue, tomando la magnitud mayor a partir del vértice correspondiente a la segunda magnitud, para trazar desde ese punto una línea paralela al lado del triángulo que marca los valores de segunda y tercera magnitud y sobre ella se mide ésta, a partir del lado que sirvió para trazar la primera línea.

Las fórmulas para calcular las coordenadas de los puntos se consignan en las mismas figuras.

La originalidad del señor Larios estriba en haber dividido el triángulo equilátero en diez partes iguales, tal como lo muestra la Fig. 3, con la numeración indicada en ella, que permite la clasificación centesimal. Cuando el punto de los cationes de un análisis cae dentro de una de estas áreas, toma su número y lo propio ocurre con el punto de los aniones; así se tienen dos números que permiten escribir decenas y unidades, llegando hasta el 99.

Para dar expresión a estos números, el Sr. Larios determina, con su método, la posición de los puntos, de tal manera que cuando el de los aniones cae cerca del vértice *A*, indica su alto contenido en HCO_3 , en el área 1. Si domina el *Cl*, cae en la porción 4, cerca del vértice *B*, y si el SO_4 , el punto queda en la porción 7. A medida que el punto se aleja de un vértice, disminuye el contenido de ese radical, sea que se trate de los aniones o de los cationes y cuando queda dentro del área 0, los radicales son casi del mismo valor o iguales si el punto ocupa el centro del triángulo. En cualquier caso, es fácil interpretar el significado del número que le corresponde a una agua, en vista de su análisis químico.

Situando los aniones de los análisis presentados, se ve que las aguas de la mayor parte de las emergencias de la sierra de San Andrés, quedan sobre la línea $\text{SO}_4 - \text{Cl}$ correspondiéndoles como segundo número el 4 o el 7, pues las de laguna Verde, laguna Larga o el Currutaco, tienen SO_4 en tal abundancia que además del combinado, lo hay libre.

Las aguas de Ixtlán de los Hervores, contienen además *Cl*; pero el SO_4 continúa en primer lugar. En la tabla Núm. 2 se dan también los números de Larios. En la Fig. 4 están situados los cationes.

En las inmediaciones de los hervideros de San Agustín, se encuentran eflorescencias, cuya composición se muestra en el análisis que se adjunta. Su fórmula característica es

$$\left(\begin{array}{c|c} \text{Al} & \text{Af} \\ \hline \text{T} & \text{Ad} \end{array} \right)$$

igual a la del agua del manantial referido.

Como en la recolección de la muestra se mezclaron impurezas, puede verse en el análisis un alto contenido de arcilla, expresada en Al_2O_3 y SiO_2 . El Sr. Raúl Lozano se refiere a estas sales (9. p. 96). En otro trabajo del mismo autor se da idea de la clase de minerales que se encuentran en eflorescencias de igual naturaleza (14. p. 36-51).

Análisis número 11091

Eflorescencias procedentes de los manantiales de los Hervideros de San Agustín en Cuitzeo, Edo. de Michoacán:

	%
Sílice (SiO_2)	21.92
Sulfúrico (SO_3)	22.33
Cloro (Cl)	1.00
Carbónico (CO_2)	5.50
Oxido férrico (Fe_2O_3)	1.82
Oxido de aluminio (Al_2O_3)	12.19
Oxido de calcio (CaO)	3.85
Oxido de magnesio (MgO)	0.83
Oxido de sodio (Na_2O)	20.38
Oxido de potasio (K_2O)	0.14
Agua a 110°	6.29
Pérdida por calcinación	3.68

REPRESENTACION DE LOS ANALISIS POR UN PUNTO

Para abreviar más aún la representación gráfica de los análisis, se ha creído conveniente que un solo punto los represente en vez de dos y para ello se aplica la combinación de los radicales en la forma propuesta por Palmer,¹⁵ recalculando las propiedades que él distingue en porcientos y atendiendo solamente a las tres de mayor cuantía, según el análisis. Estas propiedades son: salinidad primaria, símbolo S_1 ; salinidad secundaria, S_2 ; alcalinidad primaria, A_1 ; alcalinidad secundaria, A_2 , y en algunos casos alcalinidad terciaria, A_3 que aquí no se toma en cuenta.

Atendiendo a las cuatro propiedades más comunes para la situación de los puntos se requiere un rombo (Fig. 9), pero fundamentalmente se utiliza el triángulo, ya que la figura puede dividirse en dos partes: una formando el triángulo $S_2 A_2 S_1$ y la otra el triángulo $A_2 A_1 S_1$. Al reunir las sólo se ha evitado la repetición del lado común $A_2 S_1$.

Tratándose del triángulo invertido $S_2 A_2 S_1$, las fórmulas para el cálculo de las coordenadas se consignan en la Fig. 8.

Si sólo existe una propiedad, la representación se reduce a un punto en el vértice correspondiente del triángulo; si existen dos, el punto quedará en la línea del triángulo, que une los vértices marcados con

las respectivas propiedades. El agua 15, de Bench Spring tiene solamente S_1 , las aguas 1 a 8 de la sierra de San Andrés y de Ixtlán, así como otras que pueden verse en la tabla Núm. 2, tienen S_1 y S_2 .

En la Tabla Núm. 3 se dan los porcientos de salinidades y alcalinidades que han servido para situar los puntos.

En la Fig. 9 se han situado los puntos correspondientes a los análisis que figuran en la Tabla Núm. 2.

Se deja para los investigadores el estudio de la relación de posición y la significación de ella en cuanto a la interpretación geoquímica, ya que se trazan líneas de trayectorias muy interesantes, como la marcada por los puntos 19, 20, 24, 30, 36.

La línea 9, 19, 20, 24, 30, 36, es elíptica y parte de altos valores de S_1 a magnitudes igualmente grandes de A_2 , con un incremento máximo en su parte media de A_1 . Pasa de las aguas de las lagunas de la sierra de San Andrés a los manantiales de San Lorenzo, fuertemente carbonatados. Su ley de variación quizá esté expresada por la ecuación de la curva, en cuyo caso se tendría:

$$y_1 = \frac{A_1}{S_1 - A_2} \sqrt{A_1^2 - X_1^2}$$

$$X_1 = \frac{S_1 - A_2}{A_1} \sqrt{(S_1 - A_2)^2 - y_1^2}$$

$$y = X_1 \operatorname{sen} \varphi - y_1 \operatorname{sen} \varphi$$

$$X = X_1 \operatorname{cos} \varphi + y_1 \operatorname{cos} \varphi$$

En estas fórmulas X_1 representaría el tiempo que podrá tomarse en cuenta si se determina para cualquier intervalo de la trayectoria y deducirse para la totalidad o bien conociendo el lapso completo en que ocurrió la variación y en seguida poder aplicar las fórmulas para cualquier tiempo intermedio. En este caso habría que saber qué tiempo ha transcurrido desde la aparición de las primeras solfataras con aguas del tipo 15 ó 9, hasta la producción de aguas del tipo 36 manantiales de San Lorenzo, en el supuesto de que ambas fueran de igual composición inicialmente, permaneciendo la primera sin variación notable, mientras que la última evoluciona rápidamente. También podrá determinarse la variación relacionada al tiempo si se hacen análisis de la misma agua con el intervalo mayor del mismo, se sitúan los puntos conforme al método que se está describiendo y se calculan las variaciones en la X .

En la figura 9 puede verse que del tronco 9, 19, 21, parten ramas que sugieren una evolución principal hacia A_2 , alcalinidad secundaria, con una tendencia también hacia A_1 , alcalinidad primaria. Hay líneas casi paralelas a $A_1 - A_2$ que marcan la evolución de A_1 a A_2 y líneas

convergentes a A₁ mostrando la tendencia del cambio de salinidad primaria a alcalinidad primaria.

En todos los casos las curvas obtenidas, con los trazos, permiten encontrar relaciones matemáticas entre los análisis y hacer muy variadas interpretaciones.

Tabla Núm. 3
PORCIENTO DE SALINIDADES Y ALCALINIDADES

	S ₁	S ₂	A ₁	A ₂	X	Y
1	82.6	17.4	—	—	—	—
2	37.6	62.4	—	—	—	—
3	94.2	5.8	—	—	—	—
4	87.8	12.2	—	—	—	—
5	85.6	14.4	—	—	—	—
6	95.8	4.2	—	—	—	—
7	94.1	5.9	—	—	—	—
8	92.9	7.1	—	—	—	—
9	92.3	1.4	—	6.3	1.9	13.7
10	95.1	4.9	—	—	—	—
11	50.7	—	—	49.3	—	—
12	90.2	9.8	—	—	—	—
13	92.8	7.2	—	—	—	—
14	93.8	6.2	—	—	—	—
15	100.0	—	—	—	—	—
16	93.1	6.9	—	—	—	—
17	43.5	56.5	—	—	—	—
18	70.0	30.0	—	—	—	—
19	84.2	—	11.4	4.4	18.0	3.8
20	79.0	—	13.4	8.6	25.3	7.4
21	88.2	—	9.0	2.8	19.1	2.3
22	74.5	—	11.4	14.1	42.8	7.9
23	57.0	—	28.8	14.2	50.2	12.3
24	72.4	—	14.4	13.2	34.2	15.5
25	89.5	—	10.5	—	—	—
26	53.0	—	3.2	43.8	48.4	2.8
27	57.0	—	6.5	36.5	46.7	5.6
28	42.1	—	45.1	12.8	51.5	11.1
29	14.6	—	38.8	46.6	62.1	40.0
30	23.8	—	36.0	40.2	51.0	34.9
31	10.8	—	71.2	18.0	70.2	15.6
32	19.1	—	47.2	33.7	64.1	29.2
33	23.4	—	52.2	24.4	64.4	21.2
34	39.7	—	9.6	—	69.8	34.2
35	6.8	—	31.9	61.3	62.6	53.1
36	2.2	—	18.0	79.8	57.9	69.2
37	6.7	—	31.9	61.4	32.6	53.2
38	1.7	—	24.7	73.6	60.5	63.8
39	18.6	—	26.2	55.2	53.8	47.6
40	7.9	—	44.1	48.0	68.9	41.6

Fig. 3
Aniones segun los analisis de la tabla N° 2

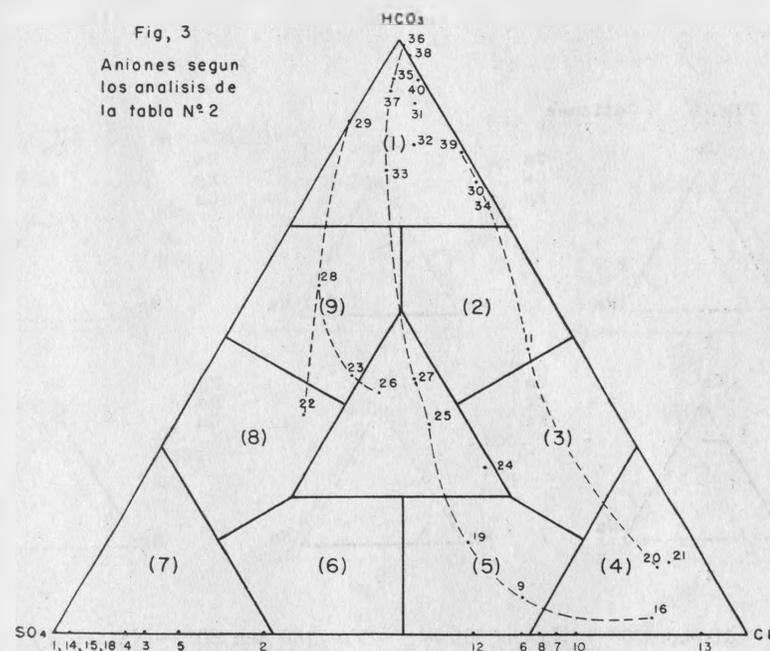


Fig. 4
Cationes segun los analisis de la tabla N° 2

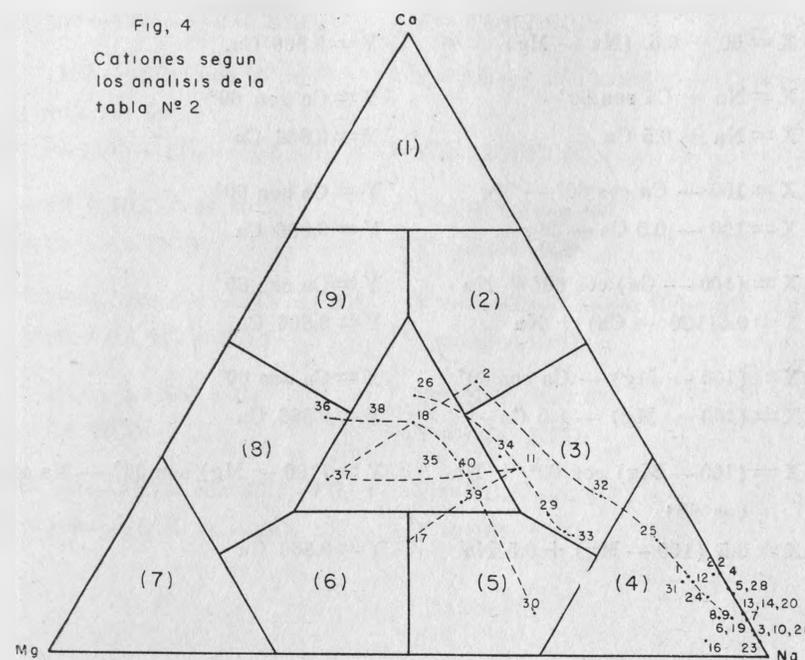
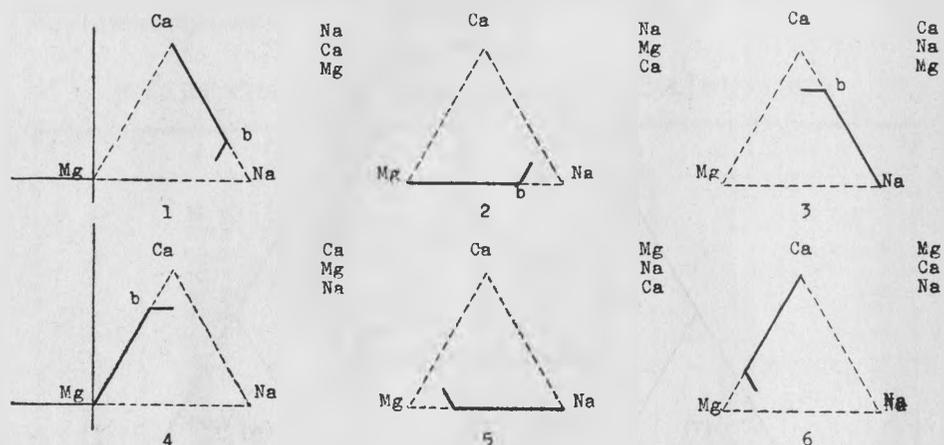
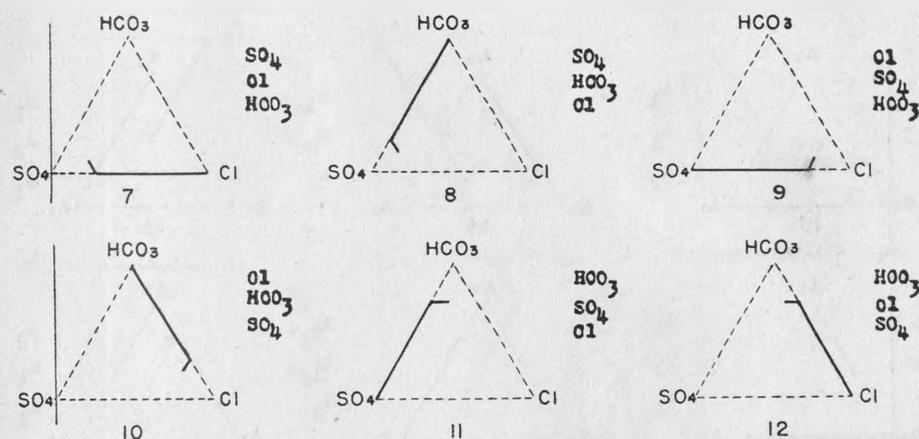


Fig. 5 Cationes



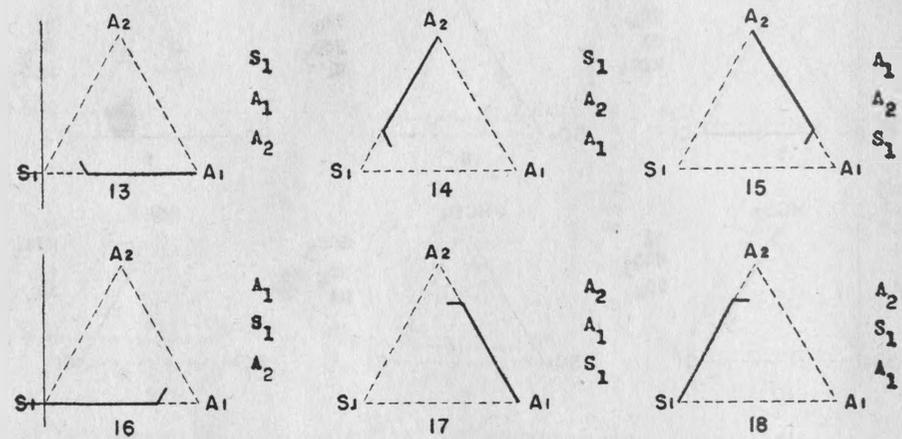
- (1) $X = 100 \cos 60^\circ + Na \cos 60^\circ - Mg \cos 60^\circ$
 $Y = 100 \sin 60^\circ - Na \sin 60^\circ - Mg \sin 60^\circ$
 $X = 50 + 0.5 (Na - Mg)$ $Y = 0.866 Ca$
- (2) $X = Na + Ca \sin 60^\circ$ $Y = Ca \sin 60^\circ$
 $X = Na + 0.5 Ca$ $Y = 0.866 Ca$
- (3) $X = 100 - Ca \cos 60^\circ - Mg$ $Y = Ca \sin 60^\circ$
 $X = 100 - 0.5 Ca - Mg$ $Y = 0.866 Ca$
- (4) $X = (100 - Ca) \cos 60^\circ + Na$ $Y = Ca \sin 60^\circ$
 $X = 0.5(100 - Ca) + Na$ $Y = 0.866 Ca$
- (5) $X = (100 - Mg) - Ca \cos 60^\circ$ $Y = Ca \sin 60^\circ$
 $X = (100 - Mg) - 0.5 Ca$ $Y = 0.866 Ca$
- (6) $X = (100 - Mg) \cos 60^\circ + Na$ $Y = (100 - Mg) \sin 60^\circ - Na \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 (100 - Mg) + 0.5 Na$ $Y = 0.866 Ca$

FIGURA 6 ANIONES



- (7) $X = 100 - SO_4 - HCO_3 \cos 60^\circ$ $Y = HCO_3 \sin 60^\circ$
 $X = 100 - SO_4 - 0.5 HCO_3$ $Y = 0.866 HCO_3$
- (8) $X = (100 - SO_4) \cos 60^\circ + Cl \cos 60^\circ$ $Y = 100 - SO_4 \sin 60^\circ - Cl \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 (100 - SO_4) + 0.5 Cl$ $Y = 0.866 HCO_3$
- (9) $X = Cl + HCO_3 \cos 60^\circ$ $Y = HCO_3 \sin 60^\circ$
 $X = Cl + 0.5 HCO_3$ $Y = 0.866 HCO_3$
- (10) $X = 50 + Cl \cos 60^\circ - SO \cos 60^\circ$ $Y = 2(100 - Cl) \sin 60^\circ - SO_4 \sin 60^\circ$
 $X = 50 + 0.5 (Cl - SO_4)$ $Y = 0.866 HCO_3$
- (11) $X = HCO_3 \cos 60^\circ + Cl$ $Y = HCO_3 \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 HCO_3 + Cl$ $Y = 0.866 HCO_3$
- (12) $X = 100 - HCO_3 \cos 60^\circ - SO_4$ $Y = HCO_3 \sin 60^\circ$
 $X = 100 - 0.5 HCO_3 - SO_4$ $Y = 0.866 HCO_3$

FIGURA 7 S₁ A₂ A₁



(13) $X = 100 - S_1 + A_2 \cos 60^\circ$ $Y = A_2 \sin 60^\circ$
 $X = 100 - S_1 + 0.5 A_2$ $Y = 0.866 A_2$

(14) $X = (100 - S_1) \cos 60^\circ + A_1 \cos 60^\circ$ $Y = (100 - S_1) \sin 60^\circ - A_1 \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 (100 - A_1)$ $Y = 0.866 A_2$

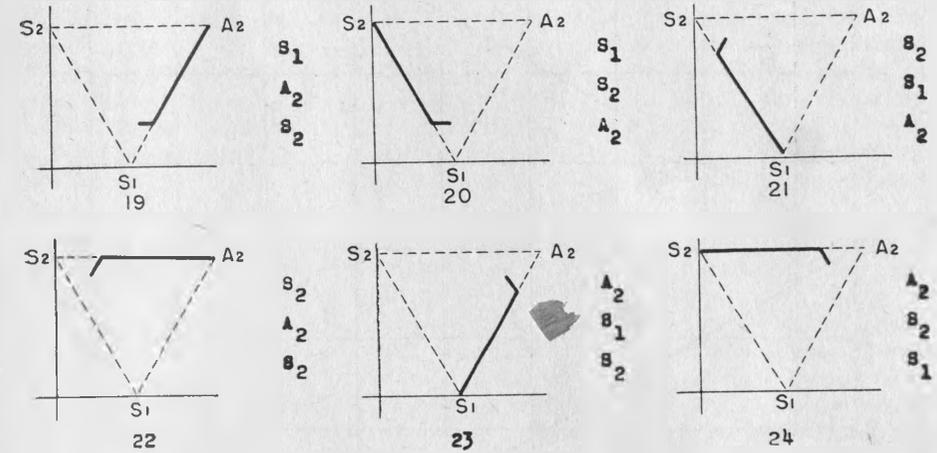
(15) $X = A_1 \cos 60^\circ - S_1 \cos 60^\circ$ $Y = (100 - A_1) \sin 60^\circ - S_1 \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 (A_1 - S_1)$ $Y = 0.866 A_2$

(16) $X = A_1 + A_2 \cos 60^\circ$ $Y = A_2 \sin 60^\circ$
 $X = A_1 + 0.5 A_2$ $Y = 0.866 A_2$

(17) $X = 100 - A_2 \cos 60^\circ - S_1$ $Y = A_2 \sin 60^\circ$
 $X = 100 - 0.5 A_2 - S_1$ $Y = 0.866 A_2$

(18) $X = A_2 \cos 60^\circ + A_1$ $Y = A_2 \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 A_2 + A_1$ $Y = 0.866 A_2$

FIGURA 8 TRIANGULO S₁, S₂, A₂



(19) $X = 100 - (S_1 \cos 60^\circ - S_2)$ $Y = (100 - S_1) \sin 60^\circ$
 $X = 100 - 0.5 S_1 - S_2$ $Y = 0.866 (100 - S_1)$

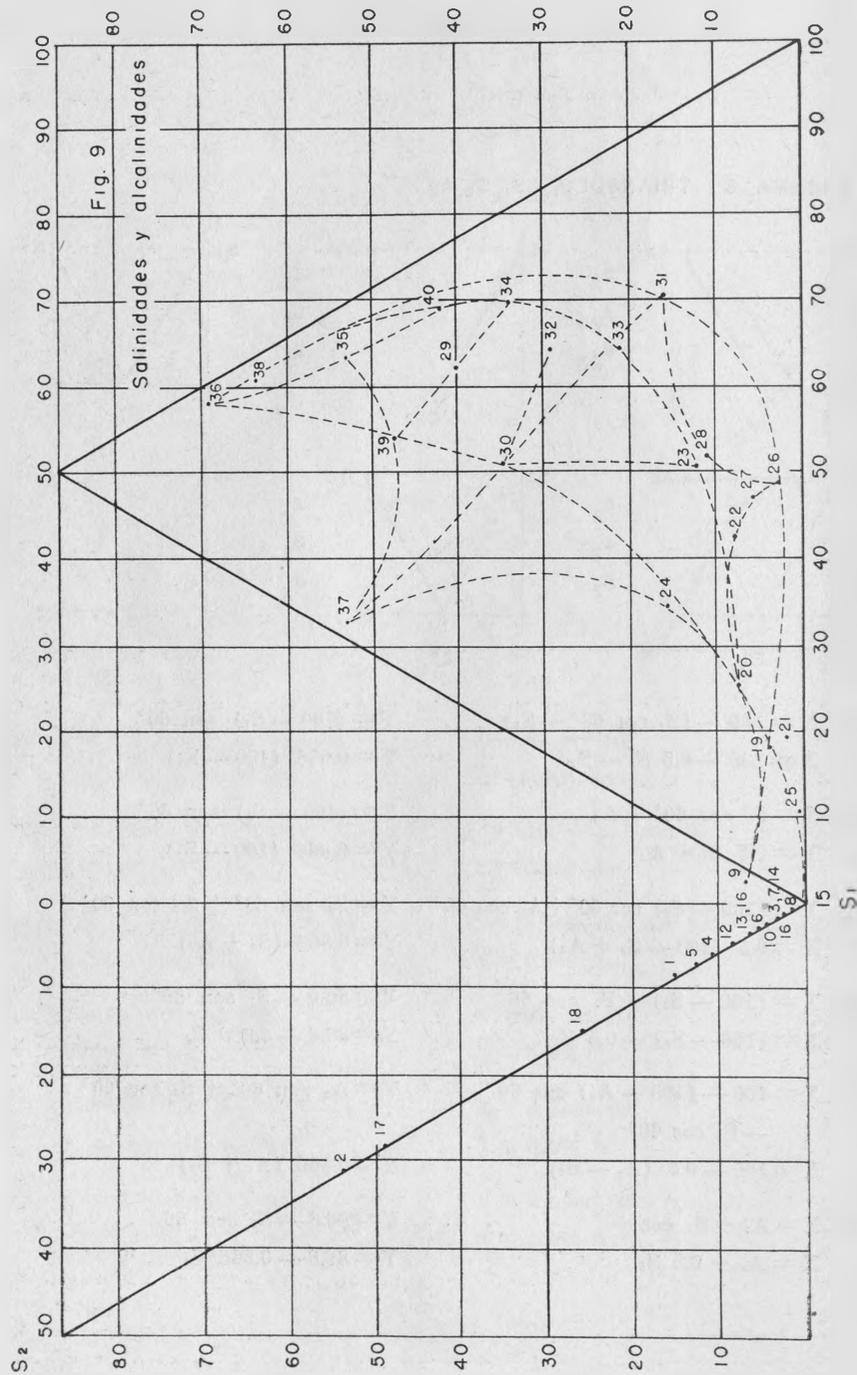
(20) $X = S_1 \cos 60^\circ + A_2$ $Y = (100 - S_1) \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 S_1 + A_2$ $Y = 0.866 (100 - S_1)$

(21) $X = (100 - S_2) \cos 60^\circ + A_2 \cos 60^\circ$ $Y = S_2 \sin 60^\circ + A_2 \sin 60^\circ$
 $X = 0.5 (100 - S_2 + A_2)$ $Y = 0.866 (S_2 + A_2)$

(22) $X = (100 - S_2) - S_1 \cos 60^\circ$ $Y = 86.6 - S_1 \sin 60^\circ$
 $X = (100 - S_2) - 0.5 S_1$ $Y = 86.6 - 0.866 S_1$

(23) $X = 100 - (100 - A_2) \cos 60^\circ -$ $Y = A_2 \sin 60^\circ + S_2 \sin 60^\circ$
 $- S_2 \cos 60^\circ$ $Y = 0.866 (A_2 + S_2)$
 $X = 100 - 0.5 (A_2 - S_2)$

(24) $X = A_2 + S_1 \cos 60^\circ$ $Y = 86.6 - S_1 \sin 60^\circ$
 $X = A_2 + 0.5 S_1$ $Y = 86.6 - 0.866 S_1$



Atendiendo a la composición del agua se presume que las del tipo $\left(\text{Af} \mid \begin{array}{c} \text{Al} \\ \text{T} \end{array} \right)$ y aun del tipo $\left(\text{Al} \mid \begin{array}{c} \text{Af} \\ \text{T} \end{array} \right)$ se ponen en contacto con ro-

cas calientes de intrusiones casi contemporáneas, es decir, holocénicas. No es de creerse que sean aguas juveniles, porque los moradores de la región han observado una relación íntima entre las temporadas de lluvias y secas y el gasto hidráulico de las emergencias. Algunas, como El Currutaco, es impresionante poco después de las lluvias, pues su agua hierve con energía y pequeñas columnas de vapor proyectan un lodo plumizo que se agita con violencia en un pozo que tiene el aspecto de un cratercito del tipo de los llamados volcanes de lodo, de unos 6 m. de diámetro. En la temporada de secas llega a secarse y permanecer completamente inactivo.

