

VULCANOLOGÍA Y EVALUACIÓN DEL RIESGO VOLCÁNICO EN MEXICO

FRANCISCO MEDINA M.*

RESUMEN

La República Mexicana cuenta con más de una docena de volcanes que han presentado actividad eruptiva en los últimos 500 años. No obstante esta actividad, no se ha hecho hasta el momento ningún estudio detallado de riesgo volcánico.

Recientemente se ha visto que la reconstrucción de la historia eruptiva de un volcán puede proporcionar las bases estadísticas adecuadas para evaluar el riesgo asociado.

Para la evaluación de riesgo volcánico es necesario definir parámetros de riesgo y elaborar mapas de los diferentes depósitos volcánicos, así como analizar la frecuencia con la que este tipo de fenómenos se presentan en una región determinada. Con base en estos mapas y a la historia eruptiva es factible construir modelos estadísticos que permiten la evaluación del riesgo en términos numéricos.

Debido al acelerado crecimiento urbano en zonas volcánicas, es recomendable, la elaboración de amplios estudios de riesgo volcánico que permitan contar con mayores elementos para la planificación de dicho crecimiento.

INTRODUCCIÓN

México cuenta con más de una docena de volcanes considerados activos por el hecho de haber presentado fases eruptivas en tiempos históricos. (En el caso de América del Norte se entiende por tiempo histórico $t < 3000$ años). En general a este tipo de fenómenos se les ha prestado poca atención no obstante que se ha registrado una actividad volcánica importante en el presente siglo. El volcán de Colima, el más activo del país, presentó erupciones explosivas freáticas en 1903 y 1909; erupciones explosivas peleanas en

* Instituto de Geofísica, UNAM.

1913 y una fase eruptiva merapiana a finales de 1975. El volcán Tacaná presentó fases explosivas en 1903 y 1949; el volcán San Martín tuvo una fase eruptiva en 1922. (Tabla 1).

Aun cuando la actividad fue leve, durante 1920 el Volcán Popocatepetl mostró que aún no puede ser considerado como un volcán de riesgo potencial nulo; se encuentra actualmente en un período de reposo cuya duración sería muy difícil evaluar.

Otros volcanes de este tipo, denominados estratovolcanes o volcanes poligenéticos, existen en México y se cuenta con registros de su actividad para los últimos 500 ó 600 años. (Tabla 1). Se les denomina estratovolcanes por estar formados por capas, de lava y cenizas intercaladas, que van depositándose consecutivamente hasta formar el edificio volcánico.

A este tipo de volcanes se les asigna un lapso de vida activa del orden de 1 a 2 millones de años. En contraste, los conos cineríticos o volcanes monogenéticos, tienen un lapso de vida menor a 10 años; este tipo de volcanes es muy numeroso en la República Mexicana, y en el presente siglo se ha observado el nacimiento de dos: el Bárcena en las Islas Revillagigedo, en 1952; y el Parícutín en el Estado de Michoacán, en 1943. (Mooser, 1958).

La evaluación de riesgo para estos volcanes monogenéticos han sido poco estudiada, los escasos estudios existentes se han hecho para los grandes estratovolcanes los cuales por tener períodos de reposo hasta del orden de cientos de años permiten olvidar fácilmente, a las comunidades asentadas en sus cercanías, el riesgo volcánico potencial.

En el caso de la República Mexicana, la mayoría de los volcanes, tanto monogenéticos como poligenéticos, están enclavados en un cinturón casi paralelo a los 19° N (Fig. 1); desde los estados de Nayarit y Colima hasta el estado de Veracruz. Esta área se caracteriza también por una alta densidad de población, lo cual hace necesario una evaluación rigurosa del riesgo volcánico.

TABLA I

VOLCANES ACTIVOS EN MEXICO, CATALOGADOS
POR EL IAVCEI

Volcán:	Tres Vírgenes
No. Catálogo:	14-1-1
Altura:	1195 m.s.n.m.
Tipo:	Estratovolcán
Localización:	27°18' N 112°35' W Baja California Sur
Petrología:	Basalto Olivínico
Erupciones recordadas:	1746, 1857.

- Volcán:** Bárcena
No. Catálogo: 14-1-2
Altura: 375 m.s.n.m.
Tipo: Cono cinerítico
Localización: 19°16' N
 110°48' W
 Islas Revillagigedo, Colima
Erupciones recordadas: 1952 - Nacimiento, 1953.
- Volcán:** Evermann
No. Catálogo: No está catalogado
Altura: 1000 m.s.n.m.
Tipo: Volcán de escudo
Localización: 18°45' N
 110°57' W
 Islas Revillagigedo, Colima
Petrología: Basalto alcalino
Erupciones recordadas: 1848, 1896, 1951.
- Volcán:** Ceboruco
No. Catálogo: 14-1-3
Altura: 2164 m.s.n.m.
Tipo: Estratovolcán
 Con 2 calderas y 3 conos cineríticos
Localización: 21°09' N
 104°30' W
 Nayarit
Petrología: Basalto-hiperstena-andesita
Erupciones recordadas: 1870-1876
 Erupción inicial violenta febrero 21 de 1870
 Formó nubes ardientes.
- Volcán:** Colima
No. Catálogo: 14-1-4
Altura: 3960 m.s.n.m.
Tipo: Estratovolcán
Localización: 19°25' N
 103°43' W
 Colima
Petrología: Hiperstena-aug:ta-hornblenda-andesita
Erupciones recordadas: 1576, 1590, 1611, 1622, 1749, 1770,
 1771, 1795, 1806, 1808, 1809, 1818,
 1837, 1869 (boca adventicia formación)
 1903, 1909, 1913, 1957, 1975.
- Volcán:** Parícutin
No. Catálogo: 14-1-5

