

**Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales
INETER**

**Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación
COSUDE**

Proyecto MET-ALARN

ERUPCIONES VOLCÁNICAS

**Mapas de Amenazas
Recomendaciones técnicas
para su elaboración**

Managua, Nicaragua - Agosto 2005

Créditos

Esta es una publicación del proyecto:
Metodologías para el análisis y manejo de
los riesgos naturales (MET-ALARN).

Financiado por la Agencia Suiza para el
Desarrollo y la Cooperación COSUDE

Equipo Técnico

Ing. Martha Navarro C.	INETER
Ing. Antonio Álvarez	INETER
Dr. Hugo Delgado G.	Universidad Autónoma de México

Coordinador del grupo:

Ing. Martha Navarro C.	INETER
------------------------	--------

Revisión:

Dr. Wilfried Strauch

Con aportes de:

Dr. Toshihiro Asahina	Cooperación Japonesa – Proyecto Mapas de Amenazas Naturales
-----------------------	---



PRESENTACION

Entre Julio de 2003 y Mayo del 2005 el Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) y la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE), desarrollaron el proyecto llamado "Metodologías para el Análisis Local de Amenazas Naturales y Riesgos en Nicaragua", MET-ALARN.

El principal objetivo de este proyecto fue el de propiciar y promover un proceso de estandarización de criterios y leyendas en los mapas de amenazas mediante un proceso de trabajo interinstitucional y multidisciplinario, ampliamente participativo. Se contó con el apoyo de diferentes actores institucionales y de la sociedad civil tales como especialistas y técnicos municipales, organizaciones de la Defensa Civil, así como los usuarios de los mapas de amenazas y población en general.

El documento que aquí se presenta es uno de los resultados obtenidos por el proyecto y constituye un valioso aporte hacia la estandarización de criterios y leyendas para elaborar mapas de amenazas. Recopila e integra las ideas, experiencias y aportes de los especialistas de diversas instituciones y proyectos, con miras a realizar una propuesta viable, flexible y acorde a las limitantes de información y cartografía existentes. Uno de los aportes más valiosos del documento es el de poder ofrecer criterios técnicos, y sencillos de aplicar, congruentes con las experiencias internacionales recogidos en una sola herramienta que, con un alto nivel de confianza, puede ser aplicada por instituciones y especialistas que desarrollan mapas de amenazas.

Esta propuesta es importante para INETER y otras instituciones relacionadas a la temática, ya que permitirá obtener mapas que brinden al usuario información homogénea, amigable y de fácil utilización, y por tanto podrán ser más útiles para mejorar la gestión para la reducción del riesgo.


Claudio Gutiérrez Hude
Director Ejecutivo de INETER




Bárbara Rothenberger
Directora Residente Adjunta
COSUDE – Ayuda Humanitaria



Índice

	Página
PARTE I:	
Objetivos de la propuesta para la elaboración de mapas de amenaza por erupciones volcánicas.	05
1.1 Introducción	07
1.2 Objetivos de la propuesta	09
1.3 Grupo meta	10
	11
PARTE II: Criterios recomendados	
Marco conceptual y metodológico propuesto para la elaboración de mapas de amenaza por erupciones volcánicas.	13
2.1 Marco conceptual	15
2.2 Descripción del fenómeno: Tipología y formas de manifestación	20
2.3 Criterios recomendados para la valoración de la amenaza por erupciones volcánicas.	23
2.4 Leyendas y formatos recomendados para la elaboración de mapas de amenaza por erupciones volcánicas.	29
2.5 Glosario de términos	30
2.6 Referencias bibliográficas	32
	41
Anexos:	46
Metodología para la elaboración de mapas de amenazas por erupciones volcánicas	47
	48
	49

PARTE I

**Objetivos de
la propuesta
para la
elaboración
de mapas de
amenaza por
erupciones
volcánicas.**

1.1 INTRODUCCIÓN

El presente documento, “**Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenazas por erupciones volcánicas**” ha sido elaborado en el marco del proyecto MET-ALARN ejecutado de forma conjunta por INETER y COSUDE.

Ha sido elaborado a través de un proceso participativo en el cual han estado presentes representantes de las siguientes instituciones: INETER, UNN, COSUDE, Solidaridad Internacional, Administración Nacional de Recursos Geológicos y consultores independientes. Los criterios y leyendas propuestas han sido fruto de la experiencia que la Dirección de Geofísica del INETER ha venido desarrollando desde 1990, con el apoyo de países como México por medio del Instituto de geofísica de la UNAM y JICA como el órgano técnico de Japón.

El objetivo de este documento, es proporcionar a los especialistas encargados de producir mapas de amenazas, las pautas mínimas a considerar para la elaboración de estos mapas con el fin de generar documentos comparables, mediante la utilización de los mismos criterios y simbologías.