Todas las emergencias de la sierra de San Andrés, experimentan idénticas influencias de las temporadas indicadas, de manera que son las aguas de infiltración las que en su descenso llegan a las rocas calientes, adquieren elevada temperatura, disuelven las substancias solubles contenidas en los antiguos magmas y se elevan impulsadas por el vapor y los gases hasta la superficie del terreno, aprovechando las fracturas que llegan hasta las intrusiones referidas. En el caso de las emergencias de la sierra de San Andrés, donde las aguas subterráneas son bastante profundas, no es posible pensar en aguas brotantes, cuyo nivel piezométrico supere al del terreno en lugares tan elevados como los manantiales de San Alejo, Ajolotes o El Chino, debiéndose las emergencias hipertermales a la impulsión por gases y vapores. Por estas razones se clasifica a estas emergencias como lígvicas.

En el caso del manantial de San Alejo, hay concurrencia de aguas epifreáticas, de manera que en la misma poza del balneario se aprecia la llegada de agua fría por algunos orificios, tibia por otros y caliente por los demás. El manantial debiera clasificarse sin la contribución de las aguas calientes como lecmico; pero el predominio de las aguas termales hace que se clasifique como lígvico.

Puede verse en la tabla Núm. 2, que algunos materiales de la sierra de San Andrés tienen aguas sulfatadas cloruradas y que otros de fórmula semejante, de Ixtlán de los Hervores, tienen ya una proporción mayor de cloro, dominando todavía el sulfúrico. En los hervideros de lodo de Jiquilpan, el Cl supera al SO_4 y entonces aparece el carbónico como anión principal, por más que la fórmula es del tipo 3. Lo mismo ocurre con Izi-Pathé. En la laguna de Los Volcanes, B. C., el Cl también supera el SO_4 ; pero no aparece el carbónico. En otros manantiales, como los del lago de Cuitzeo, entre ellos los hervideros de San Agustín, el SO_4 domina al Cl; pero el carbónico es el anión principal. En manantiales de aguas más mezcladas, de fórmula 5, domina enteramente el carbónico, particularmente en San Lorenzo y Jaripeo. Estos manantiales, en condiciones normales, serían récmicos y por la intervención de los gases son rigvicos. En San Lorenzo es notable la efervescencia del agua por el desprendimiento de gas carbónico, y se deben mantener

abiertas las puertas del baño para evitar la intoxicación. Una emergencia semejante se encuentra en Pozo Hediondo, que también llaman "Mata Pájaros", donde perecen las aves que tratan de abreviar en la orilla del agua.

Algunas emergencias francamente volcánicas, de otros países, como las de Yellowstone National Park, son de aguas totalmente sulfúricas, aunque de baja concentración y contienen también SO_4 libre. Lo mismo puede decirse del volcán Taal, de Luzzon, Filipinas, que tiene gran concentración y bastante Cl, siendo de la fórmula 1.

Basados en estas observaciones se aventura la idea de que las aguas volcánicas o de contactos ígneos, son primordialmente sulfúricas, que pasan con el tiempo a una segunda etapa de dominio del cloro y, por último, a la supremacía del carbónico. Quizá se encuentre una relación definida de edad entre estas etapas. Ocurre también que a medida que se pasa de una etapa a otra disminuye la temperatura del agua, llegando hasta las aguas hipotermas. El hervidero de San Bartolo representa una excepción a esta regla, pues es carbónico e hipertermal, lo que puede explicarse suponiendo mayor masa de la intrusión, un lavado mayor de aguas de infiltración con poco efecto enfriador, o bien, la intervención de rocas calcáreas.

La presencia del cloro en las aguas volcánicas es tan evidente como la del sulfúrico. En el Parícutín, desde los primeros días que se observaron fumarolas, el Cl fue más abundante que el SO_4 . En cuanto al HCO_3 , pudiera deberse a la reacción de uno u otro ácido en presencia de rocas calcáreas, sobre todo cuando se desprende con abundancia como en el caso de los manantiales de San Lorenzo 35 y 36 y Jarípeo 37 y 38. En la mayoría de los casos de manantiales con predominio de HCO_3 , las aguas meteóricas lo disuelven, principalmente en los suelos orgánicos y cargados con ácidos orgánicos del humus, reaccionan en presencia de rocas calcáreas con el desprendimiento del

carbónico. La gran mayoría de las aguas de la fórmula $\left(\begin{array}{c|c} \text{Ad} & \text{T} \\ \hline & \text{Al} \end{array} \right)$

en general son comunes, de régimen hidrológico claro y sin intervención alguna de vulcanismo. Las que se han estudiado, no obstante, sí tienen influencia volcánica, como lo demuestra la desusual abundancia de carbónico y el desprendimiento de estos gases.

El ascenso de las aguas lígicas a la superficie del terreno, está asociado al desprendimiento de gases y vapores y, en la mayoría de los casos, no producen gastos hidráulicos o los tienen insignificantes.

Un aspecto interesante de la explotación del azufre lo presenta el señor Lozano en el trabajo que ya se ha citado (9. p. 101-104).

Es de mencionarse que en el llenamiento de las vetas intervinieron también aguas cargadas de sulfúrico, que dieron lugar a la importante zona de los sulfuros.

Podrían adelantarse muchas hipótesis sobre genética de fumarolas y solfataras, pero por ahora se cree que baste con presentar algunas

ideas sobre los fenómenos postparoxísmicos de la sierra de San Andrés y sus relaciones con las fracturas y el vulcanismo de esta parte de México.

La "Serranía del Anáhuac", de la que forma parte la sierra de San Andrés, con sus majestuosos volcanes, el Popocatepetl, el Nevado de Toluca y el Volcán de Colima, con sus millares de conos volcánicos, muchos casi intactos, con su vulcanismo de ayer, el Jorullo y de hoy el Parícutín, es un grandioso escenario del vulcanismo.

BIBLIOGRAFIA

- ¹ *Importancia del Eje Volcánico*, por Pedro C. Sánchez, "Gala" 1935. Inst. Panm. de Geog. e Historia. Publ. 11.
- ² *Orogénesis de la República Mexicana en relación a su relieve actual*, por Ramiro Robles Ramos. Com. Nal. de Irrig. Mayo-junio, 1942.
- ³ *La Hidrogeología en México*, por Luis Blásquez L. Rev. Mex. de Ing. y Arq. Vol XX, N° 12. 1942, p. 555.
- ⁴ *Structural Symmetry in North America*, by Arthur Keith. Am. Geol. Soc. Bull. Vol. 39 (1938), p. 333.
- ⁵ *El Volcán de Colima y el Ceboruco*, por Ezequiel Ordóñez. Mem. y Rev. de la Soc. Cient. Antonio Alzate. T. II, 1888.
- ⁶ *Hidrogeología del valle de Morelia*, por Apolinar Hernández, An. Inst. de Geol. T. VI, 1936.
- ⁷ *Estudio Geológico Minero de los Distritos de El Oro y Tlalpujahuá*, por Teodoro Flores. Inst. Geol. de Méx. Bol. 37, 1920.
- ⁸ *Geología Minera de la región NE del Estado de Michoacán*, por Teodoro Flores. Inst. Geol. de Méx. Bol. 52, 1946.
- ⁹ *Hidrogeología y minerales no metálicos de la zona norte del Edo. de Michoacán*, por L. Blásquez L. y Raúl Lozano García. Inst. Geol. de Méx. Anales. T. IX, 1946.
- ¹⁰ *Nouvelle Classification des Sources*, por Luis Blásquez L. Congrès Géologique International. Comptes Rendus de la Dix-Neuvième Session. Section VIII. L'Hydrogéologie des Régions arides et Sub-Arides. Fascicule VIII. Alger, 1953.
- ¹¹ *Apuntes para la interpretación geoquímica de los análisis de aguas*, por L. Blásquez L. Bol. Soc. Geol. Méx. T. XV, 1950.
- ¹² *Método Larios para la clasificación centesimal de las aguas naturales, empleando el diagrama triangular*, por Hermión Larios. Ingeniería Hidráulica en México. Abril-mayo-junio, 1952. Vol. VI, N° 2, pp. 14-23.
- ¹³ *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis*. Arthur M. Piper. Trans. Amer. Geoph. Union. (Secc. Hydr), pp. 914-923. Washington, D. C., 1944.
- ¹⁴ *Geología económica de los valles de San Vicente y de San Marcos, Coah.*, por Raúl Lozano García. An. del Inst. Geol. T. X, 1951.
- ¹⁵ *The geochemical interpretation of water analysis*, Chase Palmer U. S. Geol. Survey. Bull. 479, 1911.

LAS POSIBLES FUENTES DE ENERGIA GEOTERMICA EN LA REPUBLICA MEXICANA

Por LUIS BLÁSQUEZ L.

INTRODUCCIÓN

Existe una regulación directa entre algunos manantiales termales y los receptáculos subterráneos que almacenan cantidades más o menos importantes de vapor, independientemente de los acuíferos de alta temperatura, que almacenan grandes cantidades de agua utilizable para la producción de energía.

Para la generación de energía, es sin duda muy importante la producción natural del vapor; pero por su mayor abundancia y distribución más amplia, las fuentes hipertermales merecen un detenido estudio ya que pueden indicar por su temperatura cierta conexión con receptáculos aprisionantes.

En general toda emisión de vapor presupone un receptáculo de acumulación en todo semejante a los que almacenan los hidrocarburos, debiéndose investigar su forma y posición con métodos semejantes a los empleados con este aceite mineral. Asimismo, las aguas termales sin vapor, presuponen acuíferos ordinarios del campo geohidrológico; por otra parte la confinación de los vapores puede hacerse dentro de la cautividad común de las aguas ascendentes, particularmente de las artesianas; pero sólo en casos muy particulares.

Ambas características merecen un estudio geológico-geofísico para inventariar los recursos de agua y vapores susceptibles de aplicación en la generación de energía, generalmente eléctrica, cuya magnitud puede ser de gran importancia económica.

PRODUCCION DE VAPOR

Se tienen datos de varios campos, donde hay emisiones de vapor, entre los que figuran los de los Estados de Michoacán, Guanajuato, Hidalgo y Baja California Norte.

En Michoacán es particularmente importante la región de la sierra de San Andrés donde hay desprendimientos de vapor, como en la laguna

de Los Azufres, El Chillador, El Currutaco y Las Humaredas. Los vapores y aguas hipertermales corresponden a fenómenos postparoxismales, naturalmente ligados al volcanismo reciente. Las rocas ígneas desde la andesita basáltica a la riolita y basalto, tienen un espesor considerable, entre 800 m. como mínimo y 2 000 m. como máximo. Esta formación está cortada por la falla de Ixtlán de los Hervores-Cuitzeo-San Andrés y otras paralelas y normales a ella y las aguas y vapores emergen a favor de esas fracturas; pero éstos posiblemente se almacenan en anticlinales de las formaciones marinas que subyacen a las rocas ígneas. Para captar los vapores se necesitarán perforaciones bastante profundas y en rocas muy duras, de tal manera que esta zona alta de la sierra de San Andrés, debe dejarse como reserva, para cuando se agoten zonas menos desventajosas.

La región de Ixtlán de los Hervores, con una altitud mucho menor (1 260 m.) y un espesor de rocas ígneas también mucho menor, es más favorable. También aquí la falla que llega a la sierra de San Andrés, corta las rocas ígneas y ofrece vías de salida a los vapores; pero es indispensable determinar por sondeos sísmicos y mecánicos, la forma y posición del receptáculo que encierra el vapor, que puede ser un domo o un anticlinal o cualquiera otra estructura a fin de localizar los pozos de acceso, de tal manera que puedan extraer la mayor cantidad posible de vapor y al mismo tiempo tengan la menor profundidad posible.

Es evidente que una explotación racional, sólo puede hacerse cuando se sabe la forma y posición del receptáculo, su capacidad y la medida de la renovación de sus recursos.

En el Estado de Guanajuato, las regiones más importantes son las de Comanjilla y San Bartolo, ambas de rocas ígneas, riolitas y basaltos, que con un espesor considerable descansan sobre las rocas marinas y plegadas del Cretácico, cuya profundidad y estructura sólo pueden conocerse por medio de sondeos mecánicos y geofísicos. Como en el caso de Ixtlán, conviene este conocimiento previo, a fin de evitar el peligro de situar pozos que lleguen a ser improductivos en breve plazo.

En el Estado de Hidalgo hay varias zonas productoras de vapor, siendo la más conocida la de Pathé¹ donde se han hecho varias perforaciones y de la que se tienen datos que permiten saber la variación de la temperatura en el pozo N° 1, habiéndose registrado 40° C. a los 4 m.; 69° a los 24 m.; 118° a los 90 m. con un ascenso constante de 0.7° C. por m.; 150° a los 158 m., con ascenso de 0.47° C. por m. o sean 2 m. por grado. De los 158 m. a los 238, antes de la aparición del vapor, la temperatura se mantuvo constante.

A los 237.80 m. brotó el vapor con una temperatura de 260 a 300° (l.p.20. Fig. 7). Puede verse claramente que hasta los 158 m. existen en la región, aguas freáticas o semiconfinadas en lavas basálticas, con altas temperaturas por el calentamiento de las aguas profundas que pasan a través de las fracturas, para emerger en los numerosos manantiales de Mothó, donde se hizo la perforación N° 1 y del antiguo géiser de Pathé, distante unos 900 m. al N. del pozo.

Es evidente que las aguas profundas se distribuyen con mayor profusión en los horizontes inferiores, de 160 a 90 m. de profundidad, con temperaturas de 150° abajo y 120° arriba. En seguida disminuye progresivamente la temperatura, denotando siempre la mezcla de las aguas freáticas normales con las calientes profundas.

La zona intermedia, con 80 m. de espesor, impermeable, consistente en tobas y conglomerados bien cementados, no registró aumento de temperatura, a pesar de su contacto inferior con el receptáculo de vapor, a relativamente alta temperatura y presión, ya que originalmente deberá ser de 60 atmósferas y sólo tiene alrededor de 10, denunciando pérdidas de presión por escapes de vapor en los acuíferos, los manantiales, el géiser y ahora los otros pozos, principalmente el N° 2, que provocó una gran disminución de la presión además de las descargas, que ha habido en todos los pozos, actualmente en número de tres, ocasionando la desaparición del géiser.

Si se llevara un registro manométrico automático en los pozos, se podría saber cómo varía la presión con las descargas en general y particularmente para una extracción constante en cada pozo y se podría calcular la duración probable de los depósitos de vapor y saber si hay regeneración anual, en qué épocas y a qué ritmo.

Cabe hacer notar que en el pozo N° 1 no se obtuvieron datos para calcular el gradiente geotérmico, toda vez que las mediciones de temperatura no se llevaron a cabo en terreno seco, sino en diversos acuíferos con mezcla más o menos importante de aguas profundas. La irregularidad mostrada, sin variación de temperatura en un tramo de 80 m. precisamente el más profundo, mientras que las variaciones más fuertes se realizan cerca de la superficie, demuestra que no se trata del gradiente geotérmico. Si se tuvieran datos igualmente detallados de las temperaturas en los pozos, se podrían hacer deducciones para el cálculo del gradiente geotérmico; pero aun así no determinarlo con certidumbre.

Al llegar al vapor, éste mostró una temperatura que normalmente habría alcanzado a 7,500 m. de profundidad, donde la presión sería de 1 973 atmósferas, impidiendo la formación del vapor, razón por la cual no puede atribuirse la temperatura, al gradiente geotérmico, como será mostrado más adelante.

Los pozos de Pathé sugieren la existencia de un receptáculo almacenador del vapor; pues estando todos situados prácticamente en una línea N-S, el menos profundo es el más septentrional y el más profundo el más austral. La construcción de una sección vertical pasando por los tres pozos, muestra que los puntos correspondientes a las profundidades a las que brotó el vapor en ellos, están situados sobre una línea inclinada hacia el sur y aunque no hay sondeos al norte del pozo 2, puede inferirse que posiblemente en el río o poco después de éste, continuando en la misma línea de los pozos, los puntos que se obtendrían perforando, hasta llegar al receptáculo del vapor, irían aumentando su profundidad. Esta inferencia se basa suponiendo un receptáculo en que, de continuar ascendiendo la línea del contacto entre la formación impermeable y la

permeable que aloja el vapor, llegaría a la superficie y daría salida a éste, de manera que no podría almacenarse, sino que saliendo al mismo paso que se generara, tendría que incorporarse al acuífero superior freático, aumentando su temperatura y produciendo manantiales de más o menos alta termalidad.

Es lógico que existiendo grandes cantidades de vapor almacenado, con escapes relativamente reducidos, tenga que existir por necesidad un receptáculo capaz de retenerlo, como en el caso de una caldera de vapor, donde se eleva la presión hasta donde alcanza la resistencia de las paredes de esa caldera o se gradúa de acuerdo con la conveniencia de esa generación de vapor. Presiones de 882 lb/pulg.², no pueden generarse sin un receptáculo aprisionante, como en el caso de los hidrocarburos, gases y aceites que se almacenan a grandes presiones y de aquí se deduce que la línea de contacto indicada, después de ascender de S a N desde el pozo más lejano hasta el río, deba descender en seguida, para formar el receptáculo de almacenamiento, que puede ser un domo, un anticlinal o la zona de contacto, siempre que sea permeable y esté cubierta por una formación impermeable, de una intrusión lacolítica, de stock o bosse con la forma apropiada para producir el receptáculo que encierre al vapor, cualquiera que sea su naturaleza.

En Baja California existen los llamados volcanes de lodo, que merecen un estudio geofísico de la naturaleza de las estructuras subterráneas, para conocer la forma y posición de los receptáculos que almacenan el vapor.

Se pasará ahora a formular algunas consideraciones sobre la producción del vapor.

El Sr. Ing. Luis F. de Anda, consigna varias opiniones sobre el origen del vapor subterráneo (l.p.11-15), que fundamentalmente suponen que proviene del enfriamiento y consolidación del magma. Que tal cosa es inadmisibles, se desprende del hecho obtenido por experimentación, de que la temperatura crítica del agua es de 365° a la presión crítica de 195 atmósferas. En la corteza terrestre, nunca coinciden temperatura y presión; pues con los gradientes geotérmicos normales, la temperatura de 365° se alcanza a 10,950 m. de profundidad, a la que la presión es de 2,866 atmósferas, muy superior a la crítica. Si la presión nos sirve de guía, 195 atmósferas corresponden a 745 m.; pero a esa profundidad la temperatura es de 24.8° C.

Es natural que no se pueda producir el vapor, sino en condiciones muy especiales; pues de lo contrario, en toda la extensión del mundo se estaría produciendo vapor, si además se admite que el magma contenga tan grandes cantidades de agua como las que se mencionan en el estudio aludido.

Estos volúmenes de agua son tan grandes, que si se admite un gasto hidráulico de 10 litros por segundo en los manantiales de Mothó inmediatos al pozo 1 y en el geiser de Pathé se tiene un volumen anual de 315,360 m.³ y suponiendo que daten de principios del Holoceno o sean 25,000 años el volumen sería de 7,900 millones de m.³ que proviniendo

de la consolidación de un magma que perdiera su agua con un contenido del 0.5 de su peso, supone una masa de 1.575×10^{12} toneladas que a la densidad de 2.7 corresponde a un volumen de 5.85×10^{11} millones de m.³ y un hemisferio de 14,100 m. de radio e igual profundidad.

Si la edad de la intrusión fuera de principios del Cuaternario, el volumen del agua segregada sería 100 veces mayor y el radio de la semiesfera alcanzaría todo el espesor de la litosfera.

Es inadmisibles que una masa de magma pueda eliminar su agua hasta su centro, la consolidación sería periférica, en un espesor de sólo unos cuantos metros y entonces el área sería tan grande, que sobrepasaría muchas veces la de México, y además las condiciones del desprendimiento de los gases y vapores no se realizarían por las grandes presiones de las partes internas del magma.

La explicación es obvia, ascendiendo el magma por fracturas u orificios, acarrea con ella la temperatura correspondiente a su original localización, en la base de la litosfera, perdiendo poco calor por la relativa rapidez del flujo. En efecto, en las lavas incandescentes, se han medido temperaturas de 1,300 a 2,000° propias de profundidades de 45,000 a 66,000 m. Hay que tomar en cuenta que el gradiente geotérmico no es constante, obedeciendo a la ley de la pérdida del calor por radiación. Así se ha calculado, que ese gradiente sería de 0.54 m. a los 39,900; de 4.96 a los 39,000; de 15.6 a los 30,000; de 31.0 a los 500; y de 31.1 cerca de la superficie.

Es con estos gradientes como se han calculado las temperaturas del magma en las zonas del sial, sifema, sima y en el substratum, desprendiéndose de esos cálculos, que sólo un magma emergente puede producir una alta temperatura, en zonas que entonces reúnen las condiciones críticas de temperatura y presión, convirtiendo el fenómeno de la producción del vapor en casos excepcionales, en vez de generales, limitado a las zonas volcánicas con la formación de geiseres, solfataras y fumarolas.

No obstante el ascenso del magma, no puede atribuirse el vapor a su agua congénita, dada su corta cantidad, debiéndose en su mayor parte a la afluencia de aguas meteóricas hasta las zonas periféricas de los magmas o sean sus aureolas térmicas, en las que el agua de esa procedencia toma elevadas temperaturas y después, asciende por la carga hidrostática o por diferencia de densidad en un medio de saturación, donde el agua que no está en contacto con la aureola tiene una temperatura muy inferior a la del contacto directo. Suponiendo una profundidad de 700 m., el agua tendría una temperatura normal de 23° C. con un gradiente geotérmico medio de 1° C. por cada 30 m.; pero en el contacto tendrá una temperatura mayor. Si ésta fuera de 285° podría formarse el vapor en esa misma zona; pero si fuera menor, supongamos de 180°, el vapor se produciría cuando la presión hidrostática disminuyera a 10 atmósferas o sea cuando el agua hubiera ascendido al nivel de 100 m. de profundidad y si se toma en cuenta la presión de las rocas, el vapor se formaría a una profundidad todavía menor.

El agua o el vapor, según la relación temperatura-presión emigrará por fracturas, contactos y medios permeables hasta quedar confinada en receptáculos que pueden corresponder a formas naturales de aprisionamiento, como domos o anticlinales; pero que también pueden ser formaciones permeables de cualquier forma hasta la de estratos o cuerpos horizontales continuos y hasta sinclinales, siempre que la permeabilidad disminuya lateralmente y hacia arriba para formar "trampas", o bien llenará cavidades en sifón, que producirán los geiseres típicos, como el "Old Faithful", o seguirá un camino sin aprisionamiento y podrá emerger en numerosos hervideros.