Altura: 3170 m.s.n.m.
 Localización: 19°29' N
 102°15' W
 Michoacán
 Petrología: Basalto-andesita
 Erupciones recordadas: 1943 (febrero 20 nacimiento), 1944-1952

Volcán: Jorullo
 No. Catálogo: 14-1-6
 Altura: 1330 m.s.n.m.
 Tipo: Cono cinerítico
 Localización: 19°02' N
 101°40' W
 Michoacán
 Petrología: Basalto olivínico
 Erupciones recordadas: 1759-1774

No. Catálogo: Campo Sierra de San Andrés
 14-1-7
 Tipo: Campos de solfataras, geysers
 Localización: 19°50' N
 100°38' W
 Michoacán
 Petrología: Riolita

Volcán: Xitle
 No. Catálogo: 14-1-8
 Altura: 3120 m.s.n.m.
 Tipo: Cono cinerítico
 Localización: 19°15' N
 99°12' W
 Distrito Federal
 Petrología: Basalto olivínico
 Erupciones recordadas: Datación de la erupción (carbono 14)
 450 A.C.

Volcán: Popocatepetl
 No. Catálogo: 14-1-9
 Altura: 5452 m.s.n.m.
 Tipo: Estratovolcán
 Localización: 19°01' N
 98°37' W
 Puebla
 Petrología: Hiperstena-andesita muy viscosa
 Erupciones recordadas: 1347, 1354, 1519, 1530, 1539, 1542,
 1548, 1571, 1592, 1642, 1664, 1697,
 1720, 1802, 1920, 1935.

Volcán: Fico de Orizaba
No. Catálogo: 14-1-10
Altura: 5676 m.s.n.m.
Tipo: Estratovolcán
Localización: 19°02' N
 97°17' W
 Veracruz
Petrología: Andesitas de hornblenda y augita
Erupciones recordadas: 1537, 1545, 1566, 1613, 1630, 1687.

Volcán: San Martín
No. Catálogo: 14-1-11
Altura: 1550 m.s.n.m.
Tipo: Cono basáltico
Localización: 18°35' N
 95°10' W
 Veracruz
Petrología: Basalto olivínico
Erupciones recordadas: 1664, 1793, 1829, 1838, 1922.

Volcán: El Chichón
No. Catálogo: 14-1-12
Altura: 1350 m.s.n.m.
Tipo: Estratovolcán
Localización: 17°20' N
 93°12' W
 Chiapas
Petrología: Andesita-hornblenda
Erupciones recordadas: Actividad sulfatárica constante.

Volcán: Tacaná
No. Catálogo: 14-1-13
Altura: 4092 m.s.n.m.
Tipo: Estratovolcán
Localización: 15°08' N
 92°06' W
 Chiapas
Petrología: Hornblenda-andesita hipersteno
Erupciones recordadas: 1855, 1878, 1903, 1949.

HISTORIA DE LAS INVESTIGACIONES VULCANOLÓGICAS EN MÉXICO

Tanto las erupciones volcánicas como los fenómenos asociados con las mismas llamaron la atención de los antiguos habitantes de México; en muchos de los códices conservados hasta el presente, existe mención de este tipo de

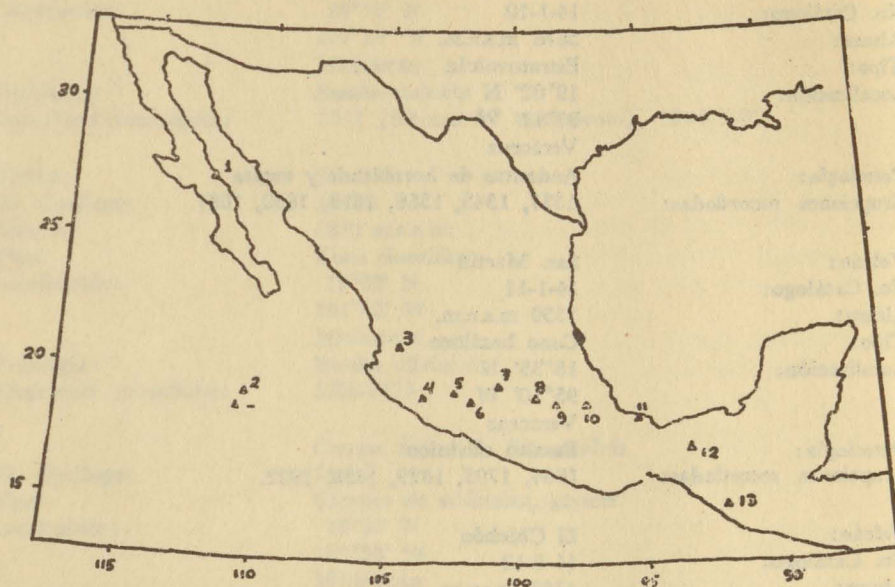


FIG. 1. Localización de los volcanes activos catalogados por el IAVCEI. La zona de México es la número 14-1 de acuerdo a la clasificación y el número del volcán es el presentado en la figura. Nótese que el volcán Evermann no tiene número.

fenómenos así como de los terremotos. En la excelente recopilación de Orozco y Berra (1887), las efemérides Seismicas Mexicanas, haciendo mención al código Aubin, reporta la ocurrencia de sismos en tiempos anteriores a la llegada de los españoles; y es factible encontrar entre las crónicas antiguas el reposo de erupciones del volcán Popocatépetl para los años 1347 y 1354 (Yarza de la Torre, 1971).