Esta dirigido a los profesionales que realizan la actividad de generación de mapas de amenazas.

El INETER, como ente rector del tema, considerará la incorporación de estas directrices en los estudios y mapas que sean sometidos a su valoración para poder extender un aval técnico.

1.2 OBJETIVOS DE LA PROPUESTA

Objetivos de la propuesta técnica

Dotar a los especialistas de una herramienta que contenga los criterios Metodológicos mínimos para la elaboración e interpretación cartográfica de un mapa de Amenaza por erupciones volcánicas.

Objetivos específicos

- Estandarizar los criterios para la elaboración de Mapas de Amenaza por erupciones volcánicas.
- Proporcionar una herramienta que coadyuve a profundizar los estudios de Amenaza por erupciones volcánicas.
- Facilitar a los diferentes usuarios una fuente de información que permita mejorar la planificación del territorio y reducir los riesgos por erupciones volcánicas.

1.3 GRUPO META

El presente documento de Recomendaciones Técnicas esta dirigido a Profesionales, Universidades, Organismos no Gubernamentales, Instituciones del Estado, Privadas, Gobiernos Municipales y aquellas personas naturales (consultores, investigadores etc.) que se dedican al estudio del impacto de las erupciones volcánicas en Nicaragua.

PARTE II

Criterios Recomendados

**Marco
conceptual y
metodológico
propuesto
para la
elaboración
de mapas de
amenazas por
erupciones
volcánicas**

2.1 MARCO CONCEPTUAL

Los términos de **peligro (amenaza) y riesgo volcánico** han sido utilizados indistintamente durante los últimos años para dar nombre a los fenómenos geológicos relacionados con la actividad volcánica y su impacto en el medio y la sociedad. Sin embargo, existe una gran diversidad de acepciones de los términos y una creciente confusión entre ellos.

En vulcanología, dado que los conceptos son fundamentales para distribuir responsabilidades se pueden considerar los siguientes conceptos (Delgado, 2002):

Amenazas volcánicas (Av)

Es la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico en un tiempo y área determinada. El peligro y la amenaza volcánica, son términos sinónimos.

La **Av** está en función de la Intensidad, Magnitud o Duración del evento, lo cual puede representarse como: $Av = f(I, P)$

En donde:

I: Intensidad, Magnitud o duración del evento

P: probabilidad de ocurrencia de un determinado evento.

Vulnerabilidad

El daño potencial que el evento amenazante pueda causar dependerá en gran medida de la **vulnerabilidad**, la cual se puede definir como “el sistema de condiciones y procesos resultado de los factores físicos, sociales, económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad o infraestructura al impacto de las amenazas¹.”

Riesgo volcánico

Se define como la posibilidad de pérdidas de vida y daños a la propiedad y bienes culturales en un área expuesta a la amenaza de una erupción volcánica, representa el impacto que tendrían los procesos volcánicos al presentarse en un área determinada, sobre la vida, la infraestructura, la economía y la sociedad en general.

¹ Adaptado del Glosario multilingüe de términos convenidos internacionalmente relativos a la gestión de desastres. IDNDR, 1992

Los volcanes o campos volcánicos activos, muestren o no actividad sísmica o fumarólica, se dice que están en estado de reposo. Si la muestran, entonces se dice que están en estado activo. Se encuentran en estado eruptivo, si eventualmente emiten al menos dos de los siguientes materiales: sólidos (material fragmentado como cenizas, lapilli, bloques o bombas), líquidos (lavas) o gaseosos (vapor de agua u otros).

Existen volcanes que en apariencia, no son volcanes activos por no presentar campos fumarólicos, pero que han tenido actividad eruptiva dentro de los últimos 3 mil años. Estos volcanes pueden tener una reactivación en un futuro dado que sus períodos de reposo son muy prolongados.

Las regiones volcánicas más activas del mundo se ubican en el Cinturón de Fuego del Pacífico, que incluye muchas islas del Pacífico Sur, Occidental y Norte, así como el Japón y muchas zonas extensas del borde occidental de América, incluyendo Centroamérica, el Caribe y grandes áreas de la Cordillera de los Andes.

Gran parte de los procesos geológicos que una erupción volcánica implica, son potencialmente peligrosos. Un volcán activo puede producir diferentes tipos de erupciones con diferentes grados de explosividad, lo cual a su vez determina los diferentes tipos de amenaza. La amenaza puede ser directa o primaria (impacto directo de los productos de la erupción), e indirecta o secundaria (consecuencias secundarias de la erupción).