El continuo flujo del agua meteórica, determina con el tiempo el enfriamiento del magma, que es tanto más rápido cuanto es mayor el caudal del agua que transporta calorías y conforme desciende la temperatura, el agua llega más y más cerca de la masa intrusiva, cuya aureola térmica se va reduciendo hasta desaparecer por completo, en un tiempo que depende de la magnitud de la masa intrusiva, su profundidad, la conductividad térmica y otros muchos factores.

Es indudable que en las emisiones de vapores, intervienen las aguas juveniles; pero su cuantía es relativamente pequeña, habiendo algunos manantiales en los que estas aguas intervienen predominantemente y otros, la mayoría, que carecen de ellas.

Algunos autores mencionan a las aguas de cristalización como la fuente del vapor subterráneo. Esta opinión está más alejada aún de la realidad; puesto que está demostrado que su cantidad es insignificante, menos del 0.01%. Un lacolito con una área de unos 25 km.² con un radio de 2.5 km. tiene un volumen de 3.35×10^{10} m.³, suponiéndolo hemisférico y suponiendo que pueda producir una cantidad de agua igual a la de su superficie superior esférica, con un espesor máximo de 100 m., el volumen magmático de segregación sería de 3.92×10^9 m.³ y su masa con densidad 2.7, de 1.06×10^{10} toneladas, capaces de producir 20 lps durante un año 249 días.

La afluencia de agua al cuerpo intrusivo, puede hacerse en un acuífero confinado, con una presión hidráulica capaz de hacer brotar el agua sobre la superficie del terreno a ciertas cotas, aumentado por la presión del vapor si la forma del acuífero permite el desarrollo de esta presión, o si la presión de la rama de carga es superior a la tensión del vapor como posiblemente sea la mayoría de los casos.

En Pathé con una presión de 60 atmósferas se puede equilibrar una columna de agua libre de unos 600 m.; pero teniendo en cuenta la fricción, una columna de mucho menor altura, ya que aquélla es muy considerable en las arenas y material fino que constituye comúnmente los acuíferos.

El agua freática puede estar regida en su nivel por la contribución de las aguas confinadas, suministradas a favor de las fracturas que ofrezcan vías de escape a las aguas profundas y vapores que pueden ser los principales impulsores de las aguas confinadas, de tal manera, que a una disminución sensible de presión, corresponda un descenso percep-

tible del nivel o perfil freático. Claro está que estas aguas no pueden descender hasta el cuerpo intrusivo, tanto por la presión del vapor que escapa por las fracturas, como por la presión hidrostática del agua confinada, que por su circulación profunda y origen remoto, si pueda llegar a la zona o aureola térmica de la intrusión, por su mayor presión.

Las cantidades de vapor generadas, dependen de los gastos hidráulicos de los acuíferos que llevan sus aguas a las aureolas térmicas o zonas de contacto, según el caso, de los cuerpos intrusivos. Salta a la vista la dificultad de valorizar esas cantidades de agua; pero es muy favorable para una explotación, el hecho de que cantidades bastante pequeñas de agua, produzcan cantidades muy considerables de vapor. Para generar 25,000 Kw. o sean 34,000 caballos caldera, se requieren solamente unos 110 lps, que casi todos los acuíferos profundos son capaces de suministrar, en las condiciones requeridas para la producción del vapor.

Un punto muy importante, es la temperatura del cuerpo intrusivo, que decrece con rapidez relativa en muchos casos, como lo acredita el valle de Tenthousand smokes de Alaska y aquí en México las regiones de la sierra de San Andrés, Mich., y Comanjilla, Gto., donde con la descarga natural de los manantiales, la temperatura descendió notablemente hasta extinguirse los brotes de vapor y algunos manantiales. El primer caso se comprueba con la comparación de los manantiales visitados por el Dr. Waitz² en 1906 y los encontrados por el autor en 1956;³ el segundo entre las fuentes descritas por Humboldt en 1808⁴ y las encontradas por el autor en 1946.⁵

AGUAS HIPER Y MESOTERMALES

En el estudio del Ing. de Anda (l.p. 2) se hace notar que se ahorrarían \$900,000 al mes o sean \$10,950,000 al año, produciendo 25,000 Kw. o 219 millones de Kwh., al precio de \$0.05 Kwh. a base de combustible. Seguramente ese autor toma en cuenta la depreciación y amortización de la maquinaria y los gastos de conservación, operación y combustible, adoptando un amplio margen de seguridad. La producción de energía utilizando el vapor subterráneo, probablemente no supone la utilización de calderas, aunque es posible que se necesite elevar la temperatura y la presión por medio de ellas.

Una perspectiva digna de tomarse en cuenta la ofrecen las aguas hipertermales, ya que para alcanzar su temperatura se necesita el empleo de combustible, cuya importancia está en razón directa con la cantidad de agua empleada.

Para generar los 25,000 Kw. que toma de término de comparación el Ing. de Anda, con el supuesto del consumo de 16.2 litros de agua por Kwh. la cantidad de ésta sube a 3,570,000 m.³ y si su temperatura es de 100° las calorías suman 3.57×10^{11} (Kg/cal), que con una potencia calórica del petróleo de 11,600 K.cal, requieren 3.05×10^7 litros de petróleo que al precio de \$0.20 lt. importan \$6,100,000. Con una diferencia del agua usada de 85° C. la economía es de unos cinco millones de pesos.

Los manantiales termales tienen la ventaja de su mayor abundancia y más amplia distribución y además su durabilidad es mayor ya que se pueden explotar sin forzarlos; pues su producción acuífera no necesita ser muy alta.

Entre los manantiales que presentan buenas perspectivas para su aplicación en la energía termoelectrica están en:

Jalisco: Laguna de Chapala, Agua Caliente de La Barca, de Zacoalco, de Ejutla, de Tamazula y de Tizapán, Atotonilco de Teocuitatlán y Hervor de Teuchitlán.

En Guanajuato: Ojo Grande de Atotonilco en San Miguel Allende, Cascabel y Atotonilquillo de Manuel Doblado, Lodos de Munguía de Irapuato, Hervidero de Apaseo, Caldera de Abasolo, Hervores de Huanímaro, Sotelo de Jaral de Progreso, Agua Caliente de Salvatierra, Moralityos de Celaya y Puroagüita de Jerécuaro.

En Hidalgo: Xindejé en Tasquillo, Ajacuba en Tetepango y Los Baños en Atotonilco Tula.

En México: El Bañito en Apasco, Los Baños en Chapa de Mota, Los Baños de Ixtlahuaca, Caro y San Bartolo de Jocotitlán, Salto en Valle de Bravo, San Pedro en Tenango del Valle, Anonas en Tejupilco y Barrón en Nicolás Romero.

En el Distrito Federal: El Peñón de los Baños.

En Tlaxcala: Atotonilco de Ixtacuixtla y Totolcingo de Cuapiaxtla.

En Puebla: Tlacomulco de Chignahuapan, Rancho Colorado y Paseo Azul de Puebla, Azufrutitla de Tianguismanalco, Atotonilco de Totimehuacán, Oxtotipan de Tepeaca, Alhuechica de Acatzingo, Hornos de Chiautla y Amatitlán de Albino Zertuche.

En Veracruz: Huizapan de Pajapan, Trinidad de Soconusco y El Carrizal de Axucoapan.

BIBLIOGRAFIA

1. *El campo de energía geotérmica de Pathé, Hidalgo*, por el Ing. Luis F. de Anda. Ingeniería, U.N.A.M. Vol. XXVII. Octubre de 1956.
2. *Phénomènes postparoxismiques du San Andrés*, por Paul Waitz. Guide des Excursions du Xe. Congrès Géologique International N° X. 1906. Mexique.
3. *Volcanismo Terciario y Reciente del Eje Volcánico de México. Excursión A-15*, por L. Blásquez L. XX Congreso Geológico Internacional, 1956. México.
4. *Ensayo Político de la Nueva España*, por Alejandro Von Humboldt. 1808.
5. *Los manantiales de Comanjilla, Gto.*, por Luis Blásquez L. Inst. Geol. de Méx. 1946 (inédito).

EL GRUPO VOLCANICO DE LAS TRES VIRGENES, MPIO. DE SANTA ROSALIA, TERRITORIO DE BAJA CALIFORNIA

Por los Ings. FEDERICO MOOSER y ARMANDO REYES LAGOS

EL GRUPO VOLCANICO DE LAS TRES VIRGENES

El grupo de volcanes denominado Las Tres Virgenes se sitúa a unos 20 Km. del Mar de Cortés, al noroeste de Santa Rosalía, B. C., en una región desértica y de escasa población. A la fecha ha sido muy poco estudiado.

Tres conos distintos, cada uno de morfología y características propias componen dicho grupo; quedan delineados, los tres, de noroeste a sureste.

El cono principal, notable por su gran altura (1,995 m.) y sus formas de relieve juvenil, tiene rasgos de un estrato-volcán; se sitúa en el sur del grupo, ofreciendo al viajero que transita la carretera de Santa Rosalía a San Ignacio, una vista imponente. De lejos, los costados de este cono son abruptos y casi regulares. Su cima, ancha e irregular, está compuesta por verdaderos cantiles y peñascos desgarrados, producto de la emisión de lava viscosa que surgió, probablemente, en el último cataclismo, reventando el cráter y el flanco noreste del volcán. Hacia el pie noreste escurrieron lavas basálticas bastante fluidas, emitidas en erupciones muy recientes; éstas sepultaron la base del cono central del grupo de Las Tres Virgenes. También al pie oriental y al pie meridional se extienden imponentes corrientes de lava basáltica que, debido a su formación reciente, forman un verdadero malpaís alrededor del volcán. A media altura sobre el costado sur y visible desde la carretera, se halla el resto de un pequeño cono adventicio, del que surgió una corriente de lava sumamente viscosa, que apenas alcanzó la base del cono.

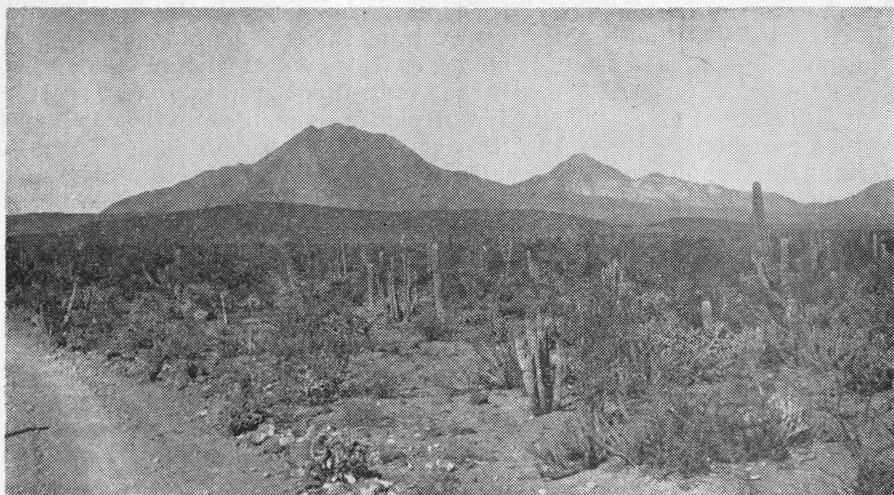
El cono central del grupo, de menor altura que el anteriormente descrito, posee la forma de una pirámide regular, que termina en punta. La erosión obró visiblemente en sus flancos, que se hallan surcados radialmente desde media altura. Sobre su costado oriental descansan grandes depósitos de ceniza volcánica, en los que la erosión obró, formando una red de finas digitaciones. La formación de este cono es decididamente anterior a la del cono meridional, arriba descrito, no pudiéndose reconocer

ningún cráter actualmente. Las lavas que componen este cono son andesitas porfídicas, azules, conteniendo algo de cuarzo.

En el extremo noreste del grupo, se sitúa un cono escoriáceo, minúsculo, de muy reciente formación. Dicho cono se destruyó en su parte oriental, probablemente al surgir de su interior una corriente de lava viscosa, basáltica, que avanzó hacia la planicie situada al oeste del grupo de Las Tres Vírgenes.

Actividad volcánica. Los conos volcánicos del grupo de Las Tres Vírgenes se formaron en el Pleistoceno, manifestando erupciones aún en época reciente. Sus lavas descansan discordantemente sobre elementos de la formación volcánica Santa Rosalía, perteneciente al Pleistoceno inferior (según Wilson 1955). El aparato meridional es el único volcán que hizo erupción, en la Baja California, dentro de la época histórica. La erupción que ocurrió en 1746 parece ser definitiva, no siendo así la que se reporta del año 1857, durante la que se dicen haber sido observadas nubes de humo y vapor. En la expedición que realizó Juan José Matute a esta región, en el año 1887, este investigador no pudo observar actividad volcánica alguna. Desde entonces, hasta la fecha, este volcán ha permanecido inactivo.

Al noreste del cono cinerítico y próximo al borde de un cañón profundo en el que puede estudiarse una serie de depósitos volcánicos sumamente interesantes y múltiples estratos provenientes de nubes ardientes, se hallan fumarolas activas en las que se han formado insignificantes acumulaciones de azufre.



Volcán "Las Tres Vírgenes".

LOS VOLCANES DE COLIMA

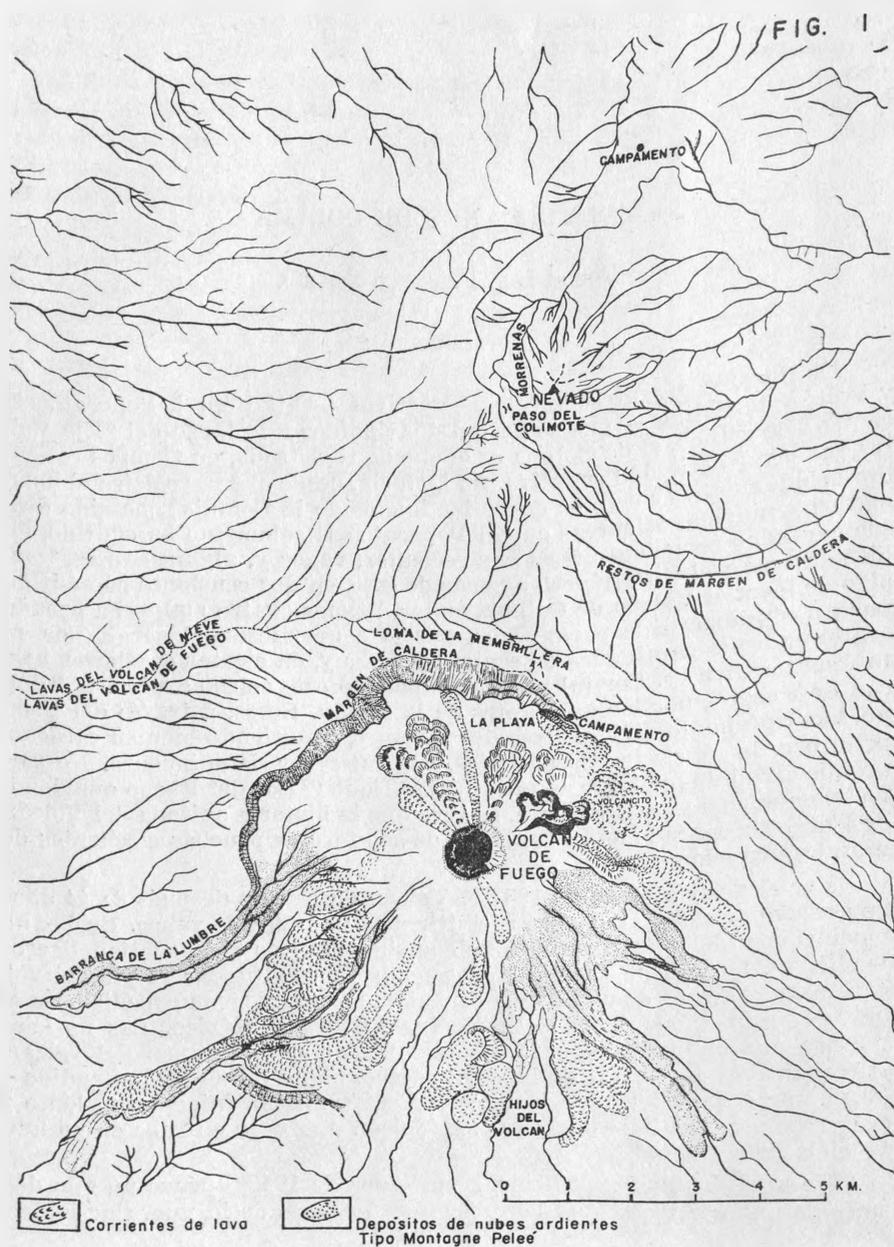
Por el Ing. FEDERICO MOOSER

INTRODUCCIÓN

De los tres gigantes volcanes activos —Citlaltépetl, Popocatepetl y Volcán de Colima— que se hallan distribuidos a lo largo del "Eje Volcánico Mexicano", el de Colima es el que ha registrado, en tiempos recientes, la mayor actividad eruptiva. Su historia, desde que la registra el hombre debidamente (y esto es desde los inicios de la Colonia), ha sido dramática y movida. Mientras que el Popocatepetl solamente ha emitido, en sus contadas erupciones freáticas recientes, vapor y, algunas veces, también cenizas y el Citlaltépetl, además de esto, en dos ocasiones ha emitido algo de lava, el Volcán de Colima, en los últimos cuatro siglos, ha pasado por un sinnúmero de paroxismos, que lo conmovieron al surgir por su cráter enormes cantidades de cenizas y lavas y, en ciertas ocasiones, hasta nubes ardientes. Por tal razón, es apodado este coloso explosivo, "Volcán de Fuego", por los habitantes de la región. Estos, a través del tiempo, han aprendido a vivir cerca del volcán y, conociendo bien su carácter peligroso, lo observan desconfiados, con interés y detenimiento. No sorprende oír que la palabra "Colima" signifique "Dios del Fuego que domina" y en el curso de este relato, se verá que la historia agitada del Volcán de Fuego ha labrado en el conjunto de sus formas pruebas elocuentes de grandes erupciones.

Por el mes de mayo de 1957 el Volcán de Fuego, después de 44 años de aparente quietud, comenzó a emitir densas nubes de vapor. En las inmediaciones del cráter se oían ruidos subterráneos y se sentían ligeros temblores. La alarma cundió en las poblaciones situadas al pie del volcán. Ante el temor de una nueva erupción, se organizaron expediciones al cráter desde Atenquique, Colima, Guadalajara y México. Las noticias traídas por los expedicionarios coincidían en que el tapón del volcán, anteriormente una masa de bloques negros, plana e inmóvil, extendida a 50 m. por debajo del labio inferior del cráter, había iniciado un lento y peligroso ascenso. No había duda: el Volcán de Fuego entraba en un nuevo ciclo de actividad.

Se organizó una expedición a mediados de 1958, apenas un año después de haberse registrado los primeros síntomas de la nueva actividad.



Croquis de la región en que se hallan los volcanes de Colima.

Bajo la dirección del Profr. F. Sobota, se reunieron varios investigadores en la ciudad de Colima, el día 10 de junio, por la tarde, estaban presentes el Sr. José Luis Lorenzo, glaciólogo dependiente del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.; el secretario particular del Gobernador del Estado de Colima, Profr. Manuel Velasco Murguía, el Profr. Anselmo Amézquita Galván, de Colima; dos jóvenes estudiantes del Instituto de Geografía de la Universidad de Guadalajara, el Sr. Oscar González Rul, fotógrafo de México; además, un topógrafo del Estado de Colima con dos cadeneros y el que esto escribe.

Todas estas personas formaron un grupo que fue recibido por el C. Gobernador del Estado de Colima, Ing. Arq. Rodolfo Chávez Carrillo, con quien se departió amigablemente, precisándose la importancia de la expedición al Volcán de Fuego, símbolo de la antigua y bella ciudad de Colima. El extenso programa que se pensaba realizar en el lapso de una semana, consistía: primero, en ascender al Volcán de Fuego e investigar el estado de su tapón y, después, en ascender al Volcán Nevado y reconocerlo para ver si en el pasado hubo glaciaciones de sus cumbres. El relato que sigue dará cuenta detallada de los resultados alcanzados con dicha expedición.

El día 11 de junio, por la mañana, partió el grupo expedicionario en tres vehículos de doble tracción, de Colima hacia Atenquique, centro de industria papelera. Aquí se unieron a la expedición dos señores conocedores de la zona volcánica de Colima, miembros del Club Alpino de Atenquique. Se pasaron los campos de labranza situados al pie oriental del Nevado: un camino maderero condujo a las alturas, atravesando densos bosques, hasta que, finalmente, al cabo de 2 horas de ascenso y a una altura de 3.120 m. (altímetro Thommen) el camino terminó en el borde de la caldera del Volcán de Fuego. Aquí, junto al pie noreste del cono activo, en un lugar pegado a la orilla de una corriente de lava derramada el siglo pasado por el llamado "Volcancito", se estableció el campamento, frente al volcán (Fig. 1), de cuyo cráter surgía continuamente, una impresionante columna de vapor.

Desde el campamento se efectuaron varios recorridos en los días 12 y 13 de junio, favorecidos por el buen tiempo, con destino al cráter del Volcán de Fuego, al Volcancito y a La Playa, situada esta última al pie septentrional del cono, en el interior de la caldera. Las múltiples observaciones realizadas en estos recorridos se describirán en los capítulos que siguen.

El día 14 de junio se levantó el campamento y todo el grupo se dirigió a Atenquique, para de allí pasar a Ciudad Guzmán, donde pernoctó. El día 15 se emprendió la subida al Nevado de Colima, por otro camino maderero, el cual, ascendiendo por los flancos más septentrionales del macizo, se abría paso a través de una vegetación selvática, sobre todo en las partes superiores, que cubría barrancas profundas. Al cabo de unos kilómetros de camino sinuoso, se llegó a La Joya* que, como se verá, se encuentra en el espacio interior formado por la caldera, que es parte de

* Barbarismo para hoya.

la extensa cumbre del Nevado (Fig. 3). Dicha caldera rodea la cúspide prominente por la que surgieron, quizá en el Pleistoceno medio, las últimas erupciones del hoy extinguido volcán. En el corazón de un bosque que ocupa un pequeño llano que se halla al pie de la cara septentrional del picacho, hay una casa en condiciones bastante malas, con un manantial situado a unos 100 m. de distancia de ella; aquí se estableció el campamento.

El día 16, bajo una llovizna continua, se inició el ascenso, subiendo rumbo al sur, por un valle angosto, que se prolonga hasta el pie poniente del picacho. Caminando casi todo el tiempo a través de un bosque de apariencia alpina, se alcanzó el "Paso del Colimote", sitio en el que la caldera se acerca más al pico del Nevado, sobre su pie suroeste. Durante este trayecto se encontraron rocas "aborregadas" y otros vestigios de glaciaciones pleistocénicas (descritas por el Sr. José Luis Lorenzo).

Del Paso del Colimote se podía haber visto el Volcán de Fuego, a distancia, como casi medio siglo antes lo hizo P. Waitz, por el peligro que entonces existía al acercarse al cono en erupción. Pero el mal tiempo impidió estas observaciones. A pesar del frío y la llovizna se continuó el ascenso girando hacia el este, entrando en las canaletas empinadas que bajan de la cima del Nevado. Otra hora más y se llegó a la cumbre del Nevado, a una altura de unos 4,200 m., pero la nublazón no permitió obtener gran provecho a esta hazaña alpinista.

Mojados y cansados se hizo el regreso al campamento, al anochecer. Al día siguiente, 17 de junio, habiéndose disipado algo el mal tiempo, se hizo el estudio de las huellas de glaciación y la investigación de la gran caldera situada en el lado occidental del volcán, descubriendo su carácter complejo. Se tomaron varias fotografías, se recolectaron muestras de distintas corrientes antiguas de lava, etc. La expedición concluyó el 18 de junio, regresando sus miembros a sus lugares de origen.

En los meses que siguieron se prepararon los manuscritos. Ante la extensa literatura descriptiva que trata del volcán de Colima, sin que existieran publicaciones especializadas con mapas y fotografías, salvo una (Ortiz Santos, 1944), se juzgó oportuno añadir fotografías y varios dibujos detallados. Los dibujos preparados por el artista Héctor Xavier, nacieron del estudio minucioso de las fotografías aéreas; representan de una manera inmediata, como no podría lograrse con palabras ni tampoco con la reproducción de las fotografías, los rasgos estructurales y morfológicos del Volcán de Fuego y del Nevado de Colima. El texto está acompañado por un mapa foto-geológico en el que aparecen los rasgos característicos de ambos macizos (Fig. 1).

HISTORIA GEOLOGICA DE LOS VOLCANES DE COLIMA

RESUMEN

El Nevado de Colima, volcán fuertemente erosionado, conserva en sus partes superiores los restos de dos sistemas de calderas de sumergencia.

El Volcán de Fuego, formado sobre los flancos meridionales del Ne-



Fig. 2. Vista de los dos volcanes desde el suroeste. Entre el margen de la caldera y los volcancitos baja la barranca de La Lumbre.



Fig. 3. Los volcanes de Colima vistos desde el poniente.

vado de Colima, ha pasado por una historia compleja, ya que cuenta con una extensa caldera de sumergencia. Se describe el estado del tapón en la fecha de la expedición, el cual, desde mayo de 1957, ha iniciado un lento ascenso dentro del cráter del Volcán de Fuego.