Algunos de los vocablos indígenas así como su representación en los códices, hacen referencia a este tipo de fenómenos; Popocatépetl tiene como significado montaña que humea; Citlaltépetl (o Pico de Orizaba) tiene como significado Cerro de la Estrella. Los jeroglíficos del código mendocino por ejemplo representan a las elevaciones montañosas con una voluta espiralada encima, dando a entender una columna de humo o fumarola (Maldonado Koerdel, 1970).

Hernán Cortés, en sus cartas de relación, menciona el envío de una expedición al Popocatépetl para investigar el origen de la constante fumarola, la cual retorna sin éxito.

No fue sino hasta finales del siglo XVIII que el estudio de los volcanes

mexicanos empezaron a tener un carácter sistemático, hecho que resulta un tanto sorprendente puesto que la exploración minera se encontraba notablemente desarrollada en la época de colonia. La descripción detallada más antigua de una erupción volcánica en tierras mexicanas fue llevada a cabo por el naturalista José Mariano Moziño, miembro de la Real Expedición Botánica de la Nueva España, sobre la erupción del volcán San Martín en el año de 1793. Anterior a ésta está el relato de Fernando Connasag, alemán de origen; acerca de la erupción registrada en 1766 en el volcán Tres Vírgenes en Baja California Sur.

En el año de 1759 la erupción del volcán Jorullo atrajo la atención de numerosos naturalistas, entre ellos al Barón Alejandro de Humboldt quien se encargó de la elaboración de un amplio reporte que fue de inmediato difundido en los países europeos. Durante el siglo XIX el volcán mexicano con mayor actividad fue el de Colima y las ascensiones científicas al volcán fueron muy numerosas contándose las de F.T. Sonneschmid, en 1796; la de J.M. Rugendas, en 1834; Carlos Pieschel, en 1852; e incluso la de una delegación francesa, durante el período de Maximiliano, a cargo de A. Dolfus, en 1866 (Waitz, 1936).

En el año de 1857 se estableció la comisión hidrográfica del Valle de México, la cual tuvo a su cargo los estudios de las elevaciones de carácter volcánico localizadas en el Valle de México y llegaron a realizarse levantamientos geológicos de la zona del Popocatepetl que desafortunadamente no fueron publicados. Sin embargo, el establecimiento de esta comisión dio pie a la formación de una notable generación de geólogos que tuvo su mayor expresión con Mariano Bárcena y José G. Aguilera, correspondiendo al primero la escritura de un informe sumamente notable del estado del Volcán de Colima, el cual en 1869 había formado una boca adventicia, el volcancito, cuya actividad fue espectacular (M. Bárcena, 1887).

Hacia el último tercio de la pasada centuria se sistematizaron por completo las investigaciones vulcanológicas por los miembros de la Sociedad Científica Antonio Alzate; en cuyas memorias se encuentran diversos reportes sobre el estado de los principales volcanes activos del centro del País; reportes elaborados principalmente por J.G. Aguilera, M. Bárcena, L. Banda, E. Ordóñez, G. Puga, J.M. Arreola y S. Díaz.

Precisamente, a instancias de J.M. Arreola y S. Díaz se instalaron 2 observatorios en el Volcán de Colima, uno en 1893 en Zapotlán (hoy Cd. Guzmán) y el segundo en 1895 en la Cd. de Colima. Ambos dependían del Observatorio Meteorológico de México.

Estos observatorios correspondían a la necesidad de vigilancia de la creciente actividad del volcán el cual tuvo períodos eruptivos notables en 1903, 1909 y 1913. En estos observatorios se constató la actividad del volcán desde 1893 hasta 1905 en forma continua y se introdujo incluso instrumental óptico y sismológico para llevar a cabo la observación. Estas observaciones fueron

presentadas en el X Congreso Internacional de Geología en 1905 que se realizó en la Cd. de México y tuvo entre otras actividades la visita al volcán de Colima guiada por P. Waitz y la visita al volcán Ceboruco guiada por M. Bárcena.

En varios reportes P. Waitz relata la actividad del Colima en 1903, 1909 y 1913, esta última presentó características notablemente destructivas con la formación de nubes ardientes (P. Waitz, 1936).

Hacia el año de 1920 el Popocatépetl tuvo una actividad explosiva ligera, la cual condujo al establecimiento de un observatorio de vigilancia en las cercanías del cráter, éste estuvo a cargo de los geólogos Fernando Urbina y Heriberto Camacho que publicaron sus observaciones en los anales del Instituto Geológico de México.

Reportes del estado del volcán de Colima fueron realizados por vulcanólogos extranjeros. En 1922, I. Friedlaender; en 1932, J.L. Cummings y en 1945, F. Sobota hicieron trabajos vulcanológicos en Colima, pero para estas fechas había nacido ya el Volcán Parícutín. Desde luego este volcán es el que cuenta con mayor cantidad de estudios y es muy numeroso el grupo de vulcanólogos que lo estudiaron; siendo sumamente extensa la bibliografía existente acerca de este volcán.

Este aparato volcánico atrajo la atención de un gran número de investigadores y tanto el Servicio Sismológico Nacional como el Instituto de Geología de la UNAM prepararon diversos reportes de la actividad del volcán.

VOLCANES ACTIVOS

Es común entender por volcán activo aquel que ha mostrado actividad en tiempo histórico, es decir, en los últimos 5 ó 6 mil años. El tipo de actividad de un volcán puede ser muy diferente de una fase a otra e incluso puede variar dentro de una misma fase eruptiva. Sin embargo, se ha llegado a observar actividad eruptiva en volcanes que estaban considerados *muertos*, tal es el caso de Mont Lamington en Nueva Guinea, que entró en actividad en 1951 no obstante que no había registros de actividad y se encontraba incluso fuertemente erosionado. Estudios posteriores mostraron que la última actividad eruptiva había ocurrido hace 13 000 años. Casos similares se observaron en el volcán Bezymianny en Kamtchatka que entró en actividad en 1955 y del cual no se tenía noticia de actividad anterior; o en la isla Tristan da Cunha, en el Atlántico Sur, en cuya región no existían incluso antecedentes de actividad sísmica y el volcán en la isla entró en actividad en 1961.