En Nicaragua, la actividad volcánica está muy relacionada con el proceso de subducción de Placas que afecta el margen pacífico de Nicaragua. Debido a este proceso, la placa Cocos se desliza por debajo de la Placa Caribe, originando la cadena volcánica de Los Murrabios la cual presenta una serie de volcanes activos orientados en dirección Noreste. Entre los volcanes activos están el: San Cristóbal, Telica, Cerro Negro, Momotombo, Masaya y El Concepción, entre otros.

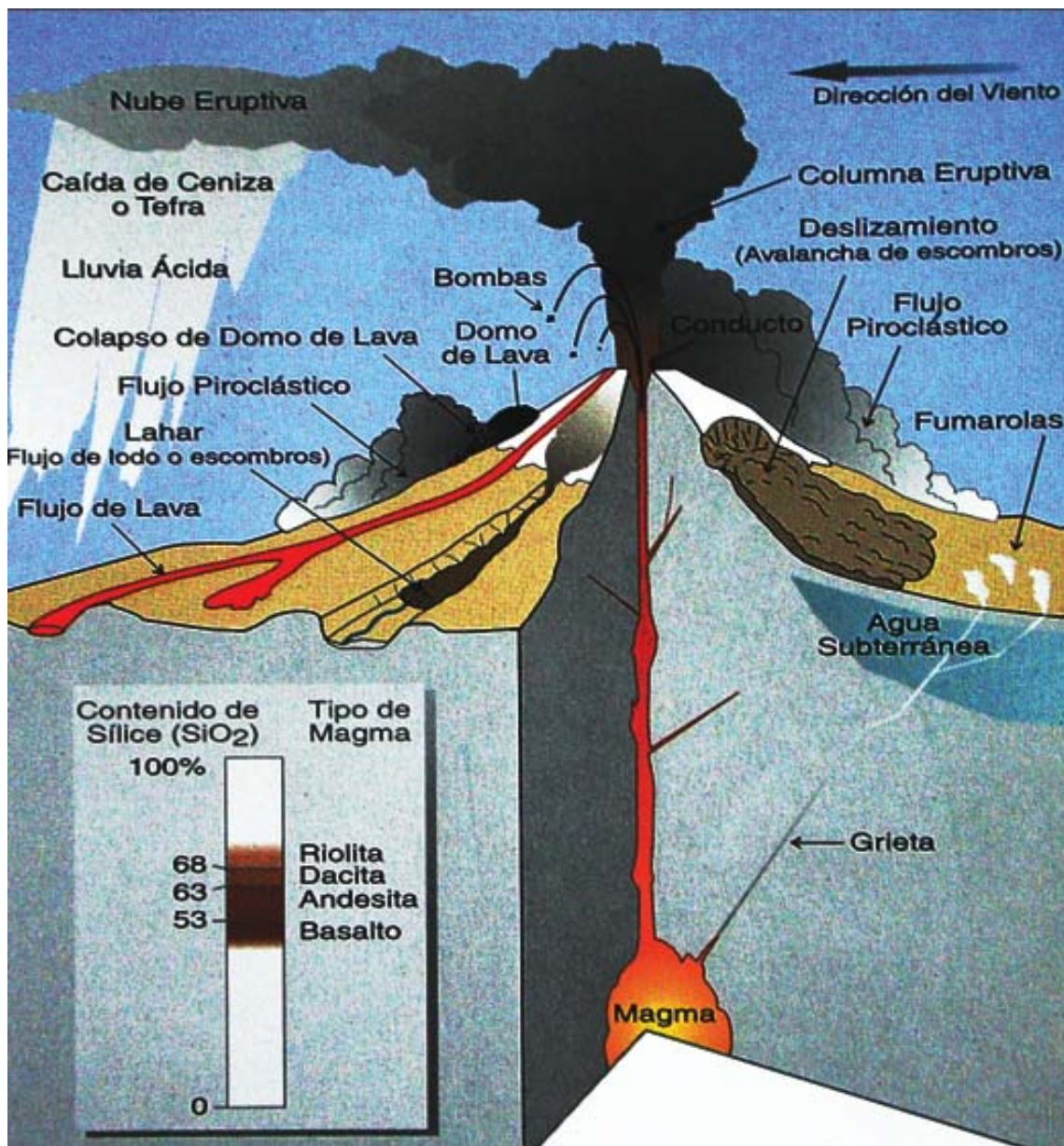
2.2 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO: TIPOLOGÍA Y FORMAS DE MANIFESTACIÓN.

Son **amenazas volcánicas directas** los flujos piroclásticos (oleadas, flujos de pómez y ceniza, nubes ardientes); caídas de tefra (ceniza, lapilli, bloques y bombas); avalanchas volcánicas, colapso estructural y gases volcánicos y las **amenazas volcánicas indirectas** son los deslizamientos, flujos de lodo o lahares, tsunamis, lluvia ácida y la circulación atmosférica de cenizas y material particulado.