FORMA, ESTRUCTURA Y ORIGEN DEL VOLCÁN DE COLIMA

El Volcán de Fuego forma la prominencia sur de una sierra volcánica que alcanza su mayor altura en el Nevado de Colima, un estratovolcán, complejo y fuertemente erosionado, que culmina, en forma abrupta, con un pico accidentado y agudo situado a unos 5 km. al norte (Figs. 2 y 3). De cúspide truncada y desgarrada, el Volcán de Fuego posee un contorno cónico ideal, de laderas muy pendientes, observándose que al noreste se descompone dicho contorno por la existencia de un cono adventicio (Fig. 4) conocido por el nombre del Volcancito. Consiste en un promontorio de forma irregular, que se halla a una distancia de unos 100 m. de la orilla del cráter. Sobre el costado meridional (Fig. 2) del Volcán de Fuego, dos pequeños domos y un conito escoriáceo, han formado tres elevaciones características en el límite inferior del cono, que casi coincide aquí con el límite superior de la vegetación arbórea. Las tres elevaciones son llamadas Los Hijos del Volcán.

El Volcán de Fuego mismo, se eleva dentro de una gran caldera, cuyos restos se pueden apreciar en forma de un semicírculo que se distingue claramente sobre el pie septentrional del cono (Fig. 3). Parte de esta caldera existe todavía al sur del cono volcánico (Fig. 1). El resto de su circunferencia ha sido inundado o rellenado, como sucede en las laderas orientales del volcán, o destruida por la erosión, como en el flanco occidental, por donde hoy desciende la gran barranca de La Lumbre, hacia la hacienda de San Antonio.

En el recorrido que se hizo por La Playa, al pie de la loma de La Membrillera (Fig. 1), llama especialmente la atención el desarrollo morfológico de la caldera, cuyos acantilados se elevan abruptamente al norte. Dollfus y Montserrat (1867) describen este anillo como un circo de rocas que rodea el cono superior del volcán, que se erige aislado. Paul Waitz (1906) lo interpreta como el margen de un *maar* (caldera de explosión) en cuyo centro se formó posteriormente el Volcán de Fuego. Dicho investigador cree que la loma de La Membrillera es una parte del macizo del Nevado, que sufrió un levantamiento brusco de sus capas de corrientes andesíticas, en el sur, al formarse el Volcán de Fuego (Waitz, 1936, p. 366).

En una parte podía verse que las paredes de la caldera están constituidas por lavas andesíticas y brechas volcánicas, superpuestas normalmente e inclinadas al norte. Si hubieran sufrido un levantamiento repentino, por la actividad inicial del Volcán de Fuego, sus elementos aparecerían intensamente fracturados y dislocados, lo que no es el caso. Parece, por consiguiente, que el anillo que rodea el cono superior del volcán es el borde de una gran caldera de sumergencia.

Se pudo constatar que hay una diferencia marcada entre las formas



Fig. 4. Vista del Volcán de Fuego y el Volcancito desde el noroeste. También se reconoce el flanco meridional del Nevado y su contacto con el antiguo cono del Volcán de Fuego.

erosivas, de relativa madurez, que caracterizan el borde de la caldera en el noroeste y sus paredes del noreste, todavía lisas y perpendiculares. Esto parece indicar que hay una diferencia de edad de formación, habiendo ocurrido con anterioridad los hundimientos en la parte occidental. En el estudio de las fotografías aéreas resalta el hecho interesante de que el borde de la caldera se compone de numerosos sectores menores e independientes, agrupados concéntricamente y alineados (Fig. 1). Dichos sectores se formaron, sin duda, por hundimientos parciales causados por el vaciamiento periódico de una cámara magmática, probablemente dividida en varias subcámaras. En otras palabras, erupciones consecutivas originaron hundimiento tras hundimiento. Así es como fue formándose, poco a poco, la gran caldera de sumergencia del Volcán de Fuego, hundiéndose primero la mitad occidental y, en fechas más recientes, la mitad oriental.

A la luz del conjunto de fenómenos, se reconoce que el volcán se estructuró a través de una compleja historia eruptiva. En los flancos erosionados del Nevado de Colima nació, probablemente durante el Pleistoceno superior, un volcán primitivo, cuyos restos quedaron conservados en el complejo de la caldera. Mientras que la chimenea de dicho aparato estuvo bien conectada con su cámara magmática, fue creciendo el volcán, erupción tras erupción, por el acumulamiento, en su cono, de lavas

y tobas. Llegado a esto, es indudable que habrá ocurrido lo que suele acaecer en la historia de casi todos los grandes volcanes; los conductos magmáticos entre la cámara magmática y cuerpos ígneos mayores, a gran profundidad, comenzaron a interrumpirse. A partir de entonces, el volcán primitivo ya no creció con cada erupción; al contrario, cada emisión causaba una pérdida de reservas y de volumen en la cámara magmática y se iba hundiendo el cono eruptivo, como se indica arriba, de manera desigual, ya que al comienzo se fue hundiendo la zona occidental y sólo en épocas más recientes la porción oriental. Así se formó y acentuó el gran anillo que rodea el cono superior del Volcán de Fuego. Sus paredes se elevan, en partes, a unos 150 m. por encima del nivel de La Playa, y su diámetro, en eje norte-sur, es de unos 3 km. El tamaño de la caldera refleja casi directamente la extensión de la cámara magmática que nutre al volcán probablemente desde poca profundidad.

Se puede suponer que si el actual proceso de erupción y hundimiento continúa, el cono del Volcán de Fuego se irá sumergiendo más y más en su caldera, hasta que las reservas ígneas de la cámara magmática estén exhaustas. Por otra parte, también podría ocurrir que algún nuevo impulso tectónico abriera las antiguas conexiones de la cámara magmática con el Sial o Sima, con lo que el volcán iniciaría un nuevo ciclo de construcción. Para ilustrar los cambios que puede sufrir un volcán a través de su larga vida, se anexa a este relato un dibujo del Ceboruco (Fig. 6). En el último episodio de su historia eruptiva, una fractura partió el cono, surgiendo varios pequeños conos escoriáceos a lo largo de su trayectoria.

La altura del cono reciente del Volcán de Fuego sobre la base de la caldera es de cerca de 800 m., correspondiendo a una altura total de 3,960 m.s.n.m. La violencia de las erupciones ha impedido que dicho cono se cubra de vegetación, por lo que ofrece un aspecto árido y desolado (Fig. 4). Con esta parte contrasta la vegetación frondosa que envuelve los flancos inferiores del volcán y los costados externos de la caldera. En la estación invernal, el Nevado y a veces el Volcán de Fuego, llegan a ver sus cimas cubiertas de nieve.

HISTORIA DE LA ACTIVIDAD DEL VOLCAN DE COLIMA

Los informes que tratan de la actividad del Volcán de Colima son numerosísimos. Notables autores han dedicado obras voluminosas a la descripción y enumeración detallada de paroxismos, erupciones y explosiones en las que, a través de los siglos, se produjeron nubes ardientes, escorias, cenizas y vapores. No se cree oportuno ni necesario repetir tales relatos, excepto de manera condensada y en dos partes, cubriendo la primera el período de 1576 a 1912 y la segunda el de 1913 hasta la fecha. Para el lector que quiera estudiar las descripciones originales, se enumeran en seguida los autores principales, en orden cronológico y siempre haciendo alusión al contenido de su trabajo.

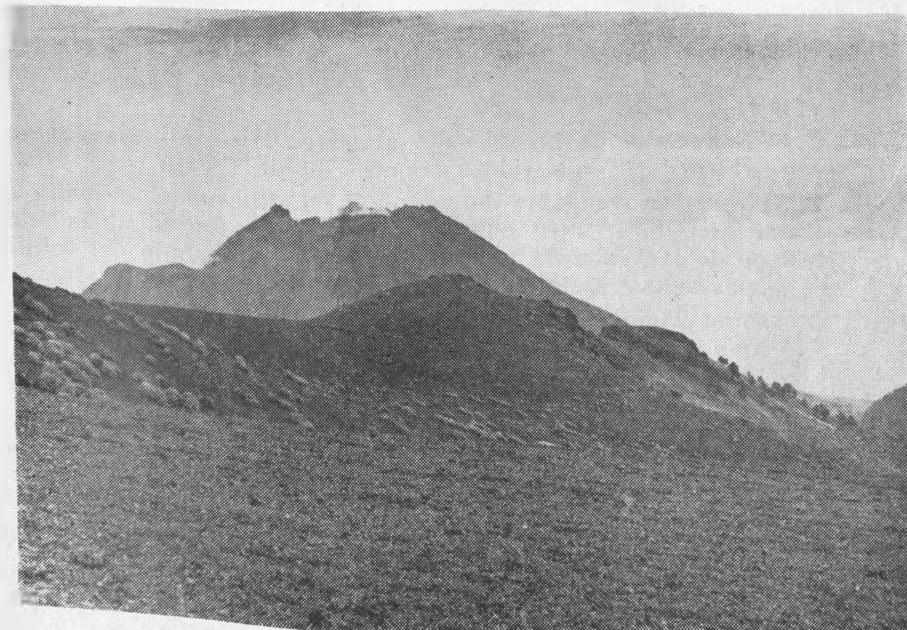


Fig. 5. Vista del Volcán de Fuego desde el Paso del Colimote, tomada el 17 de junio de 1958.

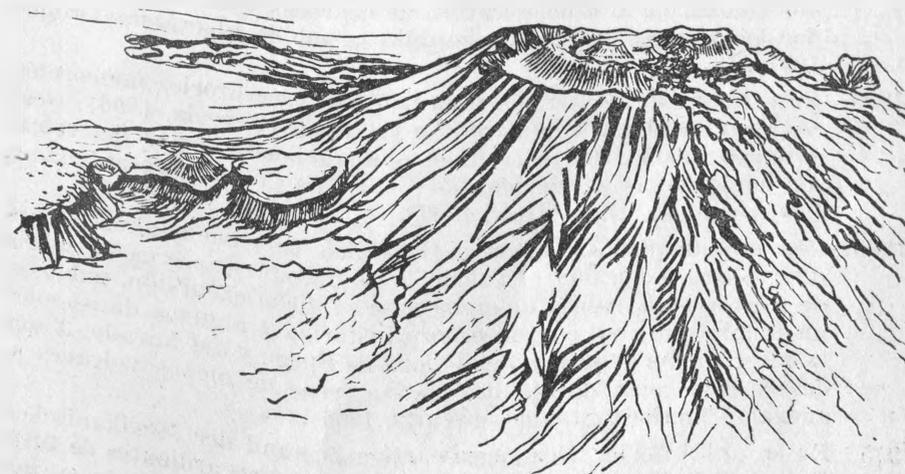


Fig. 6. El Volcán Ceboruco. Se distinguen las dos calderas de sumergencia.

1752. C. Pieschel ascendió al volcán por su lado noreste y al Nevado. Publicó las primeras observaciones científicas de ambos macizos (Pieschel, 1856).
1796. F. T. Sonnenschmidt intentó subir al cráter. Hizo valiosas observaciones científicas en el volcán (Sonnenschmidt, 1804).
1834. E. Harkort en compañía del pintor J. M. Rugendas, ascendió al cráter. Las pinturas del artista, cuatro de ellas reproducidas en el trabajo de P. Waitz de 1936, dan una idea del estado del volcán en aquel tiempo. El informe de Harkort ha desaparecido.
1856. Alexander von Humboldt, el gran naturalista, dio en sus "Viajes a la Nueva España" datos acerca del Volcán de Fuego, aunque no lo visitó él mismo. Después, en su obra maestra "Kosmos", recopiló todas las noticias acerca del volcán, llegadas a su conocimiento hasta 1856 (Humboldt, 1867).
1866. A. Dollfus y E. de Montserrat visitaron el volcán y lo describieron con precisión. Proporcionaron las primeras mediciones altimétricas de valor (Dollfus y Montserrat, 1867).
1869. C. Sartorius describe la formación del Volcancito (Sartorius, 1871).
1872. K. de Chrustschoff describe la ceniza que emitió el volcán en ese año y da un relato de la erupción (Chrustschoff, 1887).
1887. M. Bárcena, a raíz de una expedición en la que no logró subir al cráter por la intensa actividad que éste tenía, publicó la reseña más completa del volcán hasta entonces (Bárcena, 1887).
1894. C. Aguilera y E. Ordóñez lograron subir únicamente a Los Hijos del Volcán. La alta temperatura de las rocas y la molestia causada por los vapores sulfurosos impidió la subida al cráter (Ordóñez, 1897).
1893. En este año J. M. Arreola organizó los observatorios meteorológicos y vulcanológicos de Zapotlán y Colima (Arreola, 1896). Desde entonces hasta 1905 se hicieron observaciones diarias del volcán. Así nacieron las Efemérides del Volcán de Colima, presentadas en 1906 por el Sr. Díaz (Díaz, 1906).
1906. Con ocasión del X Congreso Geológico Internacional, P. Waitz dirigió una excursión al volcán. Como bosquejo acerca de lo que de vulcanología habría de observarse en dicha excursión, publicó un folleto que contiene un esbozo histórico y algunos datos sobre la constitución geológica del Volcán de Fuego y del Nevado. A una descripción corta de algunas de las rocas de ambos volcanes se anexan 7 análisis químicos (Waitz, 1906).
1915. En su publicación "Der gegenwärtige Zustand der Mexikanischen Vulkane" P. Waitz describe la erupción de nubes ardientes de 1913, que él presenció en su última fase. (Waitz, 1915a). En la misma fecha Waitz escribe otro artículo, en alemán, en el que comprueba que el Ceboruco y el Jorullo también produjeron nubes ardientes,

como el Volcán de Colima (Waitz, 1915b). En 1920 apareció un trabajo del mismo autor sobre nubes ardientes observadas en las erupciones del Jorullo (1759), Ceboruco (1870) y Colima (1913) (Waitz, 1920).

1922. E. Friedländer ascendió al cráter. Dio a conocer sus observaciones en un trabajo publicado en 1930 (Friedländer, 1930).
1932. M. Zehle describe sus observaciones del cráter durante las expediciones al volcán de 1930 y 1931 (Zehle, 1932).

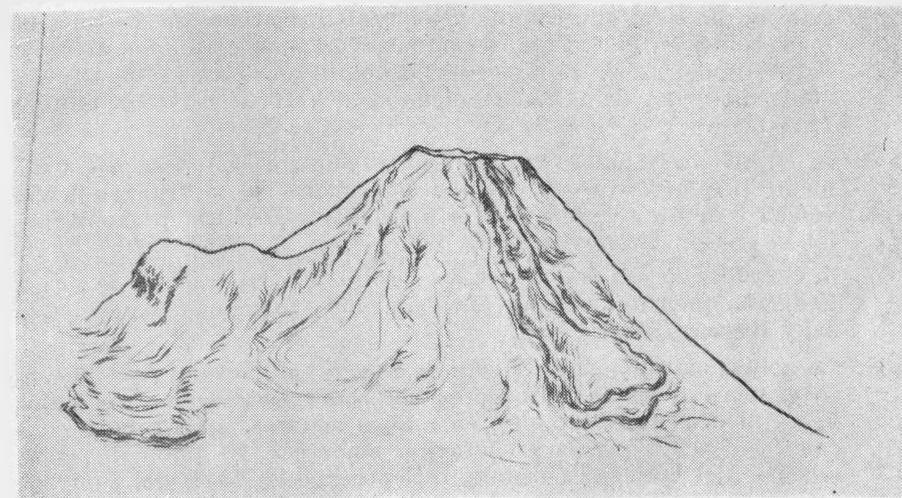


Fig. 7. El Volcán de Fuego en 1906, visto desde la loma de la Membrillera.

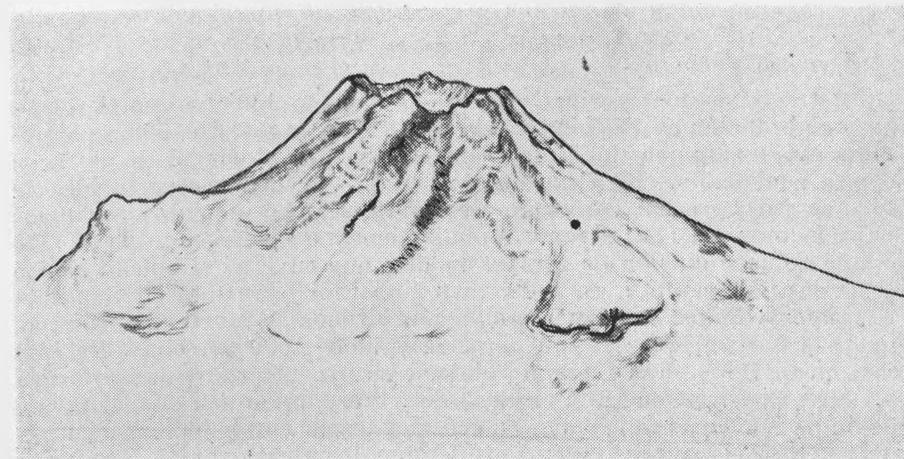


Fig. 8. Vista del Volcán de Fuego, después de la erupción de 1913.

1932. P. Waitz presenta su trabajo: "Bibliografía del Volcán de Colima", en la Sociedad Científica Antonio Alzate. Hasta la fecha es la obra más completa que existe del volcán, conteniendo una enorme riqueza de datos e interpretaciones de gran interés (Waitz, 1936).
1941. La Compañía Mexicana de Aerofoto efectuó una triangulación geodésica, de segundo orden, para el control fotográfico del mosaico aéreo que formó de la zona volcánica de Colima. Durante los vuelos se tomaron magníficas fotografías aéreas oblicuas.
1944. G. Ortiz Santos dirigió en 1943 la expedición geodésica en el Estado de Jalisco, que completó los trabajos hechos en la zona de los volcanes en 1941. Publicó una pequeña monografía con extensos datos topográficos y numerosas fotografías aéreas oblicuas, así como un mapa de la zona volcánica a 1:100,000 (Ortiz Santos, 1944).
1952. A. H. Sosa ascendió al cráter desde el sureste. En un relato sumamente pintoresco proporciona descripciones de la vegetación del volcán y de los acontecimientos históricos ocurridos en sus alrededores (Sosa, 1952).
1957. J. González Reyna describe el desarrollo de la nueva fase de actividad en la que había entrado el volcán en mayo del mismo año (González Reyna, 1958).
1958. La actual expedición al Volcán de Fuego y al Nevado tuvo la ventaja, sobre todas las anteriores, de poder ascender en vehículos hasta alturas considerables, en ambos macizos, aprovechando los caminos hechos por la explotación maderera. Se pudo disponer, además, del material aerofotográfico hecho en 1941, del cual, las fotografías oblicuas, revelan con claridad, relaciones estructurales ignoradas hasta la fecha.

a) *Actividad volcánica 1576-1912*

Los registros más antiguos de que se dispone, indican que el volcán estuvo en erupción en 1576, causando notables estragos. En 1590, se observó una extraordinaria lluvia de ceniza y, en 1611, el día 15 de abril, en violenta convulsión, el Volcán de Colima arrojó grandes cantidades de arena, ceniza y escoria (probable erupción peleana) que cubrieron todos los alrededores. En 1749 se reporta una supuesta erupción, seguida en 1770 por una enorme efusión de ceniza. Se dice que en 1795 el volcán arrojó escoria incandescente y, en 1806, tuvo lugar un terremoto en Zapotlán el Grande (Ciudad Guzmán), población situada al norte del Nevado. Se estimó que en esta ocasión perecieron unas 2,000 personas. De esta fecha, hasta 1808, parece que el volcán mantuvo una actividad eruptiva constante. Otra vez, en 1818, el día 5 de febrero, hubo una erupción, con emisión de inmensas cantidades de ceniza y arena (probable erupción peleana). Algunas cenizas fueron llevadas por los vientos hasta Guanajuato y San Luis Potosí.

Por lo visto, después de esta última explosión, el volcán permaneció inactivo durante unos 50 años. Entretanto, se levantó más y más lava nueva, dentro de la chimenea, hasta que en 1869 entró en otra época de actividad. En vez de salir lava por el cráter se escapó lateralmente, por el flanco noreste del cono, formando el domo del Volcancito (Fig. 4). De él se desprendieron abundantes cantidades de lava, que fueron rellenando el espacio nororiental de la caldera, hasta ocultar su extensión al este del cono.

Después del paroxismo de 1869, el volcán entró en una época de calma relativa, que duró hasta el 26 de febrero de 1872, fecha en que comenzó una nueva serie de erupciones notables. Estas se efectuaron por el cráter principal. En 1880 aumentó la actividad, reportándose que, en 1885 corría por las faldas del cono cantidades apreciables de arena candente; continuó la actividad durante 1894 y, después, fue disminuyendo, pero en 1896 ganó nueva fuerza, alcanzando su grado máximo entre 1899 y 1903.

Para fines de este año, quedó tapado el cráter con un domo de lava que anteriormente (Arreola, 1903) se había derramado por el costado noreste. El 18 de diciembre de 1908, el volcán entró en un corto período de actividad, que se inició con una erupción de cenizas y, en 1909, una pequeña explosión freática abrió dos cavidades en el tapón del volcán. Desde entonces hasta inicios de 1913, permaneció inactivo y en estado fumarólico muy reducido (Fig. 7).

b) *Actividad volcánica 1913-1958*

En 1913 el Volcán de Fuego presentó su última erupción. Esta fue repentina, violenta y de muy corta duración. El día 20 de enero, después de meses de calma absoluta, empezó a desintegrarse el tapón volcánico. Lo que había sido lava viscosa, cargada de vapor, reventó súbitamente y fue arrojada al exterior. Así se produjo la emisión de nubes ardientes, que descendieron por las laderas del volcán, tal como las describe P. Waitz:

"Una vez destapado el embudo, se formaron en él densas nubes de arena fina y caliente, que hirviendo a borbotones se deslizaron entre los dientes y picos del nuevo borde, para correr en seguida, con fuerza irresistible, radialmente, por los flancos del volcán, hacia su pie, encajonándose en su camino por las barrancas de las faldas y llegando por el fondo de ellas, hasta una distancia de 8 km. del cráter, en algunos lugares" (Waitz, 1920: p. 275).

La fuerza de estas emisiones explosivas (erupciones peleanas) fue considerable, por lo que, al cabo de pocos días, lo que había sido un cráter redondo, con labios bien formados, quedó transformado en un boquerón desgarrado (Fig. 8). La última pequeña nube ardiente fue emitida el día 24 de enero, apenas 4 días después del comienzo de la erupción. La emisión de lapilli duró, sin embargo, algunos días más y la de vapor y gases se extendió hasta fines del mes, terminando entonces la actividad.



Fig. 9. El Volcán de Fuego y su tapón en 1941, visto desde el sureste.

Fig. 10. Vista panorámica del tapón en el interior del cráter del Volcán de Fuego tomada desde el margen del labio norte el día 12 de junio de 1958.

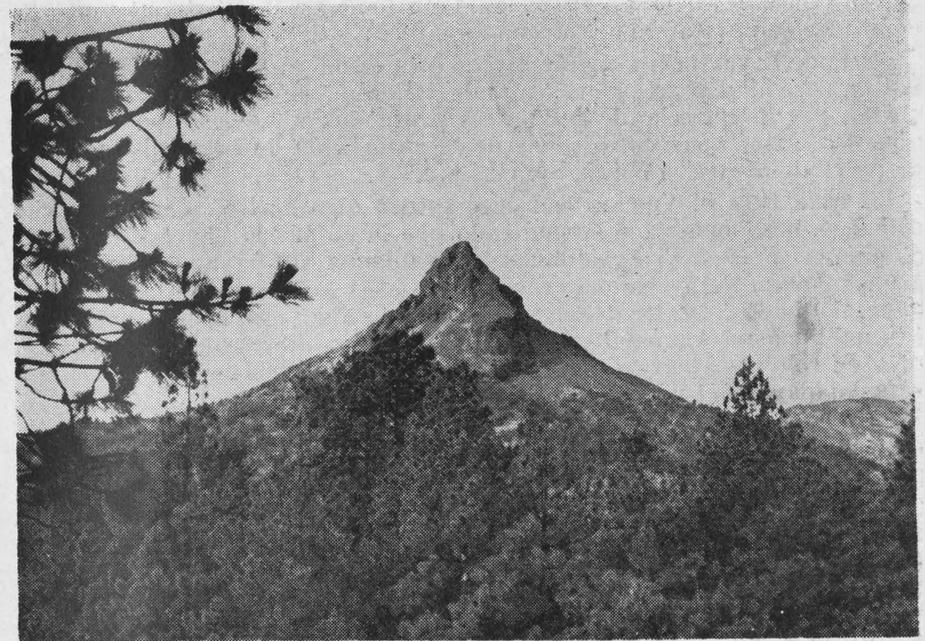
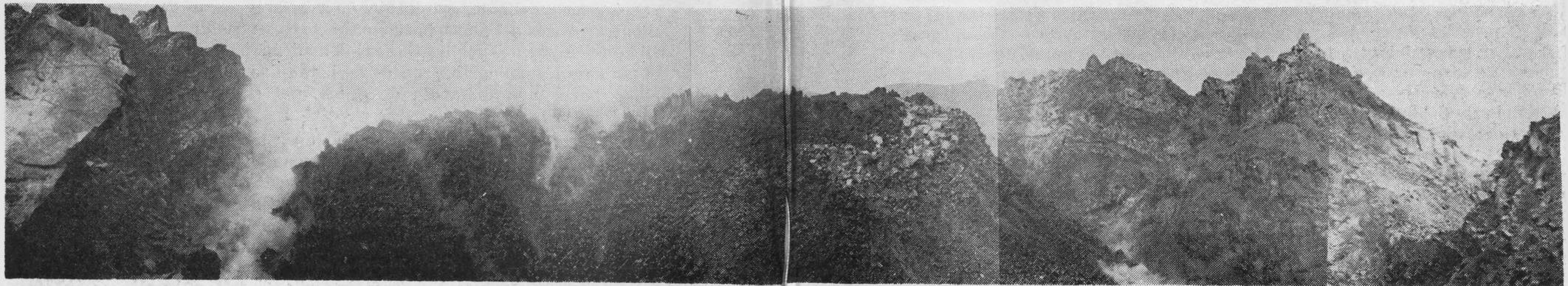


Fig. 11. El picacho del Nevado visto desde el norte.