Por esta razón se ha recomendado incluir en los estudios de riesgo volcánico la reconstrucción de la historia eruptiva, lo más extensa posible, ayudados por las técnicas convencionales de datación.

Para el caso de volcanes poligenéticos se ha observado que el período activo es del orden de 1 a 2 millones de años y por lo tanto, cualquier estratovolcán menor a esta edad puede encontrarse en posibilidad de tener algún tipo de actividad. Un caso diferente se presenta al evaluar el período activo de los volcanes monogenéticos, los cuales sólo presentan un lapso de vida corto, menor a los 10 años; en este caso la vida activa suele asociarse al área de manifestación volcánica; encontrándose que existen áreas que presentan desarrollo de conos cineríticos durante períodos de hasta 70 millones de años, según la escala (P.E. Baker, 1979).

El estudio de este tipo de áreas para el caso de México es muy importante debido a la existencia de una alta densidad de conos cineríticos.

A nivel mundial la actividad volcánica ha sido importante en la última década, observándose un promedio de 4 erupciones por año lo cual ha ocasionado decenas de muertes, evacuaciones de ciudades y pérdidas cuantiosas (T. Simkin, 1979). Esta actividad motivó que la UNESCO promoviera diferentes simposia sobre vulcanismo en los años 74, 75 y 76.

Las erupciones que mayor impacto tuvieron en la década de los 70 fueron:

Etna (1971); que destruyó el observatorio vulcanológico.

Heimaey (1973); que destruyó más de 300 casas y edificios en Islandia.

Guadeloupe (1976); que mostró signos de entrar en fase eruptiva y fueron evacuadas 74,000 personas con enormes pérdidas económicas y finalmente no entró en actividad.

Mont St. Helens (1980); provocó muertes y daños materiales considerables.

La frecuencia de estos fenómenos en los últimos cien años es:

Actividad con emisión de piroclastos	60
Actividad con flujo de piroclastos	20
Actividad con flujos de lava	60
Colapsos estructurales	0.5-1

FENÓMENOS DESTRUCTIVOS ASOCIADOS CON LA ACTIVIDAD VOLCÁNICA

Desde el punto de vista de riesgo volcánico es importante estudiar los fenómenos, asociados con la actividad volcánica, que pudieran propiciar efectos destructivos y que por tanto deben tomarse en cuenta preferentemente en

todo tipo de estudio de riesgo. Los fenómenos destructivos de acuerdo con Booth (1979), pueden clasificarse como:

Actividad Sísmica. Esta consiste en general a la actividad asociada a la etapa anterior de la erupción. Estudios llevados a cabo en volcanes japoneses por Minakami (1974), han permitido distinguir diferentes tipos de actividad los cuales son clasificados como: temblores tipo A cuando la profundidad está entre 1 y 20 Km de profundidad y suelen ser de magnitud variable. Temblores tipo B que son de profundidad somera (menor a 1 ó 2 km) y cuyo número aumenta considerablemente días antes de la erupción. Explosiones, cuando hay actividad explosiva en la erupción y tremores que son eventos discretos probablemente asociados a vibraciones en la cámara o reservorio magmático. En general esta actividad sísmica no ocasiona daños y está muy restringida al área cercana al volcán.

Emisión de Piroclastos. Consiste en emisión de partículas de cenizas incandescentes de diámetro muy pequeño (0.1 a 0.2 mm). Esta actividad es bastante frecuente y ha llegado a estimarse una frecuencia de 60 emisiones por siglo a escala mundial. Afecta principalmente a los asentamientos establecidos en la vecindad del volcán y su efecto destructivo principal radica en los efectos generadores y propagadores de incendios.

En algunas ocasiones tiene importancia la emanación de gases tóxicos como el dióxido de azufre que puede convertirse en fuente de contaminación importante.

Flujo de Piroclastos. Este efecto es en general el que mayor destructividad presenta, puesto que puede manifestarse como nubes ardientes, las cuales consisten en flujos de material denso, a temperaturas del orden de centenas de grados de gran espesor y que llegan a adquirir velocidades de desplazamiento del orden de 80-100 km/h. Su alcance y dirección de salida dependen entre otros factores de los topográficos.

La frecuencia de este tipo de fenómenos es de 20 por siglo. L. Wilson (1976) ha estudiado recientemente el mecanismo de erupción explosivo, en particular el de tipo pliniano; una de las conclusiones interesantes del estudio es que se atribuye la formación de los flujos de piroclastos al colapso de la columna eruptiva.

Un caso histórico muy importante es el de Mont Pelee en Martinica, cuya población fue totalmente aniquilada por una nube de este tipo a principios de siglo.

Flujos de lava. Este tipo de efectos son por lo general poco destructivos ya que el alcance de las lavas está en función directa de la cantidad de material y de la viscosidad de la lava. Se vuelve importante cuando la lava es

muy fluida (tipo pahohoe). La frecuencia estimada para este fenómeno es de 60 por siglo.

Colapso estructural. Este tipo de eventos, consistente en el colapso de una parte o todo el edificio volcánico, puede presentar efectos muy destructivos cuando ocurren en volcanes marinos puesto que asociado al fenómeno está el desarrollo de *tsunamis*. Un caso histórico importante es el de Krakatoa cuyo efecto destructivo importante fue ocasionado por el gran *tsunami* provocado en la erupción. La frecuencia de este tipo de fenómenos es de 0.5-1 por siglo.

Un fenómeno asociado a las erupciones o emisiones volcánicas es el de contaminación, de mantos acuíferos o tierras de labranza, por materiales tóxicos.

RECONSTRUCCIÓN DE LA HISTORIA ERUPTIVA

Una de las técnicas usadas para evaluar el riesgo volcánico es el mapeo de los diferentes depósitos de erupciones anteriores y su datación con el fin de reconstruir la historia eruptiva del volcán, lo más amplia posible, analizando sus diferentes etapas eruptivas.

Aun cuando Decker (1973) ha reconocido a la reconstrucción de la historia eruptiva de un volcán como la clave para predecir su comportamiento futuro, es de reconocerse la necesidad de ampliar los estudios del mecanismo eruptivo de los volcanes en términos físicos.

En años recientes se han hecho intentos por establecer en forma numérica la probabilidad de erupción de un volcán. La metodología, desarrollada por Wickmann (1966) y Reymont (1976), está basada en el estudio de la distribución de los períodos de reposo. La función de distribución para la longitud de los períodos de reposo puede dar la función de densidad de probabilidad para los períodos de reposo. En estos términos, puede obtenerse, vía un modelo Poissoniano, la probabilidad de erupción para un lapso de tiempo t .

Esta metodología ha sido aplicada a los volcanes poligenéticos. Los modelos usados son de la forma:

$$P(n) = \left\{ (\lambda t)^n (n!)^{-1} \right\} e^{-\lambda t}$$

donde $P(n)$ es la probabilidad de que n eventos tengan lugar en una unidad de tiempo t ; λ es el valor medio de los eventos presentados por unidad de tiempo t .

En el caso de volcán poligenético el lugar del evento probable está determinado. Este tipo de técnicas han sido usadas por Booth B. (1979), para evaluar el riesgo en la Caldera de la Primavera cercana a la ciudad de Guadalajara, y los resultados se presentan en la Fig. 2. Este autor recomienda, con base en los resultados del estudio, la vigilancia de la zona por Percepción Remota.

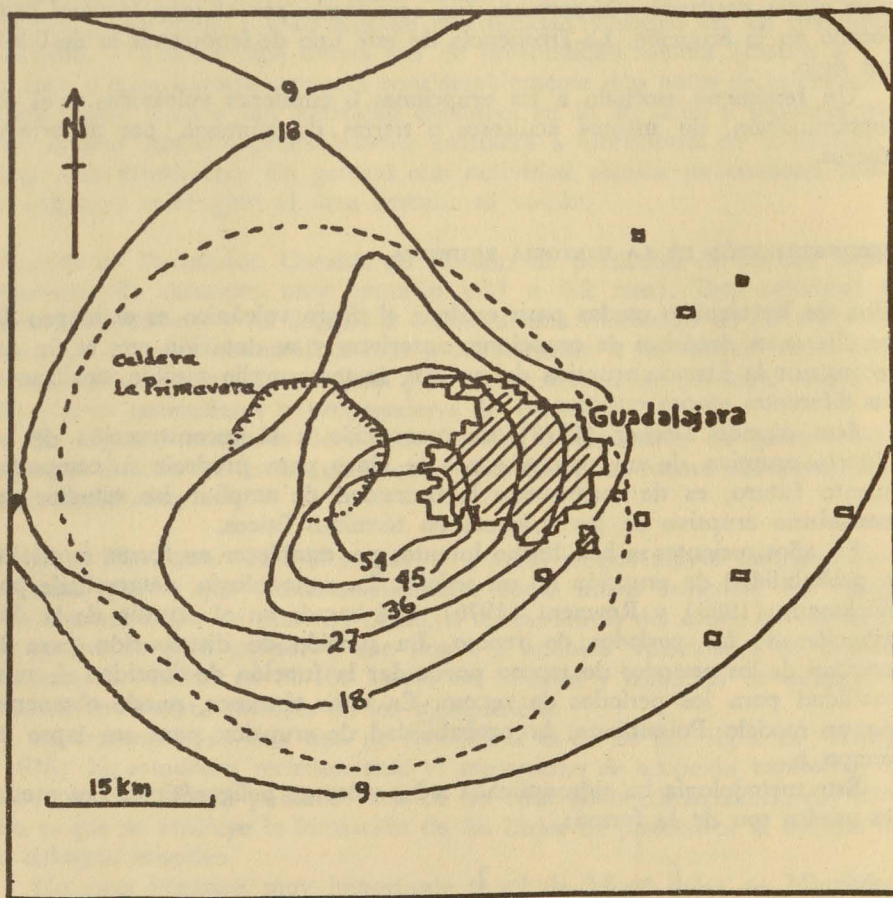


FIG. 2. Mapa de Riesgo Volcánico para el área de la Caldera de la Primavera según B. Booth 1979. Las líneas indican el porcentaje de probabilidad por 1 m de ceniza en una erupción y la línea punteada encierra el área de riesgo para la caída de piroclastos mayores a 10 mm. No está especificado el intervalo de tiempo usado para la elaboración del mapa.

Un problema diferente se presenta al estudiar las zonas con alta densidad de volcanes monogenéticos, ya que se sabe que éstas sólo tienen una vida activa menor a los diez años; tal es el caso de las zonas del Parícutín o del Xitle, esta última dentro de la zona más poblada de la República Mexicana.

La zona de Chichinautzin que encierra al Volcán Xitle, (S. y S.O. del D.F.) presenta 146 conos cineríticos los cuales se han desarrollado durante los últimos 40 000-50 000 años en una área de 950 km² (Martin y De la Cruz, 1981).