Quedó el cráter vacío, aparentemente sin fondo, y P. Waitz, al visitarlo en el mes de noviembre del mismo año, dice:

“Pude llegar hasta el cráter y en esta fecha ya no hubo ninguna señal de actividad perceptible. No pude alcanzar con la vista el fondo del cráter, por lo estrecho de sus partes profundas y, además, por estar el aire del cráter opacado, a causa de la suspensión de partículas finas o de polvo de azufre” (Waitz, op. cit., p. 275).

Desde 1914 el Volcán de Fuego estuvo algo activo, pero poco; sin embargo, lentamente fue ascendiendo por la chimenea nueva lava, libre de gases. En 1922 E. Friedländer (Friedländer, 1930) pudo observarla a unos 300 m. del borde del cráter. Para 1931 la lava se hallaba a unos 50 m. del borde inferior del cráter, formando una masa negra, manchada con sublimaciones amarillas de azufre. Estaba abovedada, como un vidrio de reloj, y atravesada por innumerables grietas de las que salían vapores blancos (Zehle, 1932).

Desde esta fecha hasta el mes de abril de 1957, ya no sufrió el tapón movimiento alguno, estando su lava desde entonces, absolutamente petrificada. Únicamente se desintegró el tapón por enfriamiento y contracción, transformándose en una masa de bloques como lo muestran las fotografías aéreas tomadas por la Cía. Mexicana de Aerofoto en 1941 (Fig. 9) y, mejor todavía, las que en 1951 tomó A. H. Sosa (Sosa, 1952) desde el borde septentrional del cráter. Para el 10 de mayo de 1951 este autor anota:

“La bóveda ya no existe. Queda en su lugar un lecho pedregoso negro, plano, a unos 50 m. de profundidad” (Sosa, op. cit., p. 218).

Fue el 14 de mayo de 1957 el día en que se inició, sin manifestaciones notables, una nueva fase de actividad en el Volcán de Colima; desde la ciudad del mismo nombre, los habitantes notaron la formación de nubes de vapor encima del cráter y, a partir de entonces comenzó, lento y sin que fuera directamente perceptible, el movimiento de ascenso del tapón del cráter continuándose hasta la fecha de nuestra visita.

Se pudo escalar el cono del Volcán de Fuego por su ladera septentrional. Abandonando la frondosa vegetación del espacio externo de la caldera, se pasó primero, por encima de las corrientes lávicas, al pie del Volcancito. Entonces se alcanzó, bajando algo, el espacio de La Playa, un arenal prácticamente desprovisto de vegetación, situado entre el cono, por el sur, y las abruptas paredes de la caldera, por el norte. Pasando por encima de lavas que constituyen bancos empinados y avanzando dificultosamente sobre cenizas, lapilli y capas de piedra pómez, se realizó en algo más de 2 horas, la subida de unos 800 m., hasta la hendidura del labio norte del cráter. La vista del interior del volcán fue asombrosa (Fig. 10). El enorme boquerón, cuyo diámetro ha sido estimado en unos 350 m., estaba ocupado por un gran domo, deforme y de costados abruptos, que se componía de bloques multiformes de lava petrificada. La cúspide del domo ya sobrepasaba en altura el nivel inferior del labio crateriano, en algunos metros, por lo que ya no se lograba ver allí el lado opuesto del cráter. Numerosas fumarolas emitían un flujo continuo de vapor; destacaban, en cuanto a su fuerza las fumarolas que emanaban

del contacto entre el tapón domificado y las casi verticales paredes del cráter. Algunas fumarolas emanaban de lo alto del tapón, en sus partes centrales. Además, había varias solfataras, reconocibles por los manchones amarillos de azufre, que rodeaban su boca. Por último, había algunas fumarolas, muy pocas, localizadas en las paredes del cráter. La gran cantidad de vapor que permeaba el tapón, había oxidado las rocas inmediatas, impartiendoles un color rojizo, que contrastaba con el negruzco de las paredes del cráter.

El fenómeno del tapón levantado y transformado en un montón de bloques, se explica por la presencia de una nueva lava líquida localizada en partes profundas de la chimenea y que empuja hacia arriba. El movimiento se desarrolla lentamente, pues en un año el tapón había subido unos 70 m., o sea unos 20 cm. por día. Mientras se observa el interior del cráter, no se percibe calor ni ruido de ninguna de las fumarolas. Sin embargo, durante la visita efectuada a este lugar, el silencio se interrumpía, de vez en cuando, por el ruido causado por el ligero derrumbe de bloques que se producían en el domo levantado. El fuerte viento que soplabla del oeste impedía que los vapores de las fumarolas alcanzaran nuestro punto de observación, por lo que tampoco se pudo percibir cualquier olor irritante.

FORMA Y ESTRUCTURA DEL NEVADO DE COLIMA

Este volcán extinguido (Fig. 11) ya fuertemente desgastado por la erosión, compite en dimensiones con los mayores de México. Hasta la fecha era muy poco conocido; escasos eran los que en el pasado lograban escalar sus cumbres, pues una selva casi impenetrable le defendía de la mayor parte de esos intentos. Es debido a la explotación de la madera que una red de caminos transitables fue abriéndose y conquistando las zonas elevadas de este volcán. Así fue posible que se lograra ascender, en vehículos de doble tracción, desde Ciudad Guzmán hasta el espacio elevado de La Joya (Fig. 12) en poco más de tres horas.

En la profunda barranca de Atenquique, al pie oriental del Nevado de Colima, se pudo apreciar series basales del gran cono. Consisten en gruesos depósitos de lahars y de cenizas, que deben haber descendido en forma de nubes ardientes y que son reconocibles ahora por los típicos horizontes rosados que presentan las superficies de tales cuerpos eruptivos. Las muestras que se colectaron son de andesitas de piroxenas y hornblenda en sus tipos más variados. Estas series de Atenquique hablan claramente de un pasado muy explosivo. No es posible definir su edad geológica, aunque la falta de dislocaciones induzca a asignarlas al Cuaternario.

Ascendiendo sobre el flanco septentrional del Nevado de Colima, rara vez se pudo observar un afloramiento de roca maciza, por la abundancia de capas de pómez, probablemente originadas durante las erupciones del Volcán de Fuego. La entrada al espacio de La Joya, que se efectúa a una altura de unos 3,200 m., está bien marcada, pues es un puerto por el que se penetra, después de abandonar el flanco del volcán, a una enorme

hondonada elevada y reclusa (Fig. 13). En su centro se eleva el pintoresco picacho. Fácil es reconocer en la gran hondonada la caldera del Nevado de Colima, aunque por consecuencia de la erosión sufrida, sus formas ya no estén bien conservadas. Sin embargo, se distinguen las paredes inclinadas y, a menudo abruptas, que en un gran semicírculo rodean a La Joya, por el oeste y por el norte. Después de una interrupción en el noreste, por donde desagua La Joya, dicho círculo se prolonga en el costado oriental y se pierde de vista en su continuación al sur, al desaparecer detrás del picacho. Con la ayuda de las fotografías aéreas es fácil reconocer el círculo de la caldera, sobre todo en su desarrollo alrededor del volcán. En el mapa adjunto (Fig. 1) y en los dibujos de Héctor Xavier (Figs. 3 y 13) se reproduce la gran extensión de dicho anillo. Pero, como se pudo descubrir por el estudio de las fotografías aéreas, no solamente existe una caldera, sino que también se llegan a diferenciar los vestigios de una segunda caldera, excéntrica con respecto a la primera y con restos bien conservados en los flancos poniente y sur del volcán. Las rocas colectadas al margen de la caldera interior son andesitas de piroxenas y hornblenda, de muy distintos tipos.



Fig. 12. La Joya y la cúspide del Nevado vistas desde el norte. En el valle situado a la derecha del picacho, se hallan los vestigios de las glaciaciones. Se reconocen las márgenes erosionadas de dos antiguas calderas de sumergencia.

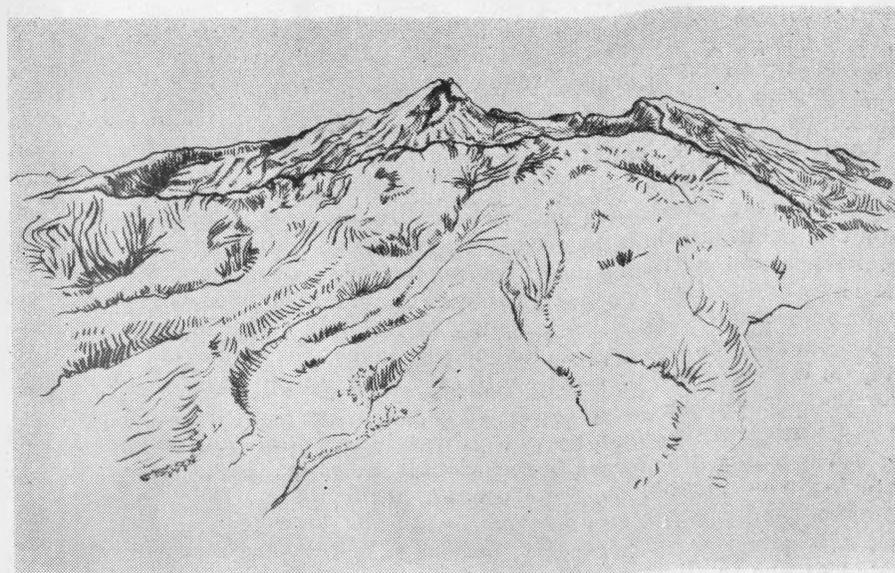


Fig. 13. Vista del Nevado desde el noroeste.

Faltó tiempo para analizar, aunque fuera superficialmente, estos enormes círculos de calderas. Sólo se pudo precisar su posición; pero su existencia indica que el Nevado de Colima pasó por una historia volcánica compleja, parecida a la del Ceboruco. El estudio de las fotografías aéreas hace sospechar que la caldera exterior fue la primera en formarse, ya que en el noroeste queda claramente interrumpida por el margen de la caldera interior (Figs. 1 y 12). El picacho representa parte del cono final, por el que emanaron las últimas lavas, que fueron de andesita de hornblenda e hiperstena. Aunque el tiempo durante el ascenso haya sido muy malo, se pudo ver que el picacho marca, principalmente, la parte oriental y la septentrional del antiguo cono, encontrándose estos segmentos en un estado muy avanzado de erosión.

Precisamente, entre el pie oeste del picacho y el margen de la caldera, en la extensión ocupada por el Paso del Colimote (Fig. 11) es donde nacieron glaciares en el Pleistoceno. Sus vestigios son de una época en la que la actividad del Nevado ya había cesado y la destrucción del picacho estaba muy avanzada.

SITUACION TECTONICA

Quedan situados el Nevado de Colima y su epígono, el Volcán de Fuego, ligeramente al norte del paralelo 19. Forman parte de la línea de grandes volcanes que constituye el "Eje Volcánico Mexicano". Humboldt (1867), hace un siglo, sospechó que ese alineamiento tan perfecto

de volcanes, obedecía a una fractura terrestre de primer orden, hipótesis que se comprobó definitivamente apenas hace unos cuatro años, al descubrir los oceanólogos la continuación submarina del mismo alineamiento, con centenares de volcanes, en el fondo del Océano Pacífico, desde Colima hasta las islas Revillagigedo y aún más lejos (Menard, 1955). A este alineamiento de volcanes sumergidos bajo las aguas del mar, se le ha dado el nombre de "Fracturamiento Clarión".

Por estar localizados los dos volcanes que aquí se describen, en esta zona de debilidad de la corteza terrestre, no sorprende que hayan podido mantener una actividad eruptiva prolongada y compleja. Sus reservas de lavas andesíticas son prácticamente inagotables, pues se renuevan con cada movimiento que sufre la zona Clarión. Las lavas, de características cálcico-alcalinas, son típicas de cuerpos ígneos derivados del Sial, es decir, de la masa cratónica del continente, que aquí debe alcanzar un espesor de unos 40 km.

Es interesante constatar que el Nevado de Colima y el Volcán de Fuego formen una línea casi perpendicular al gran "Fracturamiento Clarión". No es posible observar ningún accidente morfológico en el que pudiera fundamentarse la creencia de que los dos volcanes hayan surgido por una sola y misma fractura, oblicua a la fractura maestra. Más probable es que la distancia entre ambos volcanes (unos 7 km.) defina la anchura del "Fracturamiento Clarión", situándose los conos sobre fallas dirigidas de poniente a oriente. Aunque estas fallas no sean visibles, hay varios fenómenos que soportan esta teoría, indirectamente. Así se ve que al pie noroeste del Nevado existe un valle de bordes claramente marcados, el cual, viniendo desde el ONO, se pierde en la base septentrional del Nevado. Dos conos cineríticos perfectamente conservados, denominados Los Plátanos, ocupan la salida de dicho valle (Fig. 14).

Tanto este valle, que no tiene nada en común con otros de la región, como los dos conos tan recientes, sugieren la existencia de una marcada zona de debilidad, muy joven. En segundo lugar, conviene mencionar el derrame sub-reciente de lavas basálticas ocurrido en el cerro Apaxtépétl, en la planicie que queda en la base noreste del Nevado, cuyo cono cinerítico múltiple, marca, con sus varias bocas, una fractura dirigida de SSO a NNE. Se tiene además, un derrame lateral de lava viscosa que se verificó desde un domo localizado sobre el flanco noreste del Nevado y de este modo se verá que todos estos focos se sitúan, "grosso modo", sobre una línea dirigida de poniente a oriente y parecen reflejar una fractura paralela, al norte de la falla inferida para el Nevado.

Ante toda esta evidencia, aunque en lo individual sin relación aparente de un fenómeno con otro, se cree poder indicar situaciones paralelas en otras zonas volcánicas, que también se encuentran en la misma gran fractura del Eje Volcánico, tales como la región del Parícutín y la de Amecameca. En ambas pueden reconocerse dos alineamientos principales, que son: el primero y principal de O a E, paralelo a la zona de fracturamiento; el segundo, secundario y oblicuo, dirigido de SO a NE. Se ha podido comprobar que ambos alineamientos coinciden a menudo con fallas, so-

bre todo el primero. Así, los volcanes Popocatepétl e Iztaccíhuatl, distantes unos 20 km. uno de otro, marcan el ancho "Fracturamiento Clarión" al sureste de la ciudad de México y definen el paso de dos grandes fallas al sur y al norte de una fosa central. Regresando a la zona de Colima y haciendo uso de esta analogía, sería posible que el valle a que se hizo referencia, tan marcado, defina el paso de una fractura reciente, situada algunos kilómetros al norte de una falla más antigua, que causó la formación del Nevado. El Volcán de Fuego, por otra parte, parece haberse formado sobre una falla paralela que se extiende al sur. El Apaxtépétl, con sus varias bocas, marca el paso de una fractura secundaria, que se separa oblicuamente hacia el nor-noreste de una fractura principal.

El análisis tectónico arriba expuesto es muy aventurado, ya que faltan investigaciones más exactas en la zona volcánica de Colima. Sin embargo, sirve para poner en relación geodinámica y aparentemente ordenada, las distintas manifestaciones eruptivas de la región visitada, pudiéndose deducir que los grandes volcanes allí presentes, deben su origen a dos fallas principales, entre las que se ha ido formando una fosa.

Un fenómeno relacionado con movimientos tectónicos muy especiales, es el constituido por los Hijos del Volcán. No es difícil explicar tanto



Fig. 14. La barranca del Ojo de Agua, situada al pie noroeste del Nevado vista desde el oeste. Se reconocen dos conos escoriáceos de formación reciente.

su origen como su posición, relacionándolos con el hundimiento que originó la caldera del Volcán de Fuego. Las tres prominencias se sitúan sobre la continuación teórica de la falla circular que rodea al cono activo central. Así, según esta hipótesis, los Hijos del Volcán, se deben a movimientos tectónicos locales, internos.

Cabe por fin dilucidar la relación de los volcanes descritos, con los temblores que tan hondamente afectaron a la ciudad de Colima en 1933. Por situarse dicha ciudad al pie del Volcán de Fuego, fue natural se creyera que el terremoto se había originado en las entrañas del gran cono. Hoy se está en posesión de mejores conocimientos; el temblor tuvo su foco a una profundidad de unos 40 km. por debajo de la superficie y fue causado por movimientos de una zona de fracturamientos distinta a la que dio origen al Volcán de Fuego. Aquella zona se extiende al sur de la "Fractura Clarión" y corriendo desde San Blas, en las orillas del Océano Pacífico, hasta el Istmo de Tehuantepec, corta los Estados de Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Los registros sísmológicos han logrado marcar con precisión el recorrido de esta zona de fracturas activas. Por otra parte, el megasismo del año 1806, que destruyó Zapotlán, coincide con un foco que en repetidas ocasiones ha conmovido aquella región al pie del Nevado. Su profundidad es de 60 kilómetros.

APENDICE

Con motivo de las alarmantes noticias que llegaron de las poblaciones localizadas en los contornos del Volcán de Fuego, originadas en falsas informaciones aparecidas en la prensa, el día 8 de marzo de 1960, se efectuó un vuelo sobre el cráter del volcán. Pudo observarse claramente que el tapón ha continuado su ascenso y ha rebasado la línea del borde del cráter en su sector norte, hasta el punto en que ha comenzado a desprender bloques por la ladera correspondiente.

Un día antes del vuelo, se hizo la ascensión, a pie, al volcán, hasta el borde del cráter. Como observación de interés se constató que no se registró ninguna elevación anormal en la temperatura general, como hubiera sucedido si la lava líquida se encontrara cercana. La actividad fumarólica tampoco era mayor que la existente en la visita de 1958.

En las circunstancias actuales, se presenta la posibilidad de un derrame de lava líquida, sea por el punto más bajo del cráter o por alguna de las grietas que abundan en sus paredes y en los flancos superiores del aparato volcánico, ya que la presencia de esta lava, en movimiento ascendente, es la que ha dado lugar, primero, a la fractura del antiguo piso del cráter y, luego, ya en la actualidad, al movimiento ascendente de todo el escombros.

BIBLIOGRAFIA

- ARREOLA, J. M. (1896) *El Volcán de Colima*, Bol. Mensual del Observatorio Central de México.
- (1903) *Las erupciones del Volcán de Colima en febrero y marzo del corriente año*, Guadalajara.
- BÁRCENA, M. (1887) *Informe sobre el estado actual del Volcán de Colima, México*, México.
- CHRUSTSCHOFF, K. DE (1887) *Ueber die eruption des Vulkans von Colima in Mexico in august, 1872*, Res. en Neues Jahrb. Min. Geol., p. 82.
- DÍAZ, S. (1906) *Efemérides del Volcán de Colima*, según observaciones practicadas en los observatorios de Zapotlán y Colima de 1893 a 1905. Comptes rendus du Xème, Cong. Geol. Int. México, T. II, p. 763.
- DOLLFUS, A. y E. DE MONTSERRAT (1867) *Le Volcan du Colima*. Archives de la Commission Scientif. du Mexique, T. III, Paris.
- FRIEDLANDER, E. (1930) *Ueber die mexikanischen Vulkane Pico de Orizaba, Cerro de Tequila und Colima*. Zeitschr. Vulk., Bd. XIII, Berlin.
- GONZÁLEZ REYNA, J. (1958) *Erupción del Volcán de Fuego de Colima*. Abhandl. Deutsch. Akad. Wissensch. Jahrg. N. 1, Berlin.
- HUMBOLDT, ALEXANDER VON (1867) *Kosmos*, IV tomo, Paris.
- MENARD, H. W. (1955) *Deformation of the Northeastern Pacific Basin and the West Coast of North America*, G. S. A. Bull., Vol. 66, N° 9, pp. 1149-1198.
- ORDÓÑEZ, E. (1897) *Les Volcans de Colima et Ceboruco*. Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate, T. XI, México.
- ORTIZ SANTOS, G. (1944) *La zona volcánica "Colima" del Estado de Jalisco*. Universidad de Guadalajara, Jalisco, México.
- PIESCHEL, C. (1856) *Der Vulkan von Colima*. Die Vulkane von Mexiko, Zeitschr. Allg. Erdkunde, Bd. VI, Berlin.
- SARTORIOUS, C. (1871) *Eruption of the Volcano in June, 1869*. The American Journal of Science and Arts. 3rd. Serie, Vol. II, p. 381 y en Smithsonian Report, 1869, p. 423.
- SONNESCHMIDT, F. T. (1804) *Mineralogische Beschreibung der vorzüglichsten Bergwerks-Revier von Mexico oder Neuspanien*. Schleich.
- SOSA, A. H. (1952) *Excursión al cráter del Volcán de Fuego de Colima*, Soc. Mex. Geogr. y Estad.
- WAITZ, P. (1906) *Le Volcan de Colima*, Guide des excursions du X Congrès Géologique Int. Mexique, Foll. XIII.
- (1915a) *Der gegenwärtige Zustand der Mexikanischen Vulkane und die letzte Eruption des Vulkans von Colima* (1913) Zeitschr. Vulk. Bd. I, Berlin.
- (1915b) *Absteigende Eruptionswolken bei den Ausbruechen des Jorullo (1759) und des Ceboruco (1870) in Mexiko*. Zeitschr. Vulk. Bd. II, Berlin.
- (1920) *Nubes ardientes observadas en las erupciones del Jorullo (1769), del Ceboruco (1870) y del Volcán de Colima (1913)*. Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate, T. 37, México.
- (1936) *Datos históricos y bibliográficos acerca del Volcán de Colima*. Mem. Soc. Cient. Antonio Alzate, T. 53, México.
- ZEHLE, W. (1932) *Neue Quellkuppenbildung im Colimokrater*. Zeitschr. Vulk., Bd. XIV, Heft 3, Berlin.

LAS NUEVAS SOLFATARAS DEL VOLCAN DE COLIMA

POR ARMANDO REYES LAGOS

INTRODUCCIÓN

Ya en círculos geológicos se hacían conjeturas sobre una nueva erupción del Volcán de Fuego de Colima, cuando el 27 de mayo del presente año se recibieron noticias de que este coloso había comenzado, una vez más, un nuevo período de actividad. Además, se pregonaba con insistencia que un grupo de nuevas solfataras estaban formando importantes depósitos de azufre.

Con el firme propósito de corroborar las anteriores aseveraciones y auspiciado por el Instituto de Geología de la UNAM, se llevó a cabo una breve excursión al Volcán de Colima con duración de cinco días (septiembre 9-13), tres de los cuales se emplearon en su ascenso y observaciones.

Localización. El Volcán de Colima se localiza en el extremo meridional del Estado de Jalisco y muy próximo al límite septentrional del Estado de Colima, entre los $19^{\circ} 25'$ de latitud norte y $103^{\circ} 43'$ de longitud oeste de Greenwich.

Breve historia sobre su actividad volcánica. El Volcán de Colima, también llamado Volcán de Fuego, cuya cima alcanza una altura de 3,960 m.s.n.m., es el único en su género, en México, que ha mantenido una actividad intensa durante siglos. En los dos últimos siglos, las erupciones han ocurrido con extraña periodicidad, a intervalos de 50 y 60 años. La última actividad eruptiva, aunque breve, ocurrió en el año 1913, cuando voló el tapón volcánico, dejando una chimenea hueca; con el transcurso de los años, nueva lava subió hasta una profundidad de 60 metros, con respecto a la margen superior del cráter, en donde, al consolidarse, se rompió en una masa informe. Posteriormente le sucedió un período de absoluta inactividad.

Durante las presentes observaciones se pudo escuchar claramente los ruidos subterráneos que emite el volcán, en períodos de tiempos irregulares, sin ser precedidos de movimientos sísmicos, como acontece en

casos de verdadera actividad eruptiva. Estos ruidos extraños, a intervalos, en ocasiones de cinco minutos, son difíciles de describir, se asemejan, quizás, a estallidos de cargas de dinamita en el interior de una mina que, apenas ocurrida la explosión, van perdiendo intensidad y terminan en absoluto silencio.

Los pobladores de la factoría Atenquique aseguran que el día 27 de mayo del presente año, fecha en que se inició el nuevo ciclo de actividad, se registró un ligero temblor.

Ambos fenómenos, arriba descritos, se presume que se deben a movimientos de lava en estado de fusión y a repentinas descargas de presión dentro de la cámara magmática de este enorme volcán, que constituyen pruebas fehacientes de una actividad incipiente.

Forma y estructura. El Volcán de Fuego se levanta al sur de una sierra volcánica, misma que alcanza su máximo exponente en el Nevado de Colima, con una altitud de 4,330 m.s.n.m.

Adopta una forma cónica truncada, de flancos con pendientes muy pronunciadas, interrumpido dicho contorno, en el extremo noroeste, por la presencia de un pequeño cono adventicio que se conoce con el nombre de "El Volcancito", que dista, aproximadamente, unos 100 m. del labio superior del cráter.

Por otra parte, derrames lávicos antiguos formaron, al pie meridional del Volcán de Fuego, tres prominencias que en la región se conocen con el nombre de "Los Hijos del Volcán".

Hacia el pie septentrional del cono volcánico principal, puede verse un complejo de bloques lávicos, interestratificados con brechas, de forma semicircular y fuertemente erosionado, el cual P. Waitz (1906), interpretó como los últimos vestigios de una enorme caldera que existió con anterioridad al nacimiento del actual Volcán de Fuego. Las partes este, oeste y sur de esta caldera, quedaron sepultadas por derrames lávicos recientes.

Las evidencias geológicas inducen a pensar que tanto el Nevado como el Volcán de Fuego de Colima, se formaron a partir de una altura de 3,000 metros, sobre una masa efusiva antigua, previamente erosionada.