Un análisis simplista de esta situación sería el asumir una razón de crecimiento constante; es decir, si en 50 000 años nacen 146 conos, en la zona nace 1 cono cada 350 años. Sabemos que el último cono, el Xitle, se desarrolló hace 2 500 años por lo cual la probabilidad de desarrollo de un nuevo cono podría estimarse como muy alta.

Desde luego este tipo de análisis es demasiado simple y necesitaríamos datar a los diferentes conos para obtener la función que relacione el número de conos desarrollados con el tiempo. Esta función podría tener diversas formas; en la Fig. 3 se muestran algunas probables. Quizá la que represente el fenómeno en términos más realistas sea la última de ellas.

Independientemente de los modelos estadísticos, la física se ha aplicado a la Vulcanología con objeto de construir modelos vulcanológicos que nos permitan conocer los procesos internos y los mecanismos de erupción. Estos llevan como finalidad evaluar las profundidades a las cuales se generan los magmas (Fedotov, 1976), y la formación de columnas magmáticas en la astenosfera; así como caracterizar los diferentes tipos de actividad explosiva en términos físicos (Wilson, 1976).

El conocimiento de estos aspectos es esencial para la formulación de modelos estadísticos más completos y sobre todo para formular y evaluar parámetros de riesgo volcánico.

MANEJO DE RIESGO VOLCÁNICO

Existen muy pocas referencias que indiquen cómo usar la información científica para evaluar el riesgo volcánico y poder prevenir daños a los asentamientos en las vecindades volcánicas. Recientemente Fournier d'Albe (1979) preparó una secuencia de operaciones que permiten planificar las medidas de seguridad que deben tomarse en zonas de riesgo volcánico. (Tabla II).

Por riesgo volcánico se entiende la posibilidad de pérdidas humanas o materiales por la acción destructiva de un evento volcánico. La evaluación cuantitativa del riesgo volcánico puede llevarse a cabo entendiéndolo como una función de 3 parámetros: Inversión, Vulnerabilidad y Riesgo. (Fournier d'Albe 1979).

VALLE DE MEXICO

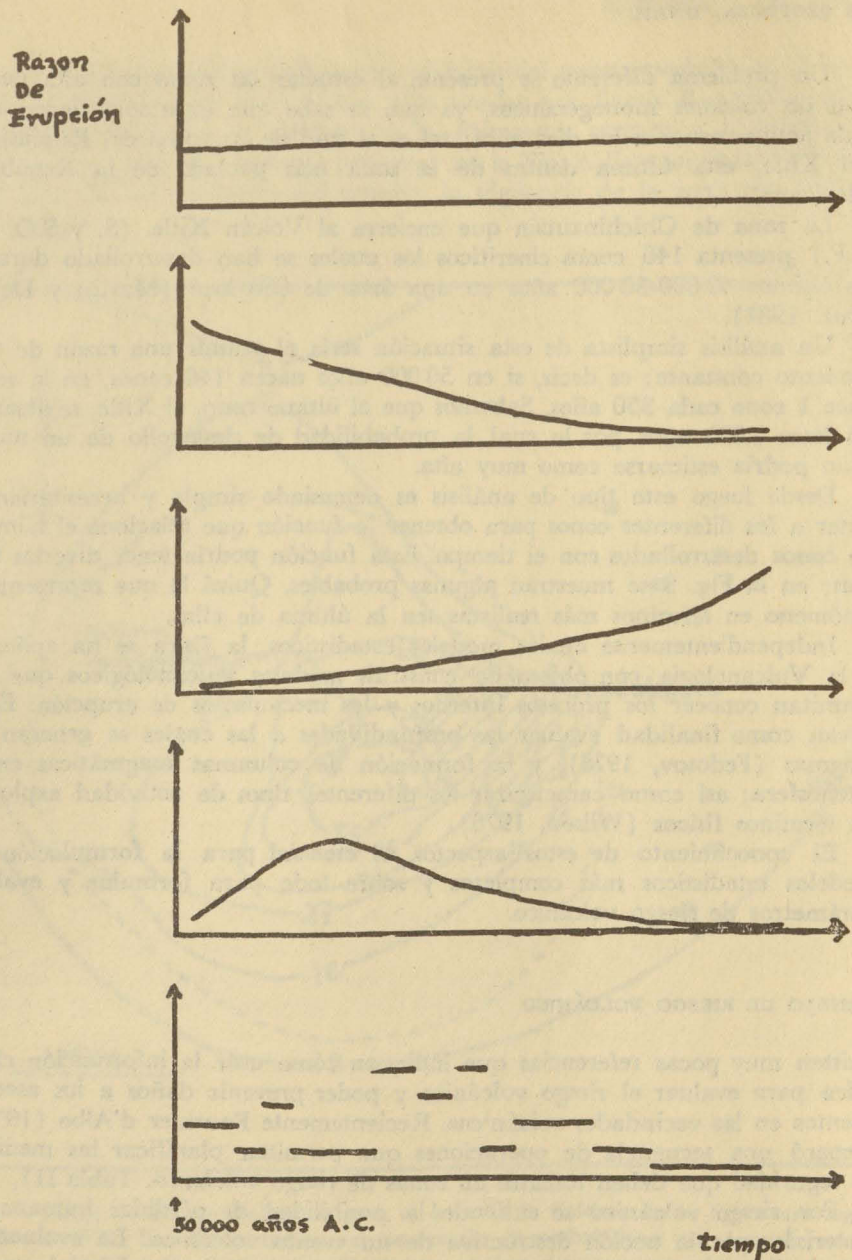


FIG. 3. Diferentes funciones que podrían representar en el tiempo la razón de erupción o número de conos cineríticos desarrollados en un intervalo de tiempo para el área de Chichinautzin. (S. y S.O. de D.F.). el conocimiento de esta función con ayuda de las técnicas de datación permiten evaluar la probabilidad de futuras erupciones por medio de técnicas estadísticas.

TABLA II

SECUENCIA DE DECISIONES
Y ACCIONESE. M. FOURNIER d'ALBE
(UNESCO)ACCIÓN POR AUTORIDADES
PÚBLICAS

1. Definición de una política a seguir con respecto al manejo del riesgo volcánico.
- 2.
3. Preparación y publicación de mapas detallados de las zonas con riesgo volcánico potencial.
- 4.
5. Definición de una política relativa a los asentamientos e inversión en zonas de riesgo sobre la base de costo-beneficio.
Decisión de medidas para reducir la vulnerabilidad de las propiedades e instalaciones productivas en zonas de riesgo.
6. Preparación de un plan general de evacuación de zonas de riesgo en emergencias volcánicas y estimación del tiempo requerido para la ejecución de cada fase.
7. Decisión del valor mínimo límite de riesgo para proceder a la ejecución de las diferentes fases del plan de evacuación.
8. Tomar las medidas apropiadas y proveer de medios para el monito-

ACCIÓN POR CIENTÍFICOS

Reconocimiento y mapeo de los volcanes y depósitos volcánicos existentes. (Flujos de lava, depósitos de piroclastos, lahares, etc.).

Establecimiento cronológico de eventos pasados y elaboración de estimados cuantitativos de riesgo.

Análisis de datos de las erupciones volcánicas observadas a fin de identificar los fenómenos precursores y reconocimiento de los mismos en términos estadísticos de su valor predictivo.

Instalación y operación de un sistema apropiado de monitoreo.

- reo adecuado de fenómenos precursores, incluyendo reclutamiento y adiestramiento del personal técnico-científico necesario.
9. Establecimiento, en forma conjunta con el equipo científico, de procedimientos adecuados, evaluación e información de fenómenos precursores. Detalle de reportes técnicos del equipo científico a las autoridades encargadas de la seguridad.
 10. Informe a los medios de comunicación y al público de las medidas a tomar o de acciones requeridas en caso de emergencia por eventos volcánicos.
 11.

Reporte inmediato a las autoridades de la probabilidad de un acontecimiento destructivo, especificando período de tiempo estimado, cuando la probabilidad de ocurrencia rebasa el valor mínimo límite acordado.
 12. Puesta en operación de las diferentes fases del plan de evacuación cuando se establezca que el riesgo excede el valor mínimo límite permitido.

Intensificación de la observación de precursores y/o fenómenos eruptivos evaluando en forma continua el riesgo con base de tiempo definido y reportando el estado a las autoridades encargadas de la seguridad pública. Continuación intensiva del monitoreo de la actividad volcánica hasta que los riesgos estimados disminuyan por debajo del valor mínimo límite. Reporte a las autoridades.
 13.

Regreso a la rutina de monitoreo de los fenómenos precursores.
 14. Permitir el retorno de la población evacuada cuando se asegure que el riesgo está por debajo del valor mínimo límite.

El parámetro inversión es la medida de los recursos humanos y de capital, entendido este último como construcciones, fábricas, plantas agrícolas, etcétera, que se encuentran en el área de riesgo. Idealmente un estudio de riesgo debe ser la base para planificar la inversión en zonas volcánicas.

El parámetro vulnerabilidad se refiere a la proporción de la inversión expuesta, en diferente grado, a riesgo. Para poder evaluar este parámetro es necesario conocer el tipo de actividad predominante en el volcán; si la posibilidad de actividad por medio de flujo de piroclastos o lahares existe en una área, debido a que así lo indique la historia eruptiva del volcán, la vulnerabilidad es del orden de 100%; considerándose menor para cualquier otro tipo de emisiones.

Cuando se presenta la posibilidad de riesgo para zonas pobladas, se requiere además del estudio de riesgo un plan de acción que contenga programas de evacuación del área en caso de eventos de tipo explosivo.

El parámetro peligro es el más complejo de los tres y se refiere a la evaluación numérica de la probabilidad de que una área particular se vea afectada por la acción volcánica, en un lapso de tiempo determinado. De ser factible, este parámetro debe incluir un factor de peso que refleje la intensidad del tipo de erupción esperada.

Es en la evaluación de este parámetro que el conocimiento de la historia eruptiva del volcán puede proporcionar una base estadística adecuada para evaluar en términos numéricos la probabilidad de una posible erupción.

En este punto habría que hacer notar que la marcada, individualidad en realizar los modelos válidos para definir el comportamiento de un volcán el comportamiento de los volcanes impide, en la mayoría de los casos, generalizarlo.

Para la evaluación del parámetro de peligro lo más recomendable es el levantamiento de mapas que indiquen las áreas, alrededor del volcán, que hayan sido afectadas en tiempos pasados bien sea por uno o varios tipos de actividad. Un complemento deseable sería el obtener, de estos levantamientos la frecuencia de ocurrencia por área para los diferentes tipos de actividad; lo cual implica la realización de estudios de datación de los diferentes depósitos. En esta forma, el mapa debe destacar las zonas de posible destrucción total, por contener uno o varios depósitos de flujo de piroclastos, lava, etcétera, y las zonas de afectación temporal; de daño no destructivo como son las emisiones de ceniza, pómez y productos químicos.

MONITOREO DE PRECURSORES

El problema principal del monitoreo es el poco conocimiento que se tiene del mecanismo de erupción y de los escasos datos bien documentados que permitan establecer modelos estadísticos adecuados.