El cráter tiene sus labios desgastados por erosión y derrumbe, y en su interior presenta muros casi verticales, irregularmente estratificados, por donde han descendido y aún siguen descendiendo bloques lávicos desprendidos desde sus márgenes superiores. En el interior del cráter se puede observar el tapón volcánico, constituido por una enorme masa agrietada, de lava consolidada, de forma irregular, de color negro, que en su extremo norte tiene una profundidad de 50 metros y en su extremo sur casi coincide con el labio del cráter.

Los depósitos de azufre. Para borrar esa idea errónea acerca de "los importantes depósitos de azufre de origen volcánico en México", se hace aquí un breve comentario de los mismos.

En el Japón y en la América del Sur, la actividad solfatárica continúa de sus volcanes, han pasado su principal etapa eruptiva y, a

través de varios siglos, han hecho posible la acumulación de azufre susceptible de explotación. En México, la actividad solfatárica de sus volcanes, incluso el de Colima, ha sido interrumpida por continuas erupciones, evitando así la acumulación de importantes yacimientos; este caso incluye también al Popocatepetl, del cual se explotó azufre en tiempos de la Colonia, época en que su industrialización era sumamente reducida.

La actividad volcánica del Volcán de Colima, en su nuevo ciclo, continúa con gran desprendimiento de vapor de agua fuertemente cargado de S_2O y H_2S , muy irritante a los ojos y el que dificulta la respiración. Estos gases, por su interacción, han formado azufre nativo que, al precipitarse, han impregnado ligeramente las paredes interiores del cráter, dándoles una coloración amarillenta. Dicha precipitación obedece a la ley de Bunsen:



Estas fumarolas y solfataras emanan principalmente de las márgenes exteriores del tapón, es decir, del contacto entre la chimenea y el tapón volcánico. Dado el reducido número de ellas, excepto una o dos de cierta importancia, *la acumulación de azufre carece de interés desde el punto de vista económico.*

Con respecto a las diversas opiniones que se habían suscitado con referencia a los movimientos del tapón volcánico, desde la iniciación de la nueva actividad, se pudo comprobar el ascenso del mismo, comparando fotografías tomadas en distintas épocas —1944, 1952, 1957.

El tapón volcánico que en 1952 fue descrito por A. H. Sosa como una gran masa aplanada, descansando a 60 m. debajo del labio, en la actualidad, su extremo sur casi coincide con dicho labio, constituyendo esto un prueba elocente de la nueva actividad del Volcán de Fuego, 44 años después de su última erupción.

NOTAS SOBRE GEOLOGIA GLACIAL DEL NEVADO DE COLIMA

Por JOSÉ L. LORENZO

RESUMEN

El Nevado de Colima muestra huellas claras de haber estado sometido a procesos de glaciación en el pasado. La importancia de semejantes fenómenos en esta latitud y a esta altura (4,180 m.s.n.m.) señalan una vez más el serio problema que plantean las glaciaciones de las zonas tropicales.

El Nevado de Colima se encuentra a los 19°37' de latitud N y a los 103°37' de longitud al O. de Greenwich y a una distancia de 20 km. a vuelo de pájaro, de Ciudad Guzmán y de 35 km. de la ciudad de Colima, aproximadamente.

Su altura no está bien precisada y, en diversas fuentes, se dan cifras que oscilan entre los 4,330 y los 3,894 m. de altura sobre el nivel del mar. En el caso actual, la altura que se pudo precisar, mediante un altímetro Thommen de bolsillo, graduado hasta los 6,000 m., fue de 4,180 m. con las correcciones del caso.

La vía de acceso normal es por la ladera norte. Se sale de Ciudad Guzmán y tras 11 km. de buena terracería, se toma una brecha maderera, por la que se recorren 17.5 km., salvándose en ellos 1,500 m. de desnivel, para llegar a un paraje conocido como La Joya * que es el lugar más apropiado para establecer el campamento.

La Joya queda al pie de la cara norte de la parte superior del Nevado (Fig. 1), al borde de una barranca que comienza al NNE del mismo pico. La silueta de la montaña, verdadero "horn", conocido entre los alpinistas mexicanos como el "Matterhorn de los pobres", es inconfundible y muy bella. El ascenso hasta la cumbre es un agradable recorrido que puede realizarse en dos horas, aprovechando la brecha que conduce hasta La Joya, pues ésta se continúa hacia el interior de la montaña por casi 2 km. más.

La presencia de los investigadores en este edificio volcánico, era

* Barbarismo por hoyo.

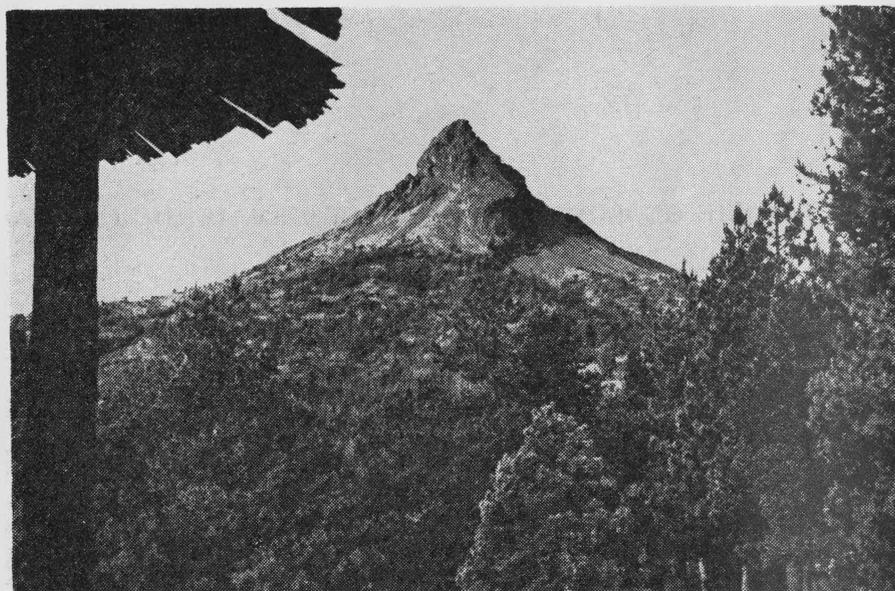


Fig. 1. La cumbre del Nevado de Colima en su cara norte, vista desde La Joya.

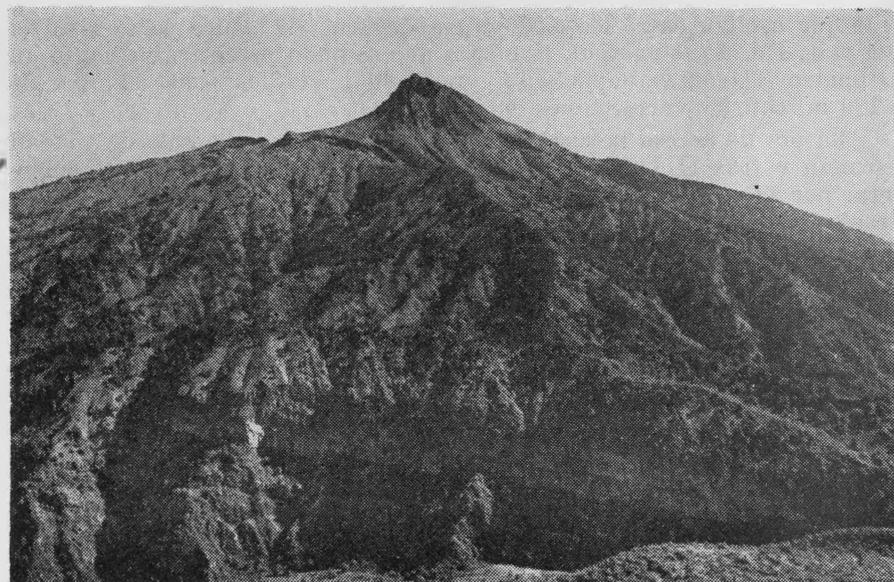


Fig. 2. Ladera sur del Nevado de Colima vista desde el Volcán.

parte del reconocimiento del área volcánica de Colima-Jalisco, que se estaba llevando a cabo.

El Ing. Mooser estudiaría los aspectos vulcanológicos y a cargo del que esto escribe quedaba la búsqueda de posibles huellas de glaciares. Esto, que parece y era una suposición *a priori*, tenía un justificante, dado que en otras cumbres de México, tales como el Cofre de Perote (4,285 m.) y el Nevado de Toluca (4,580 m.) ya se han encontrado estas huellas, a pesar de que en la actualidad dichas partes elevadas se cubren raras veces de nieve. Por ello, existía la posibilidad de que también el Nevado de Colima hubiera tenido glaciares en el pasado, a pesar de lo dicho por Klebelsberg (1949; p. 507), quien niega esta posibilidad.

La existencia de huellas de glaciares en el territorio de México, es un fenómeno que no ha merecido la atención suficiente, aunque es necesario hacer constar que también se han hecho muchas divagaciones al respecto, siendo pocos los trabajos serios que existen, entre los que se cuentan, modernamente, los estudios de De Terra (1947, 1949) y White (1951, 1956).

En los últimos años se ha aumentado nuestro conocimiento de estos fenómenos sobre todo al ampliarse el campo de las posibilidades de su existencia. Cuando los glaciares quedan dentro de las zonas tropicales, tienen características propias, de las cuales, la más conocida es la de estar situados, o haberlo estado, en cumbres cuyas alturas son bastante considerables. Así, los glaciares que todavía existen en la República se localizan en el Citlaltépetl, Popocatepetl e Iztaccíhuatl, montañas que pasan todas de los 5,000 m. de altura sobre el nivel del mar. En este caso, el fenómeno, aunque no muy bien explicado por la ausencia de investigaciones de tipo meteorológico, se atribuye a que la relación, altura-precipitación, norma el que esta última se efectúe en forma de nieve (una nieve por cierto muy especial, en pequeños gránulos casi siempre, aunque también cae en forma de copos) y, por las bajas temperaturas que normalmente reinan en estos lugares, a causa de su altura, la nieve puede acumularse hasta formar, primero, congesta y luego, hielo, originándose así el glaciar.

Se sabe que los glaciares ocuparon en el pasado lugares que ahora difícilmente se imaginan cubiertos de hielo. Así, en la isla de Hawái, los hubo, lo mismo que en Costa Rica. En el primer caso se han encontrado sus huellas en el edificio volcánico del Mauna Kea (Gregory y Wentworth, 1937; Wentworth y Powers, 1941; Stearns, 1945; Stearns y Macdonald, 1946; Wentworth, 1956) de 4,185 m. de altura sobre el nivel del mar, lo que equilibra el que la isla se encuentre casi en el paralelo 20° de latitud norte. El segundo caso es más difícil de imaginar, ya que las huellas fueron encontradas en una sierra de altura mucho menor, en el cerro de Chirripo, de 3,820 m. de altura, a una latitud de cerca de 10° N (Weyl, 1956).

Además, está el casquete glaciar que aún persiste en las montañas de Nueva Guinea, a 4° de latitud sur, teniéndose pruebas de que alguna

vez el límite de los hielos descendió hasta los 2,000 m. y, también en este caso, se trata de montañas que oscilan entre los 4,080 y los 5,030 m. de altura (Dozy, 1938).

Desde luego, en la región andina, en plena zona ecuatorial, se encuentran no sólo huellas de glaciares, sino los glaciares mismos, pero todos ellos en montañas de más de 4,000 m., alcanzando algunos macizos cerca de los 7,000 m. Esto, que se señala para América del Sur, también sucede, aunque en menor escala numérica, en África Ecuatorial.

Es visible cómo el factor latitud se anula con la altura sobre el nivel del mar, permitiendo la existencia de fenómenos propios de latitudes muy superiores, dentro de las zonas tropicales.

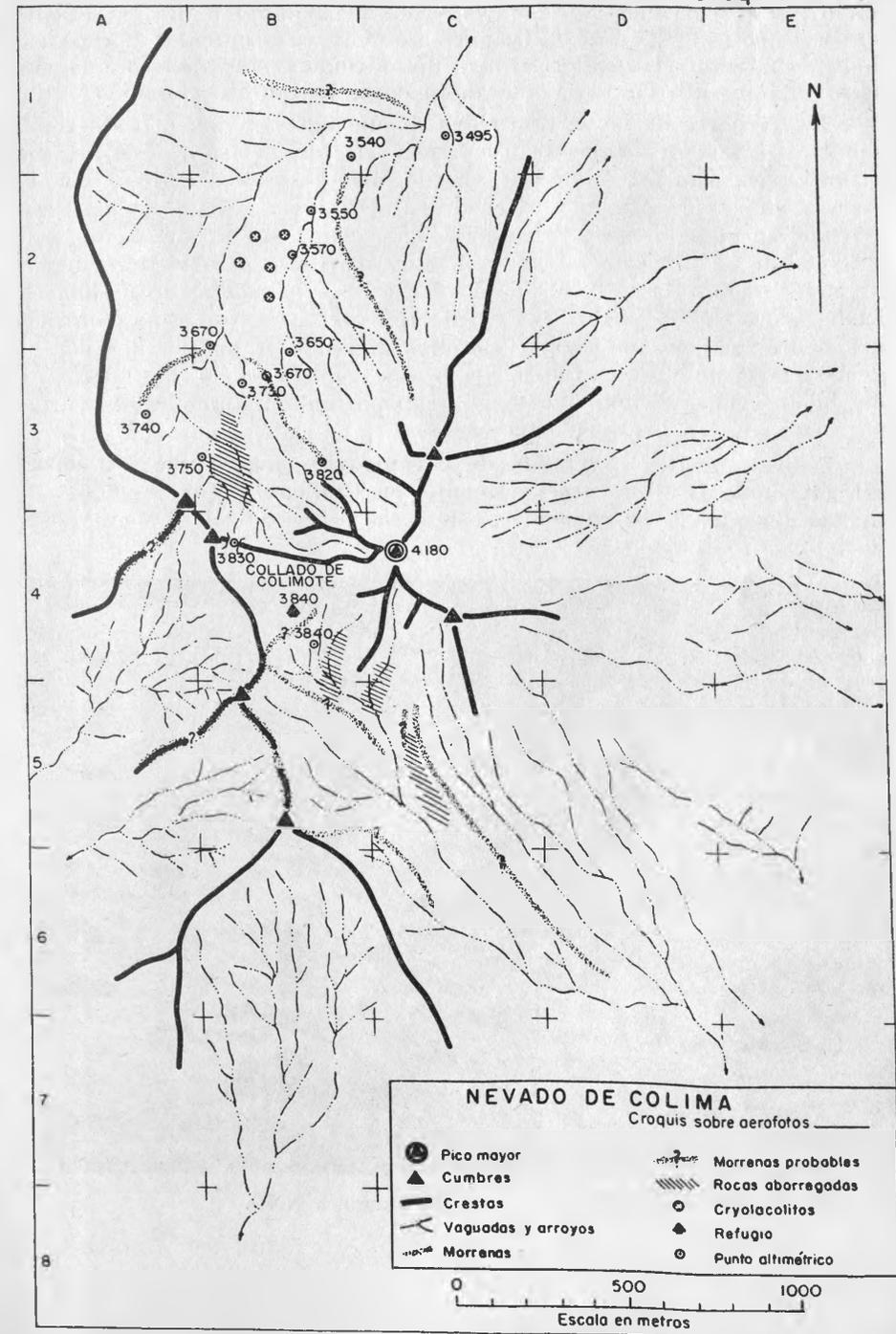
Dentro de esta fenomenología especial, queda incluido el que en todos los casos virtualmente, las montañas glaciadas de las zonas tropicales son edificios volcánicos, algunos de ellos bastante jóvenes. A veces sucede que no hay huellas de glaciares en montañas cuya altura actual es comparable con otras que sí los tuvieron, por lo que se debe admitir la posibilidad de que esas montañas no estaban todavía formadas, y que esos edificios volcánicos aún no habían alcanzado su actual altura o que las huellas de los glaciares hayan desaparecido a consecuencia de erupciones posteriores que las obliteraron con lavas o productos cineríticos, o bien que, por ser las erupciones de tipo explosivo, destruyeron toda evidencia.

Era normal, en vista de los antecedentes, que se dirigiera la investigación a localizar huellas de glaciares. Ya en el estudio previo de las fotografías aéreas del Nevado de Colima, fue posible discernir algunas formas y modelados que pudieran ser los que se trataba de encontrar, pero este tipo de observación sólo tiene validez cuando se corrobora con el examen en el terreno de los supuestos accidentes localizados en el gabinete.

Así fue como tras algunas horas, relativamente pocas, de recorrido por la barranca NNO del Nevado, se tuvo la casi seguridad de que también aquí había habido glaciaciones, lo que se confirmó totalmente al día siguiente cuando se repitieron y ampliaron las observaciones de esta barranca y se hizo un somero recorrido de la que se encuentra al SSO (Fig. número 2) que también fue positivo.

Desde el lugar donde se deja el vehículo, que queda fuera del croquis número 1, hacia el N, y a una altura de 3,350 m., aproximadamente, se empieza el ascenso propiamente dicho y se tuvo la impresión desde luego, de haberla comenzado por el lomo de una morrena, lo que resultó cierto, ya que el sendero sube con dirección general O y, por un tramo relativamente corto, por la morrena que se extiende por los cuadros B-1 y C-1. En el croquis aparece como dudosa y así debe ser, ya que su extensión total no está bien delimitada, lo que también sucede con su correspondiente situada al lado opuesto, que sale del cuadro 3-C y termina en el 2-B, en la cota 3,540. De estas dos morrenas no se tiene material fotográfico a causa de las malas condiciones del tiempo.

Croquis N° 1



Estas dos morrenas probables serían las laterales de un avance del hielo por la barranca NNO, que descendió hasta un punto intermedio entre las cotas 3,495 y 3,540. La parte de morrena terminal donde podría haberse situado el máximo avance del hielo, ha sido desmontada por el arroyo que allí circula y que ahora corre bastante encajonado.

En la parte de la barranca que queda aguas arriba de esta zona, donde se supone debió quedar la morrena terminal de este primer avance, el valle se ensancha, habiendo labrado sus cauces, los arroyos que lo surcan, sobre un antiguo y extenso abanico aluvial. Según se iba recorriendo, se notaban unas depresiones casi circulares, en pendiente, con un reborde en la parte inferior, no muy marcado, pero visible; de un diámetro que oscila entre los 5 y los 8 metros, llegando a profundidades hasta de dos metros (Figs. 3 y 4). Inicialmente intrigaron estas depresiones, sobre todo porque algunas de ellas han sido transformadas por la gente que viene a buscar hielo y que las emplean como depósito para los bloques que cortan, que luego transportan en animales de carga para su venta en los pueblos cercanos.

Posteriormente y tratando de encontrarles una explicación natural, revisando la literatura pertinente, en Cailleux y Taylor (1954) y en Tricart (1953) se encuentra este caso descrito con el nombre de



Fig. 3. Cryolacolito en la barranca NNO.

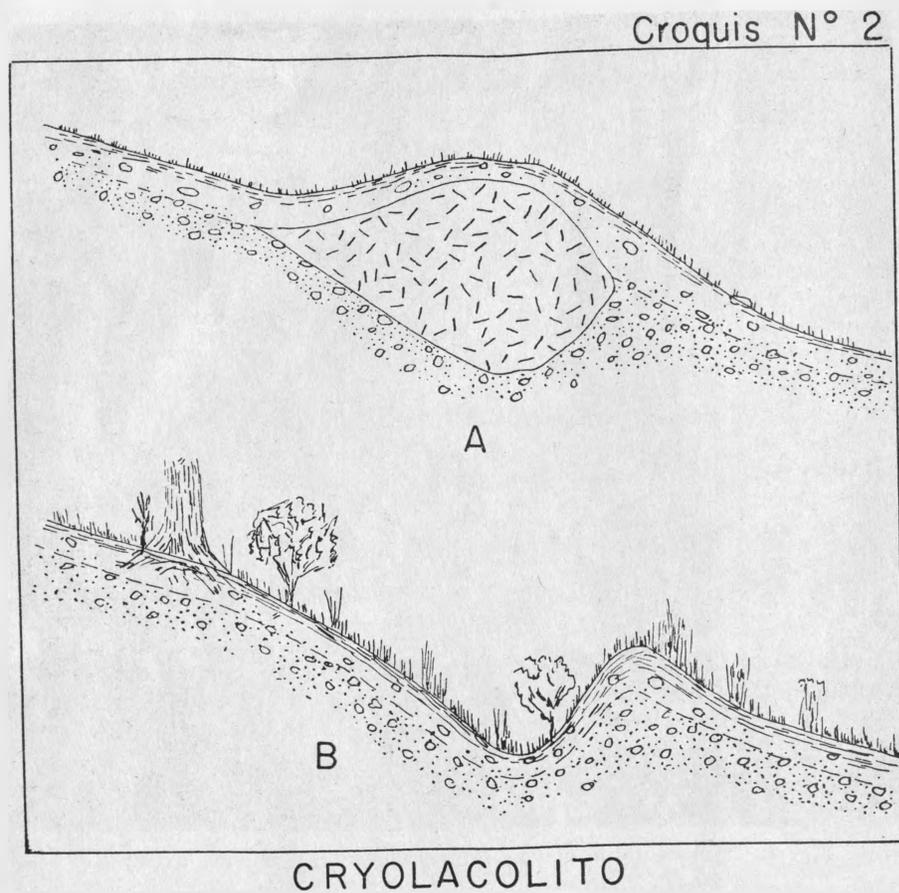


Fig. 4. Cryolacolito de mayores dimensiones en la misma barranca.

“hidrolacolito” (término con el que no estamos de acuerdo, por lo que se propone su cambio por el de “cryolacolito”, por razones obvias).

En las zonas de condicionamiento periglacial, se forman lentículas de hielo bajo la superficie del suelo, por causa de la existencia de suelos permanentemente congelados, que se conocen con los nombres de pergelsoil, tjäle o permafrost. Estas lentículas van engrosando mientras las condiciones mediales lo permiten, formando montículos que en regiones como Alaska o Siberia, alcanzan de 1 a 6 m. de alto, por 20 o 100 m. de diámetro. Cuando sobreviene un cambio de clima, en el que la temperatura sube, el hielo se funde y cuando desaparece, se forma una especie de hoyo, tal como las que se encuentran aquí. (Croquis número 2.)

Desde luego, en nuestro caso, el cryolacolito no es de las dimensiones de los encontrados y descritos en las zonas periglaciares mencionadas. Es necesario tener en cuenta que el periglacialismo de los pe-



queños glaciares de montaña de las zonas tropicales, nunca fue muy extenso ni muy acentuado y, sobre todo, que si es cierto que apenas se conocen los fenómenos más generales de este glaciario, menos aún se sabe del periglaciario que los acompañó.

Más arriba todavía, por la cota 3,740, se encontraron las primeras rocas aborregadas (Tricart y Cailleux, 1953; p. 203 y sig. Flint, 1957, p. 55 y sig.). Hasta este momento, la existencia de las morrenas laterales había parecido bastante clara, pero, en muchos casos, no es difícil confundirlas con fenómenos geomorfológicos, de forma semejante, pero de muy distinto origen, como pueden ser las crestas de un thalweg. Ahora, ante las rocas aborregadas (Figs. 5, 6 y 7), tan claras y profundas, no había duda: la barranca NNO del Nevado de Colima había contenido un glaciar.

Quedaba todavía un punto oscuro: ¿por qué entre las morrenas de las cotas 3,495 y 3,540 y las rocas aborregadas que van de la 3,740 a la 3,820 no se había encontrado ninguna otra huella de tipo glacial?

La respuesta vino rápidamente, en cuanto se observó el paisaje circundante con atención. Claramente se veían dos morrenas laterales, que no tenían conexión posible con las anteriores. Una, al E, comienza debajo de los cortes a pico que rematan en la cumbre norte del Nevado (Figs. 8 y 9), iniciándose con claridad desde la cota 3,830 y descendiendo hasta el borde del arroyo, en la cota 3,665, mientras la otra, más difícil de localizar, ocupa una posición menos conspicua en la ladera opuesta (Fig. 10) desde la cota 3,740 a la 3,670. También en este caso ha desaparecido la parte terminal de la morrena, rota y desalojada por el arroyo.

Las rocas aborregadas que se encontraron en esta parte, muestran un aspecto bastante fresco ya que el pulimento es notable y las estrías y acanaladuras no tienen sus ángulos gastados por la intemperie, señalando todo ello un origen bastante reciente. El problema que plantean es de otro tipo. En ningún caso muestran más que una serie de marcas, todas en un mismo grado de inclinación. En otras palabras, no hay entrecruzamiento de estrías y acanaladuras, como debía existir al situarse dos avances del hielo. Esto sólo puede explicarse en función del tiempo transcurrido entre ambos avances, que debe haber sido lo suficientemente grande, como para que las huellas dejadas en la superficie de las rocas aflorantes por el primero, hayan podido desaparecer por el meteorismo o hayan quedado tan debilitadas que, ante la labor abrasiva de los materiales contenidos en el hielo del segundo avance, hayan sido borradas y dejado paso a las nuevas.

La cuenca de recepción del glaciar que ocupó la barranca NNO, puede situarse en el cuadro 3-B mayoritariamente, extendiéndose algo sobre los 4-B, 3-A y 4-C. Aún considerando toda esta área, el glaciar correspondiente a la última época, era de pequeñas dimensiones, no así el de la anterior o primer avance que tenía más de un kilómetro de longitud.

Al pasar el collado del Colimote (3,830 m.) se entra en un pequeño altiplano ondulado, el cual, en dirección O se corta abruptamente para dar lugar a una barranca que se inicia con ese rumbo. A ambos lados de ella, las crestas que la delimitan por el N y por el S, tienen el aspecto de ser morrenas laterales. El reconocimiento hecho no alcanzó a esta parte de la montaña, pero el estudio de las fotos aéreas correspondientes induce a pensar que efectivamente, por aquí debe haber bajado otra lengua glacial.