En la mayoría de los casos siempre existen premonitores de una erupción volcánica, el más común es el de actividad sísmica local. Este patrón, incremento en la sismicidad, antes de una erupción, es bastante general, aun cuando son conocidas varias excepciones. El Volcán Heimaey, por ejemplo,

hizo erupción en 1973 sin actividad sísmica premonitora y el Volcán de la Isla Guadalupe no hizo erupción en 1976, aun cuando se detectó actividad sísmica en el área del volcán.

Este último ejemplo es de señalarse puesto que tomando en cuenta el incremento en la actividad sísmica, se optó por evacuar a la población, más de 50 000 personas, lo cual ocasionó una considerable pérdida económica.

Según el caso el monitoreo de precursores se lleva a cabo por medios sísmicos, geodésicos, magnetométricos, químicos y de percepción remota.

En todos los casos existen metodologías desarrolladas para procesar la información y estimar la posibilidad de un futuro evento; sin embargo el método considerado como más confiable es el sísmico. Por esta razón, se recomienda la instalación de redes sísmicas de vigilancia alrededor del área que se piense como posible para la ocurrencia de eventos volcánicos.

CONCLUSIONES

Aunque no existe suficiente literatura relativa al aspecto de riesgo volcánico, en los últimos años ha empezado a aparecer una serie de artículos que evidencian la importancia que este aspecto ha cobrado a nivel mundial. Para el caso de México, que cuenta con una serie de volcanes activos, así como con un número importante de conos cineríticos, el levantamiento de mapas de los depósitos volcánicos, y la reconstrucción de la historia eruptiva de los grandes estratovolcanes es de primordial importancia puesto que se encuentran en zonas de alta densidad de población y de marcado crecimiento.

La evaluación de riesgo parece tener un interés especial para la parte oeste del eje neovolcánico, en especial en el área de Colima-Jalisco, ya que el volcán de Colima está considerado como el de Mayor peligro potencial en México. (Demant, 1978). Adicionalmente, el Volcán de Colima es uno de los más estudiados desde el punto de vista geofísico, por lo que sería recomendable la instalación en el área de un observatorio de vigilancia e investigación, lo cual permitiría apoyar el desarrollo del área de la vulcanología en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- BÁRCENA, M., 1887. Informe sobre el estado actual del volcán de Colima. Anales del Ministerio de Fomento, México 1887.
- BAKER, P. E., 1979. Geological Aspects of Volcano prediction. *J. of Geological Society* 136.
- BOOTH, B., 1979. Assessing Volcanic Risk. *J. of Geological Soc.* 136.

- DECKER, R. W., 1973. State of the Art in Volcano Forecasting *Bull. Volc.* 37, p. 372.
- DEMANT, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de Interpretación. *Revista del Instituto de Geología, UNAM, México.* 2 (2.)
- DÍAZ, S. 1906. Efemérides del Volcán de Colima (1893-1905) Secretaría de Fomento, México.
- FEDOTOV, S., 1976. Mechanisms of Deep-Seated Magmatic Activity Below island-Arcs Volcanoes and Similar Structures. *Int. Geol. Rev.* 19 No. 6.
- FOURNIER D'ALBE, E. M., 1979. Objectives of Volcanic Monitoring and Prediction. *J. of Geol. Soc.* 136.
- MALDONADO K. M., 1970. Escritos Inéditos. Biblioteca del Instituto de Geofísica, UNAM.
- MARTIN DEL POZZO, A. L. y S. DE LA CRUZ REYNA, 1981. Monogenetic Vulcanism in the Sierra Chichinautzin, Mexico: Patterns of activity. *Earth and Planetary Science Letters.* (submitted).
- MINAKAMI, T., 1974. Seismology of Volcanoes in Japan. In *Physical Volcanology* Edited by L. Civetia, P. Gasparini, G. Luongo and A. Rapolla. Elsevier Scient. Pub. Co.
- MOOSER, F., 1958. Catalogue of Active Volcanoes of the World, Part XI, 1, "Central America". *Int. Ass. of Volc. Rome.*, p. 10.
- OROZCO Y BERRA, J., 1887. Efemérides Sísmicas Mexicanas. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate*, Vol. 1.
- REYMENT, R. A., 1976. Analysis of Volcanic Earthquakes of Asamayama (Japan) in Random Process in Geology Springer Verlag, p. 87.
- SIMKIN, T. 1979. *Volcanology. Reviews of Geophys and Space Physics.* 17 No. 4.
- SOBOTA K. F., 1967. Los estudios sobre el ciclo de la actividad del volcán de Colima, Jal., en los años 1894-1965. *Geología y Metalurgia* No. 20, Publicación de la Universidad de San Luis Potosí, México.
- TOMBLIN, J. F., 1971. West Indian Volcanic Eruptions and the Hazard to human Populations. *Trans. Fifth Carib. Geol. Conf. Geol. Bull.* No. 5. Queens College Press.
- WAITZ, P., 1936. Datos históricos y bibliográficos acerca del volcán de Colima. *Memorias de la Sociedad Científica Antonio Alzate*, 53 p. 349.
- WICKMAN, F. E., 1966. Repose periods Patterns of Volcanoes V. *Arck. Miner. Geol.* 4 (7) p. 291.
- WICKMAN, F. E., 1966. Repose periods Patterns of Volcanoes I. *Arck. Miner. Geol.* 4 (11) p. 351.
- WILSON, L., 1976. Explosive Volcanic Eruptions III; *Geophys J. R. Astr. Soc.* 45, 1976.
- YARZA DE LA TORRE, E., 1971. *Volcanes de México* 2a. Edición. Editorial Aguilar, México.