Adelante del refugio "Moisés Eskenazi Rome" (3,840 m.) en dirección sur, se inicia otra barranca, la SSO, en la que también se encontraron abundantísimas huellas de pasadas glaciaciones, en forma de rocas aborregadas, que aquí son mucho más numerosas que en la barranca NNO. (Figs. 11 y 12.)

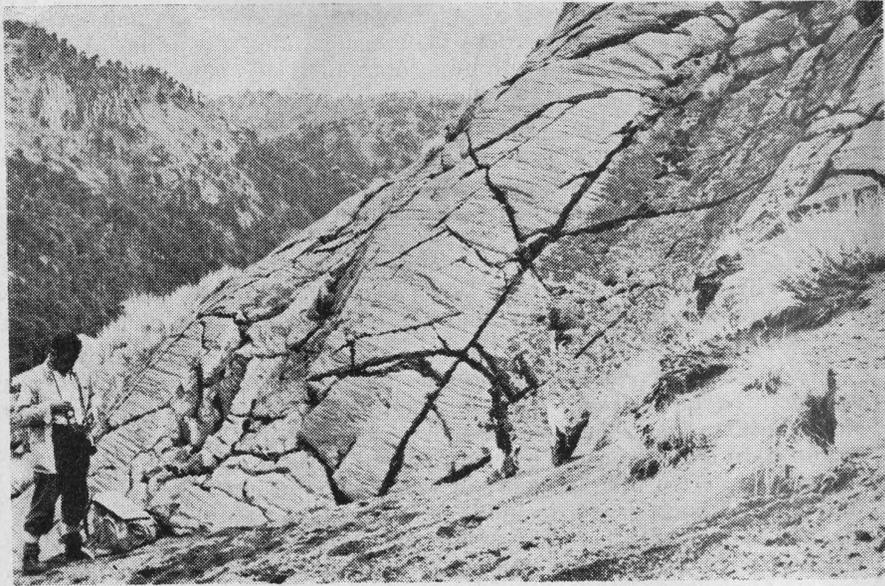


Fig. 5. Rocas aborregadas de la barranca NNO.



Fig. 6. Rocas aborregadas en la barranca NNO.

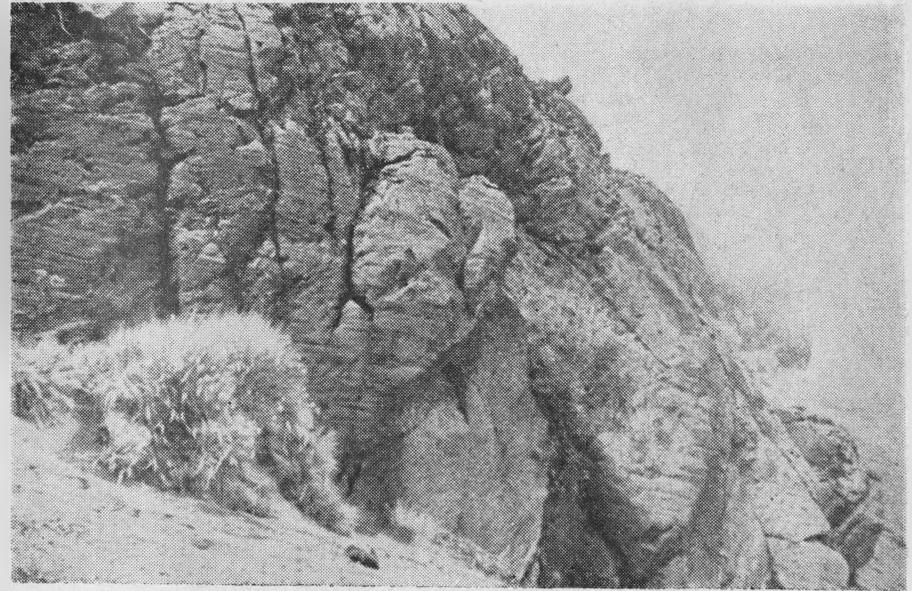


Fig. 7. Rocas aborregadas en la barranca NNO.



Fig. 8. Parte superior de la morrena E de la barranca NNO.

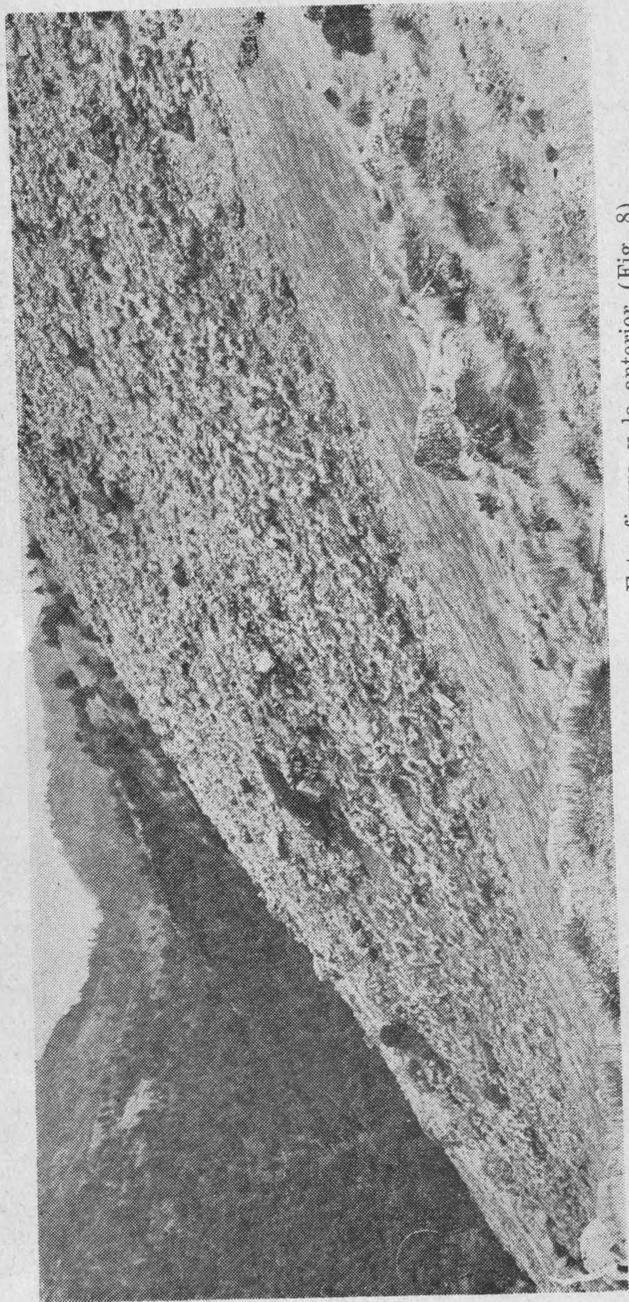


Fig. 9. Parte media de la misma morrena. Esta figura y la anterior (Fig. 8) corresponden al último avance del hielo en esta parte.



Fig. 10. La morrena O del mismo avance de la Fig. 9, reducida a una pequeña loma arbolada que se interrumpe en las escarpas, en su extremo de la derecha.



Fig. 11. Area de rocas aborregadas en la barranca SSO.



Fig. 12. Las rocas aborregadas y la morrena E del primer avance en la barranca SSO.

El poco tiempo de que se dispuso en el Nevado de Colima (dos días nada más) no permitió que se extendiera el reconocimiento barranca abajo, como debiera hacerse. Es por ello que los datos de que se dispone para esta parte del Nevado, se basan en el hecho incontrovertible de las rocas aborregadas, con su pulimento, estrias y acanaladuras características. Las probables morrenas que se sitúan en el croquis, surgen, sobre todo, del estudio de las aerofotos y, nuevamente, repiten la secuencia de la barranca NNO: dos avances de hielo.

No se descarta la posibilidad de que en estudios más minuciosos que los que en tan corto plazo se pudieron realizar, aparezcan más restos de glaciación en las otras caras del triedro, que es la cumbre del Nevado de Colima.

Hay ya elementos para decir que: *a)* la glaciología en México, al igual que en todas las regiones tropicales con montañas de alturas mayores o cercanas a los 4,000 m. sobre el nivel del mar, presenta características muy interesantes y de mucha mayor amplitud de lo que hasta ahora se suponía; *b)* hasta donde se sabe, en todos los casos se encuentran restos de movimientos de masas de hielo que, por sus ritmos, pueden dar base para correlaciones cronológicas con los observados en otras latitudes, con la reserva de determinar, previamente, si las alteraciones climáticas que fueron el origen de su aparición y desaparición,

son sincrónicas o asincrónicas; *c)* como secuela natural a la existencia de áreas glaciadas, se presentan, también, fenómenos de periglaciario que, al comparárseles con sus semejantes de otras latitudes, posiblemente sean de tamaño menor, pero queda abierta la posibilidad de que la fenomenología del periglaciario de los trópicos sea diferente en algunos aspectos.

La conclusión final no debe ser de tipo particular, referida al hecho de haber encontrado huellas de glaciaciones en el Nevado de Colima. Se está ante un campo de estudio de gran interés, posible clave del Pleistoceno de México y de desarrollo necesario para el conocimiento de la glaciología tropical, lo que lleva estos estudios a un ámbito mucho mayor. Que estas posibilidades sean comprendidas y que algún día reciban la ayuda que merecen.

BIBLIOGRAFIA

- CAILLEUX, A. y G. TAYLOR (1954) "*Cryopédologie: Etude des sols gelés*," Expéditions Polaires Françaises, Missions Paul-Emile Victor: IV; 218 pp., Paris.
- DE TERRA, H. (1947) "*Teoría de una cronología geológica para el Valle de México*," Rev. Mex. de Ests. Antrops., 9, pp. 11-26, México.
- DE TERRA, H. JAVIER ROMERO y T. D. STEWART (1949) "*Tepeexpan Man*", Viking Fund Pubs. in Anthropol. N° 11. New York.
- DOZY, J. J. (1938) "*Eine Gletscherwelt in Niederländische-Neuguinea*," Zeitschr. für Gletscherkunde, 26, pp. 45-51, Berlin.
- FLINT, RICHARD, F. (1957) "*Glacial and Pleistocene Geology*" XIII, 553, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- GREGORY, H. E. y C. K. WENTWORTH (1937) "*General features and Glacial Geology of Mauna Kea, Hawaii*", Bull. Geol. Soc. of Amer., 48, pp. 1719-1742, Baltimore.
- KLEBELSBERG, R. von (1949) "*Handbuch der Gletscherkunde und Glazialgeologie*", Viena.
- STEARNS, H. T. (1945) "*Glaciation of Mauna Kea, Hawaii*", Bull. Geol. Soc. of Amer., 56, pp. 267-274, Baltimore.
- STEARNS, H. T. y G. A. MACDONALD (1946) "*Geology and groundwater resources of the island of Hawaii*", Bull. 9, 363 pp., Honolulu. (Division of Hydrography.)
- TRICART, J. (1953) "*Cours de Géomorphologie; Deuxième partie: Géomorphologie Climatique. Fasc. I; Le modelé des pays froids: 1. Le modelé périglaciaire*", Paris.
- TRICART, J. y A. CAILLEUX (1953) "*Cours de Géomorphologie; Deuxième partie: Géomorphologie Climatique. Fasc. I. Le modelé des pays froids: 2. Le modelé glaciaire et nival*", Paris.
- WENTWORTH, C. K. y W. E. POWERS (1941) "*Multiple Glaciation of Mauna Kea, Hawaii*", Bull. Geol. Soc. of Amer., 52, pp. 1193-1218, Baltimore.
- WENTWORTH, C. K. (1956) "*Glaciation of Mauna Kea, Hawaii*", XX Congreso Internacional de Geología (en prensa), México.
- WEYL, RICHARD (1956) "*Eiszeitliche Gletscherspuren in Costa Rica (Mittelamerika)*", Zeitschr. für Gletscher und Glazialgeol., III, (3), Innsbruck.
- WHITE, S. E. "*Geologic Investigation of the late Pleistocene history of the volcano Popocatepetl, Mexico*", Abstract of Dissertation, 7 pp. Privately published, Brattleboro.
- (1956) "*Geología Glacial del Iztaccíhuatl*", en: "La Cuenca de México, consideraciones geológicas y arqueológicas" Pub. Núm. 2 de la Dirección de Prehistoria, México.

LOS GLACIARES DE MEXICO

POR LUIS BLÁSQUEZ L.

RESUMEN

Las observaciones realizadas durante diez años en el Iztaccíhuatl, relativas a las variaciones de altitud de la línea de nieves, permiten concluir que no existe una limitación relativamente fija de esa altitud, mientras que las acumulaciones de hielo más o menos estático sí se ajustan a un nivel inferior relativamente estable.

En esa montaña sólo existen dos glaciares de pequeña extensión en la vertiente occidental: el Ayolotepito, al N., entre la cabeza y el pecho y el Ayoloco, entre el pecho y las rodillas, al sur. El primero llega a desaparecer por completo y su ausencia temporal fue observada desde 1893, mientras que el segundo, en su retroceso, no llega a desaparecer, por ser mayor su cuenca nevada.

INTRODUCCION

Con motivo del Año Geofísico Internacional, 1957-1958, se formó un comité mexicano bajo la presidencia del Sr. Ing. Ricardo Monges López, quien nombró al personal colaborador en las distintas ramas de investigación que abarca el programa formulado. Cupo al autor de este estudio el honor de ser designado para el estudio de los glaciares de México, como miembro del Instituto de Geología, que en ocasiones anteriores había llevado a cabo varios estudios de la glaciación y que por condiciones especiales estaba en posesión de un acervo de datos bastante importante sobre las variaciones anuales del nivel de las nieves perpetuas en el Iztaccíhuatl.

Gracias a la generosa cooperación de la Cia. de las fábricas de Papel de San Rafael, por gentileza de su gerente general, Ing. don José de la Macorra, se dispuso de esos datos, así como de planos, fotografías, medios de transporte, campamentos y personal auxiliar. Asimismo el decidido empeño del señor Ing. Guillermo P. Salas, Director del Instituto

de Geología, hizo posible la obtención de material muy valioso, y el desarrollo de excursiones de estudio de las regiones más interesantes en el aspecto glacial.

No se consideran en este estudio como glaciares los cuerpos de hielo permanente del Popocatepetl y del Citlaltépetl, ni aun los del Iztaccíhuatl, a los que se ha llamado "heleros", por más que esta palabra se usa como sinónimo de glaciar.

Tampoco se mencionan las cúspides nevadas del Potosí en N. L., Nevado de Colima, Nevado de Toluca, Cofre de Perote y Malintzi; por carecer de datos que permitan conocer las fluctuaciones del límite inferior de sus zonas nevadas. Por otra parte las conclusiones que se alcanzan con el estudio del Iztaccíhuatl son aplicables a todas las elevaciones que rebasan la línea de las nieves perpetuas, motivo por el que se concentra la atención en esta montaña que resulta típica y ejemplifica mejor que las otras, los fenómenos glaciares del país.

LOCALIZACION

El Iztaccíhuatl se encuentra a los 98°38'21" W de Greenwich y 19°10'44" de latitud norte. Su cumbre más alta alcanza 5,286 m. de altura sobre el nivel del mar. Forma parte de la Sierra Nevada, orientada de N a S que con el volcán Popocatepetl, se liga a la sierra del Anáhuac (1) * y separa los valles de México al W del de Puebla al E. (Fig. 1.)

Los volcanes de Colima, Nevado de Toluca (4,500 m.), Popocatepetl, Malintzi y Citlaltépetl o Nevado de Orizaba pertenecen al llamado "Eje Volcánico" (2), señalado por primera vez por Humboldt (3).

El Cofre de Perote o Naucampatépetl, se encuentra al N del Citlaltépetl en la misma sierra, orientada de N a S, a los 97°08'19" W y 19°20'34" de latitud N y 4,282 m. de altura, sobre el nivel del mar. El cerro Potosí, en el Estado de Nuevo León, es el más aislado y aparentemente no tiene relación con los otros. Está situado a 100°52' W y 25°01' N con su cumbre a 3,600 m. de altitud.**

RELIEVE

La topografía del Iztaccíhuatl es, por su origen, fundamentalmente volcánica, resultado de la superposición, casi directa, de corrientes de lava andesítica y, por consecuencia, flujos viscosos de tendencia acumulativa, cortados por una erosión glacial vigorosa. Los procesos de zapa (Bergshund) de alternativas de acomodamientos de masas de

(*) Los números entre paréntesis se refieren a la bibliografía que aparece al final de este estudio.

(**) Se emplea la palabra altitud, para indicar altura sobre el nivel del mar.

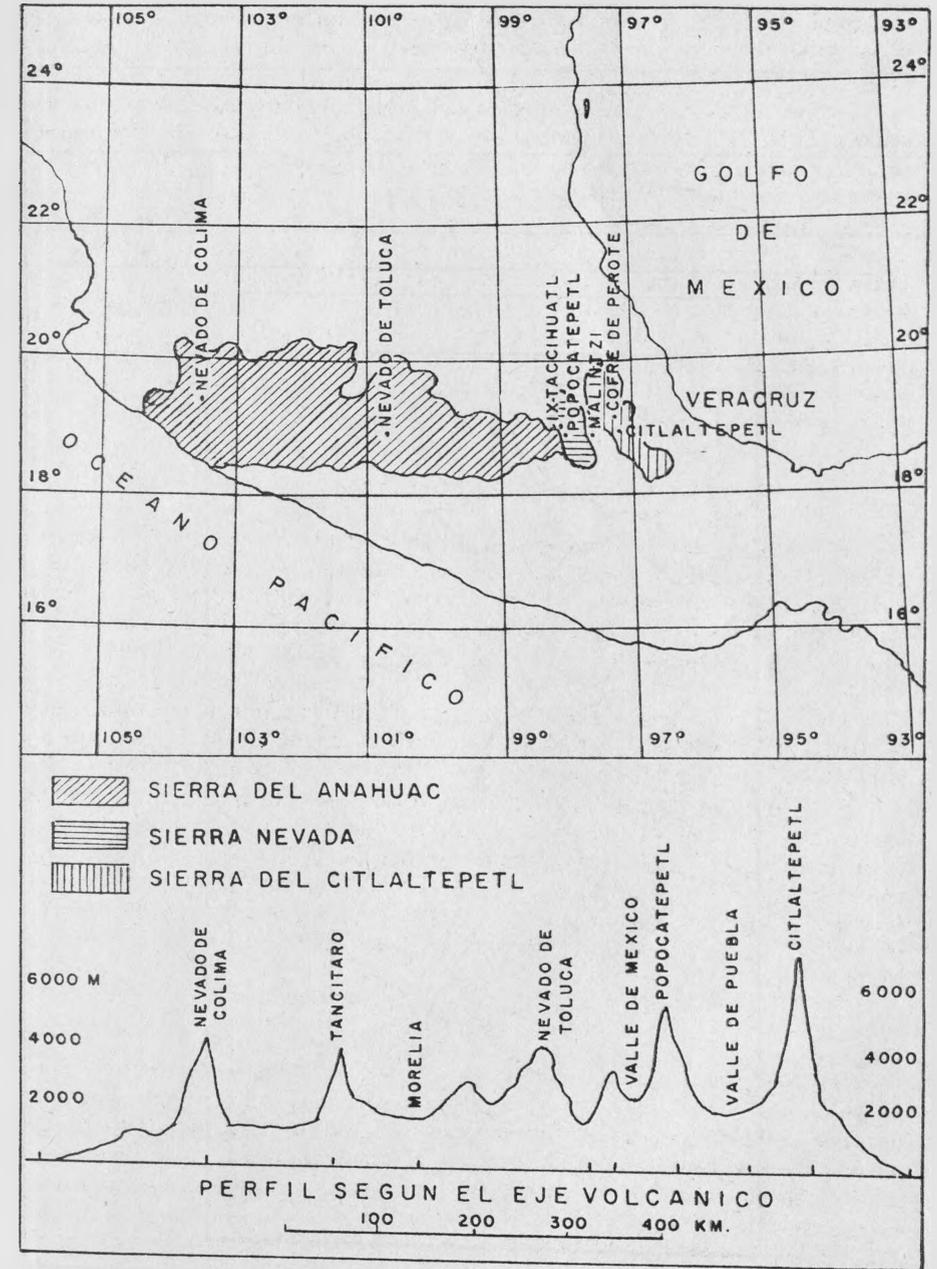


Fig. 1. Situación del Iztaccíhuatl y principales volcanes de México.

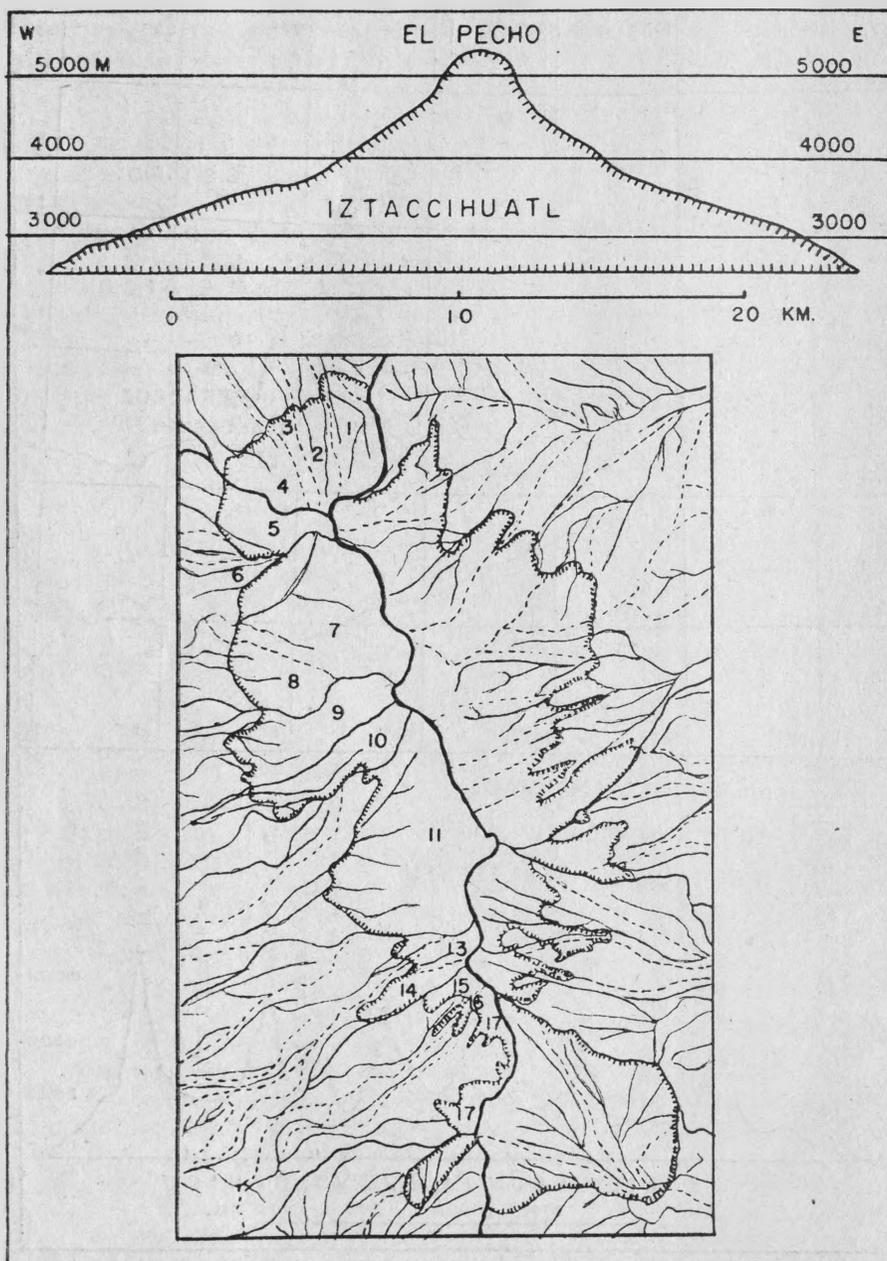


Fig. 2. Perfil de la montaña Iztaccíhuatl y cuencas hidrográficas.

hielo y nieve, con deshielos completos, dieron lugar a paredes verticales o de fuerte inclinación, que formarían circos de ser más continuo el trabajo del hielo, limitándose a cortar las diferentes corrientes en acantilados, frecuentemente de gran altura.

El resultado del trabajo de esta erosión, se traduce en la formación de casquetes mesiformes, como los correspondientes al pecho y las rodillas, peñones como el de la cabeza; torrecillas y picachos como los pies, Las Torrecillas, Texcal San Diego y otros.

En ambas vertientes del Iztaccíhuatl, inmediatamente abajo de la zona nevada, se inician numerosas y pequeñas cuencas hidrográficas que van adquiriendo importancia paulatinamente, conforme se desciende, encontrándose ya perfectamente definidas a altitudes comprendidas entre 3,900 y 4,500 m. (Fig. 2.) Estas cuencas se prolongan hacia la parte nevada de la montaña y fraccionan las acumulaciones de hielo que, por su individualidad, impiden, en la mayoría de las cuencas, la formación de glaciares, asunto que será tratado más adelante.

El Iztaccíhuatl consta de una gran plataforma, que se levanta bruscamente sobre las planicies de Chalco y Amecameca (Fig. 2) y surcada por profundas barrancas, llega a la altitud de 3,600 m., límite de la vegetación (Fig. 3), donde hay una fuerte ruptura de pendiente que destaca el cuerpo principal de la montaña, que se eleva sobre la plataforma, constituyendo el remate que, cubierto de nieve y hielo, habría de ser llamado por los aztecas, Iztaccíhuatl (mujer blanca), en actitud de estar acostada, por lo que algún autor de habla inglesa le llamó "The sleeping woman".

La Fig. 4, muestra la montaña desde una altitud de 2,530 m. en la fábrica de San Rafael, notándose a la derecha el flanco boreal del Popocatepetl, cuya posición se ilustra en la Fig. 5.

GEOLOGIA

Las rocas más antiguas, desde la costa de Veracruz hasta la cuenca de México, son las calizas y lutitas del Cretácico y seguramente forman el asiento de las formaciones volcánicas del Iztaccíhuatl, consistentes principalmente, en andesitas acompañadas por tobas y brechas.

Posiblemente la Sierra Nevada es el resultado de erupciones por grietas, ya que en el Iztaccíhuatl, no se distinguen cráteres y algunos conos volcánicos secundarios son muy posteriores. Las andesitas y rocas asociadas, son miocénicas, mientras que los conos y las lavas basálticas son del Pleistoceno y Holoceno. El espesor de la formación volcánica puede estimarse en 3,500 m. como mínimo. El sistema de fracturas emisoras, de rumbo N-S, corresponde al Appalachiano, normal al Eje Volcánico E-W del sistema Michoacano o Cascadiano.

Las andesitas están dispuestas en corrientes de diverso espesor, inclinadas hacia uno y otro lado de la cresta de la montaña, con echados de 10° a 30° , según puede apreciarse en la Fig. 6. En la Fig. 3 también



Fig. 3. Flanco W. del Iztaccíhuatl, perteneciente a la cuenca de México. Se distinguen las zonas nevada superior, desnuda, intermedia y boscosa inferior.

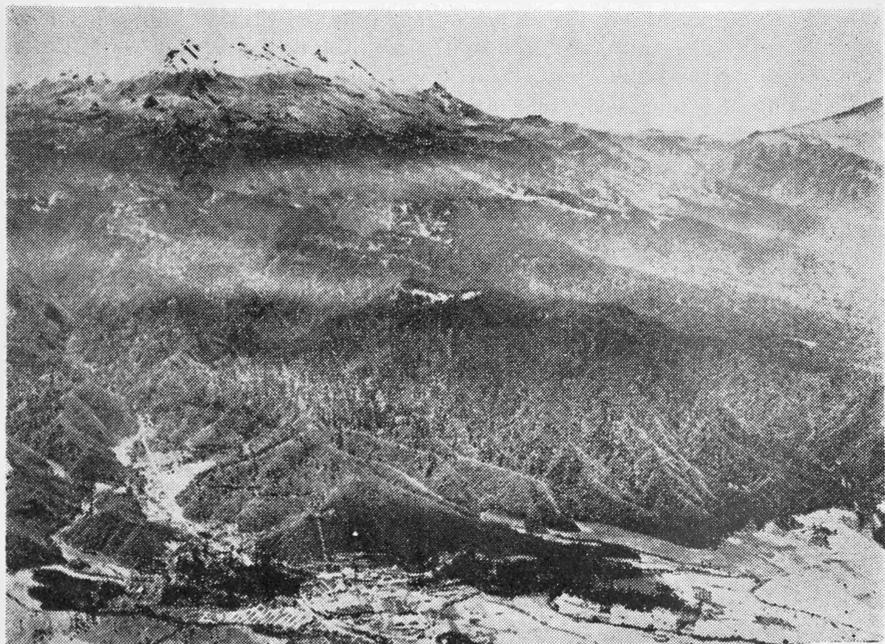


Fig. 4. Vertiente W. del Iztaccíhuatl desde San Rafael, viéndose el Puerto Cortés entre esta montaña y el Popocatépetl a la derecha.



Fig. 5. El Iztaccíhuatl visto desde el norte hacia el Popocatépetl.

se nota la superposición de las corrientes, tanto en la zona nevada como en la intermedia.

El trabajo de los hielos en la Edad Glacial, es manifiesto en los flancos de la montaña, hasta niveles de 3,800 m., lo que implica un avance de los glaciares de unos 4,000 m., en sentido horizontal. Uno de los lugares donde las marcas de la glaciación son más claras es Nahualac, en la misma cuenca del glaciar Ayolotepito, pues quedaron huellas frescas del movimiento del hielo, por las estrías y canaladuras abiertas en las paredes andesíticas de la cañada, tipo "glen" o de sección en U, en cuyo fondo se encuentran rocas aborregadas. Abajo de Nahualac, 3,900 m. de altitud, se encuentra un circo y valles colgantes, siendo de creer, sin que pueda fácilmente demostrarse, que los glaciares más importantes descendieron hasta altitudes de 3,400 m.

La erosión por una parte y el volcanismo del Holoceno, modificaron grandemente la topografía glacial, hasta hacerla prácticamente indiscernible desde los 3,400 m., hacia niveles inferiores.

Durante la gran glaciación Nebraska, los glaciares avanzaron cuando menos hasta los límites señalados, reacarreado sus morrenas frontales y de fondo, y en su retroceso, dejaron morrenas de esa naturaleza que, en su mayor parte, fueron destruidas por la erosión. Nuevos avances durante las glaciaciones Kansas e Illinois, formaron idénticos depósitos que corrieron igual suerte, hasta que en la etapa de la glacia-

ción Winconsin, tanto el glaciar Ayolotepito, como el Ayoloco, dejaron muy notables morrenas de fondo y terminales, con sus límites a 4,300 m. de altitud.

Tanto uno como otro, en el último avance, acumularon gruesas morrenas terminales, que formaron depósitos que, tratándose de Ayolotepito, por la lentitud del movimiento del frente del glaciar, permanecían estacionarios durante tiempos muy largos, dando por resultado la formación de una superficie casi horizontal, terminada hacia abajo, en una fuerte pendiente, la de equilibrio del material rodado en el talud de apilamiento. El proceso era idéntico al de la formación de un "terrero" de mina, donde el desecho rocoso o material quebrado, se tira en los flancos del montón de escombros, formándose una pequeña meseta de superficie superior casi horizontal, planta circular o semicircular y flancos de muy fuerte pendiente.

La morrena del Ayolotepito, se denomina "Ala de Angel". Puede apreciarse en la Fig. 3, destruida en su parte media por la erosión fluvial. Albergaba un lago de cierta importancia; aún en la época presente, el agua del deshielo se almacena en la parte norte de la morrena.

El Ayoloco tiene una morrena de distinto tipo, mucho más extensa, marcada en la Fig. 3, por el mayor descenso de la nieve, siendo también visible en la Fig. 6.

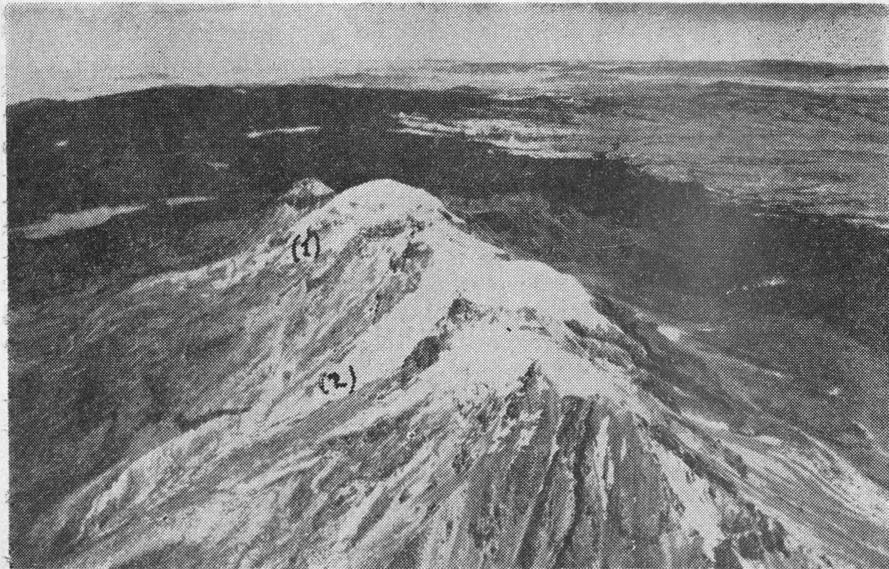


Fig. 6. El Iztaccíhuatl visto de S a N mostrando la inclinación hacia uno y otro lado de las corrientes andesíticas, los casquetes de hielo y los glaciares de la vertiente occidental Ayolotepito (1) y Ayoloco (2).

GLACIACION CONTEMPORANEA

El glaciar Ayolotepito ocupa una depresión o pequeña cuenca entre la cabeza y el pecho del Iztaccíhuatl y tiene una longitud muy variable; desde prácticamente inexistente, hasta unos 500 m. de longitud a partir del nivel del hielo permanente, sin que nunca llegue al borde de la meseta "Ala de Angel" de que antes se habló.

Fue observado por primera vez por Heilprim en 1890; pero Ordóñez en 1893, hizo los primeros estudios sobre los glaciares del Iztaccíhuatl. Refiriéndose a Ayolotepito dice: "No había más que canchales, pues las nieves han sufrido una notable retirada" (4 p. 35). A dicho autor le llamó poderosamente la atención que en Ayolotepito no existiera glaciar y elaboró una serie de conjeturas, para explicar por qué en lugares tan próximos como éste y el de Ayoloco, en el primero no hubiera ventisquero y sí en el segundo.

Refiriéndose a Ayoloco, Ordóñez dice: "La longitud total del ventisquero, contada desde un poco antes de donde comienzan a presentarse las grietas y punto de concurso de la superficie de alimentación, puede estimarse en 350 a 450 m. La anchura de este origen pasará de 100 m., en tanto que la extremidad no llega a 20 m." (4. p. 36) "El espesor en la extremidad no sobrepasa 2 m." (4. p. 37.)

Después agrega: "Los canchales demuestran la constante regresión del glaciar" (4. p. 38) y por último: "La distancia de ese límite actual de las nieves, al pequeño montón de escombros del canchal, es aproximadamente de 80 m. y casi al mismo nivel, por lo que se ve una retirada verdaderamente notable." (4. p. 39.)

Posteriormente, el personal de la Cía. de San Rafael hizo observaciones sobre el movimiento del glaciar Ayolotepito, que sufrió una ablación extremadamente rápida el 25 de diciembre de 1908, produciendo una inundación que ocasionó grandes daños a la fábrica. Un fenómeno semejante se produjo el 13 de marzo de 1925, correspondiendo a la total desaparición del glaciar referido, en ese año.

Nevadas muy importantes ocurrieron en enero de 1918, que cubrieron totalmente el Iztaccíhuatl, hasta su pie, en la planicie de Chalco, de la cuenca de México, a 2,300 m. de altitud; enero de 1923 que descendió el nivel de la nieve abajo de San Rafael, a 2,400 m.; febrero de 1931, que llegó a cubrir igual zona que en 1923; marzo de 1941 que también se extendió la nieve hasta los 2,400 m., de altura sobre el nivel del mar.

En cuanto a las aguas del deshielo del glaciar Ayolotepito, además de las avenidas que ocurrieron en las fechas antes señaladas, se repitieron otras en enero de 1930, marzo de 1936, marzo y septiembre de 1949.

La gran avenida de 1925 se debió, además de la total ablación del glaciar de Ayolotepito, a la ruptura de la morrena terminal en la meseta semicircular ocupada, en su parte superior, por una laguna, cuyas aguas se precipitaron por una brecha rápidamente abierta en los detri-

tus, por la violencia de las grandes masas de agua súbitamente liberadas. Poco después, el glaciar regenerado, reconstruyó en parte su morrena terminal, formándose nuevamente una lagunilla más pequeña, que existió hasta 1943, rellenándose en seguida con los sedimentos correspondientes a la morrena terminal. La Fig. 7 muestra su estado actual (enero 1958).

Desde 1925 a 1943 se hicieron observaciones aisladas que mostraron variaciones muy notables en la extensión de la zona nevada, sin que llegara a desaparecer el glaciar, aunque se redujo muchas veces a un cuerpo de unos cuantos metros, como prolongación de la línea regular del hielo del casquete mínimo. A partir de 1944 a la fecha, la situación de la línea de nieve ha bajado con frecuencia hasta 3,300 m. en el flanco occidental, abarcando una superficie de varias centenas de km.² (alrededor de 210). Estas nevadas han desaparecido en 10 a 15 días y no han tenido repercusión en el movimiento de los glaciares; pues no hubo tiempo para que se formaran capas de hielo del necesario espesor. Solamente nevadas repetidas con corto intervalo de tiempo, aunque hayan cubierto zonas mucho menores, han producido acumulación de las capas de nieve, con la consiguiente formación de hielo y robustecimiento del glaciar que, como ya se dijo, en ningún caso rebasó la superficie casi horizontal de la morrena, en forma de meseta semicircular, con altitud de 4,500 m.

El estudio de las fluctuaciones del nivel de la nieve registradas en más de 10 años, mostró un claro paralelismo con las variaciones de la precipitación pluvial y con los vientos fríos de los "Nortes", haciéndose patente que los glaciares sufren avances y retrocesos enteramente sincronizados con el microclima, lejos de actuar como exponentes de tendencias seculares en el movimiento de la climatología mundial. Es natural que así sea, ya que el pequeño cuerpo de los glaciares no puede ser el resultado de la acción promedio de temperaturas y lluvias durante largo tiempo, como ocurre con los grandes glaciares que son afectados solamente por la suma algebraica de los factores climáticos y que en su avance o en su retroceso acusan intensificación de la glaciación, o bien, períodos o intermedios menos fríos o calurosos. En los glaciares del Iztaccíhuatl, un año de extinción, puede ser seguido por otro de renovación, o viceversa, en las mayores escalas del medio, de manera que la observación de la ausencia del glaciar de Ayolotepito en 1893 no permite concluir una regresión general, pues posiblemente al año siguiente se regeneró para volver a extinguirse en 1908 y 1925 y fluctuar anualmente sin demostrar la existencia de estacionamiento, avance o regresión persistente.

Si se atiende al promedio de las fluctuaciones del nivel de la nieve, más o menos estable, puede señalarse la altitud de 4,200 m., como nivel medio en el Iztaccíhuatl, mientras que el glaciar Ayolotepito se desaloja prácticamente en el mismo plano horizontal, a 4,500 m. de altitud y el Ayoloco, avanza y retrocede entre 4,500 y 4,400 m. La línea del hielo permanente varía entre 4,500 y 4,550 m. de altitud.



Fig. 7. Vertiente oriental del Iztaccíhuatl. Se aprecia el circo glacial que carcome el pecho.

En la vertiente oriental del Iztaccíhuatl, en el pecho, existe un circo que no aloja un glaciar por la pequeñez de su cuenca alimentadora de nieve Fig. 7. El resto de ella está dividida también en pequeñas cuencas (tabla número 1), y además, la nieve es menos persistente en este flanco, por el impacto de los vientos calientes del Golfo, que las funden con relativa rapidez. Cerca de las parteaguas de esas pequeñas cuencas, es donde se acumulan mayores masas de hielo que, por su poca importancia, permanecen casi estacionarias, desgarrándose solamente en sus partes inferiores, en el límite de los acantilados y en el centro de los "talwegs" donde se prolongan hacia abajo, en pequeñas lenguas casi puntiagudas.

En la tabla 1 puede verse que en la vertiente occidental del Iztaccíhuatl sólo hay dos cuencas que, por su superficie, pueden alimentar glaciares, la número 7 de Ayolotepito, con 710,000 m.² y la de Ayoloco, con 924,000 m.². Las superficies que figuran en la tabla fueron tomadas desde la cresta de la montaña hasta el nivel de la nieve, en 1944, año en que la Cía. de San Rafael mandó hacer un mosaico aerofotográfico. Se notará que la superficie de ambas vertientes es casi igual y también el número de cuencas.

TABLA NUM. 1

Superficies de las cuencas hidrográficas de la zona nevada del Iztaccíhuatl. Levantamiento aerofotográfico de la Compañía de las fábricas de San Rafael. 1944

Vertiente occidental

(Enumeradas de norte a sur)

	m. ² x 10 ³	Nombre
1	213	
2	73	
3	57	
4	171	
5	205	
6	63	
7	710	Ayolotepito.
8	200	
9	345	Ayoloco.
10	262	
11	924	
12	36	
13	103	
14	68	
15	66	
16	29	
17	145	
18	91	
Suma:	3,761	

Vertiente Oriental

(Enumeradas de sur a norte)

19	223
20	432
21	359
22	64
23	118
24	120
25	172
26	164
27	255
28	83
29	110
30	213
31	369

32	277	Superficie nevada 1944.	
33	262		
34	221	Vertiente occidental	3,761
35	74	Vertiente oriental	3,679
36	163		
Suma:	3,679	Superficie total	7,440

La simple inspección de este cuadro, revela por qué en algunos lugares de la montaña se encuentran glaciares y por qué no existen en otros lugares aparentemente idénticos. Hay que tomar en cuenta la superficie de las cuencas receptoras de nieves. Para estas latitudes y con estas precipitaciones, aparece como superficie mínima, indispensable, 700,000 m.².

En 1955 el Gobierno del Estado de México se interesó en la formación de un plano aerofotográfico y la Cía. Mexicana Aerofoto, construyó el mosaico, pudiéndose así obtener una nueva carta con distinta extensión de nieve. Por fortuna, la de 1944, de San Rafael, está cerca del límite superior de la nieve, con el área apenas 20% mayor que la mínima, mientras que la de 1955 del Estado de México, está prácticamente en la línea media de la nieve, con una área casi siete veces mayor que la de 1944.

La tabla número 2, reúne los datos de la superficie nevada, espesores medios de la nieve y el hielo y volúmenes de esos dos depósitos y de su equivalente en agua, al empezar el invierno de 1944 (fines de diciembre).

La tabla número 3, da los mismos datos para igual temporada de 1955. Puede verse que el hielo aumenta unos 30 millones de m.³, la nieve unos 60 millones y el agua unos 50 millones.

TABLA NUM. 2

Áreas ocupadas por la nieve en el Iztaccíhuatl. Volúmenes de nieve, hielo y agua equivalentes. Invierno de 1944.

Zona	Area	Espesores m.		Volúmenes		m ³ x 10 ³
	m ² x 10 ³	Nieve	Hielo	Nieve	Hielo	Agua
1	1 446	3	5	4 337	7 228	8 457
2	4 068	2	—	8 135	—	3 661
3	100	1	—	100	—	45
4	172	1	—	172	—	77
5	52	1	—	52	—	24
6	1 175	3	5	3 525	5 875	6 874
7	427	2	3	854	1 281	1 537
	7 440			17 175	14 384	20 675

TABLA NUM. 3

Áreas ocupadas por la nieve en el Iztaccíhuatl. Volúmenes de hielo, nieve y agua equivalentes. Invierno de 1955.

Zona	Area	Espesores m.		Volúmenes		m ³ x 10 ³
	m ² x 10 ³	Nieve	Hielo	Nieve	Hielo	Agua
1	377	2	—	0	0.85	340
2	609	2	3	1 219	1 828	2 011
3	8 455	5	5	42 275	42 275	52 844
4	585	3	—	1 755	—	790
5	755	2	3	1 510	2 265	2 491
6	15 663	1	—	15 662	—	7 048
7	13 786	1	—	13 786	—	6 204
	40 230			76 962	46 368	71 728

Como antes se dijo, los datos de 1955 representan el promedio de acumulación de nieve y hielo, confirmado por los gastos hidráulicos de los arroyuelos que descienden del Iztaccíhuatl, medidos en varias líneas de vertederos triangulares, a las cotas 4,000, 3,700, 3,600 y 3,400, pudiéndose distinguir el agua de desnieve y deshielo tanto por la época en que se aforan las corrientes como por las comparaciones de los datos pluviométricos con los caudales calculados con coeficientes de escurrimiento bien establecidos.

El volumen de 1944 puede considerarse como el básico o de acumulación constante y solamente los excedentes representan las variaciones que afectan a los campos de nieve y las cantidades de agua suministradas al escurrimiento y la infiltración, en ambas vertientes.

Atendiendo solamente a los glaciares, se ha formado la tabla Núm. 4, siguiente:

TABLA NUM. 4

Áreas y volúmenes de nieve y hielo.

Glaciar	Area	Espesores en m.		Volúmenes		m ³ x10 ³
	m ² x10 ³	Nieve	Hielo	Nieve	Hielo	Agua
Ayolotepito.....	710	3	4	2 130	2 840	2 750
Ayoloco.....	924	3	8	2 772	7 392	7 162

Para el cálculo de los volúmenes de agua, en todas las tablas, se ha tomado una densidad para la nieve de 0.45 y para el hielo de 0.8.

Las acumulaciones de hielo, llamadas "heleros", independientemente de los dos glaciares anteriores, es bastante estacionaria, pudiéndose notar una estratificación consistente en capas de hielo separadas por láminas de arcilla transportada por el viento, en forma de polvo, que se deposita sobre la nieve, cada año, en la época de secas y que, por las depresiones de los siguientes depósitos acumulativos de nieve, se va convirtiendo en hielo, interviniendo fusión y recongelación. En algunas acumulaciones se pueden contar más de 10 capas de hielo separadas por las tierras indicadas, generalmente de color negro, que demuestran el carácter estacionario del hielo, puesto que han podido permanecer en esos sitios por tantos años.

La generalidad de los heleros, sin embargo, sufre una ablación que depende de las condiciones climatológicas del año, reduciéndose al extremo ilustrado en la Fig. 6, donde se aprecia el escaso espesor de ellos, que solamente en el pecho, el punto más elevado y de área reducida, alcanzan importancia. Las zonas nevadas que descienden más son: las de Ayolotepito, abajo de el pecho y la de Ayoloco, que baja de las rodillas, pudiéndose apreciar en la fotografía, tomada el 19 de noviembre de 1949, su escasa extensión. Fig. 6.

En los heleros, se producen grietas transversales, como consecuencia del lentísimo movimiento de ablación en los frentes correspondientes a los acantilados rocosos, aunque no necesariamente; pues otros frentes atenuados se encuentran en las laderas sin rupturas de pendiente. De todas maneras, el movimiento diferencial, por influencia de las pendientes del fondo y la fusión que sobreviene en esas grietas, por la circulación del aire y sobre todo en los frentes bajos que descienden a zonas de menor temperatura, determina el movimiento de que se habló, siempre de escala muy reducida. La ablación en las grietas y los frentes da lugar a un fenómeno secundario, por recongelación de estalactitas de hielo adheridas a los salientes de las capas superiores, que por su menor densidad y compacidad, avanzan un poco más que las inferiores, formando pequeñas cornisas y cavidades, donde cuelgan las estalactitas.

Solamente los heleros situados en los "talwegs" de las cuencas mayores (ya se ha visto que sólo existen dos) tiene un movimiento menos lento y dan lugar a una estratificación y laminación del tipo común en los glaciares, siendo su evolución concordante con las aportaciones de Nevé, y presentándose anomalías aparentes en el movimiento del glaciar, como que la velocidad sea mayor cerca de los márgenes laterales que en el centro, debido a que el glaciar sigue en las orillas, cauces temporales más profundos y amplios que en el centro, relativamente plano. Esos mismos pequeños cauces laterales pueden ser rellenados al

año siguiente, volviendo a ser mayor la velocidad del movimiento del hielo en la parte central, más profunda y de mayor masa.

En la Fig. 6, pueden apreciarse las morrenas frontales del Ayoloco, que no formaron una meseta de frente semicircular, sino depósitos alargados de remates afilados y pendiente paralela al del terreno sustentante, demostrando que el retroceso, en la etapa Wisconsin, fue más rápido que en el caso de Ayolotepito y más importante la masa de acarreos, significándose la mayor extensión de la cuenca alimentadora. Asimismo, los rápidos avances y retrocesos del glaciar en la época actual, cortaron en dos la morrena Wisconsin; pues la ablación es más considerable que la acumulación de materiales. Los acarreos actuales son muy escasos y forman pequeños canchales efímeros, pues son destruidos en pocos años por la erosión fluvial.

Las cuencas menores, sobre todo en la vertiente occidental tienen pequeñas morrenas medias y frontales, que corresponden al límite inferior de los depósitos Wisconsin, o sea, una altitud de 4,000 m.

El campo de hielo y nieve del Iztaccíhuatl resulta típico, porque se encuentra prácticamente a la misma latitud que las cumbres nevadas que ya se mencionaron, o sea, los grandes volcanes del paralelo 19, siendo en ellos menos persistentes las masas de hielo, por su menor altura, con excepción del Popocatepetl (5,425 m) y Citlaltépetl o Pico de Orizaba (5,700 m.) y por la menor extensión de sus cuencas receptoras de nieve, ya que se limitan a pequeños sectores de los conos volcánicos.

En el Popocatepetl, Sidney White (5), señala un glaciar situado del lado norte del cono, hacia El Ventorrillo, pero sus descripciones obligan a creer que se trata de masas de hielo semiestático, sin evolución en un cuerpo de transporte, capaz de desarrollar conjuntamente el doble trabajo de corrosión y construcción, propio de los glaciares.

BIBLIOGRAFIA

1. **Volcanismo Terciario y Reciente del Eje Volcánico de México.** Excursión A-15. XX Congreso Geológico Internacional. L. Blásquez L. México, 1956.
2. **Importancia del Eje Volcánico.** Inst. Panamericano de Geografía e Historia. Nº 11. Pedro C. Sánchez, 1935.
3. **Ensayo Político de la Nueva España.** Alejandro von Humboldt. Traduc. Pedro Maria Oliva. Madrid. 1818. 2 Tomos en 8ª.
4. **Notas acerca de los ventisqueros del Iztaccíhuatl,** por Ezequiel Ordóñez. Memorias de la Soc. Científica Antonio Alzate. T. VIII. 1894-1895.
5. **The firn field on the volcano Popocatepetl, Mexico.** Sidney E. White. Journal of Glaciology. Vol. 2. Nº 16. October 1954. pp. 389-392.