El daño potencial de una erupción está en función del tipo de volcán, tipo y magnitud de la erupción, topografía, condiciones meteorológicas y vulnerabilidad de los elementos expuestos.

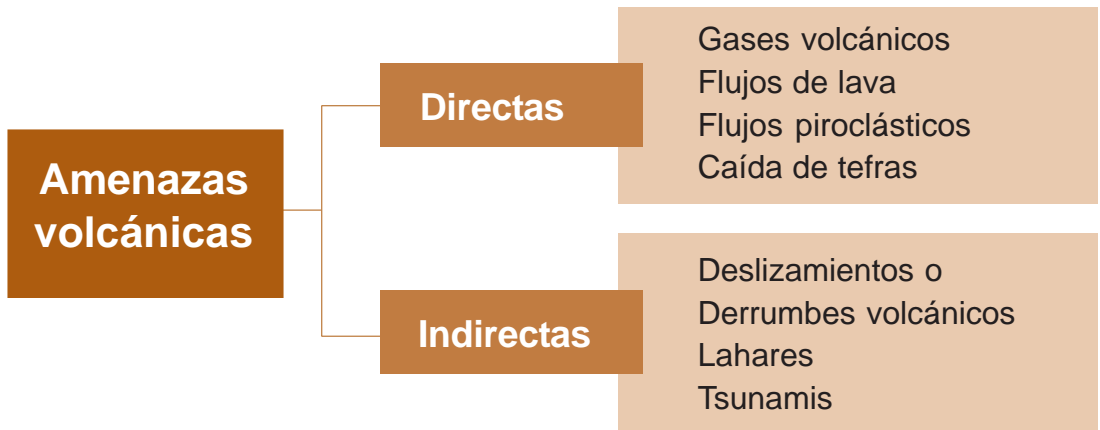
Generalmente las erupciones más dañinas son las más explosivas. Una erupción explosiva expulsa hacia la atmósfera fragmentos de roca sólida y fundida (**tefra**), así como gases volcánicos con gran una energía. Los fragmentos más grandes de roca (**bombas o proyectiles balísticos**) pueden caer hasta distancias de 4 kilómetros o más del cráter o centro de emisión. Los fragmentos más pequeños (menores a 2.5 mm de diámetro) de vidrio volcánico, minerales y roca (ceniza), se elevan muy alto en el aire, formando una enorme y turbulenta **columna eruptiva**.

Las columnas eruptivas pueden crecer rápidamente y alcanzar más de 20 kilómetros sobre el volcán en menos de 30 minutos, formando una **nube de cenizas**. Las nubes eruptivas grandes pueden extenderse cientos o miles de kilómetros en la dirección del viento, y producir **lluvias de ceniza** sobre áreas de gran extensión; el viento transporta las partículas de ceniza más pequeñas a mayores distancias y puede poner en serio peligro a la navegación aérea. Una lluvia de ceniza intensa puede colapsar o derribar edificios, e incluso una lluvia menor de ceniza puede dañar cultivos, sistemas electrónicos y maquinaria.



Fuente: www.ineter.gob.ni

A continuación se describen brevemente los eventos eruptivos que caracterizan a la amenaza volcánica:



Amenazas volcánicas directas

• Gases volcánicos

El magma volcánico contiene gases disueltos, los cuales escapan hacia la atmósfera, tanto durante las erupciones como mientras el magma permanece estacionado cerca de la superficie. Más del noventa por ciento de todo el gas emitido por los volcanes es vapor de agua, la mayoría de la cual es agua subterránea calentada (proveniente de lluvias y ríos). Otros gases volcánicos comunes son el bióxido de carbono, el bióxido de azufre, el anhídrido sulfhídrico y el cloro y el flúor.

Tanto los compuestos de azufre como los cloruros y fluoruros reaccionan con el agua para formar ácidos venenosos, los cuales aun en concentraciones muy bajas son nocivos para los ojos, piel y el sistema respiratorio de humanos y animales. También pueden causar daño o destruir la vegetación. El bióxido de azufre puede reaccionar con las gotas de agua de la atmósfera y producir lluvia ácida, lo cual ocasiona corrosión y daños a la vegetación. El bióxido de carbono es más pesado que el aire, por lo que puede asentarse o mantenerse en áreas bajas en concentraciones letales para la gente y los animales. El flúor, que en altas concentraciones es tóxico, puede ser absorbido por partículas de ceniza volcánica que caen más tarde sobre el suelo y puede envenenar el ganado que se alimenta de pastos cubiertos de ceniza y también puede contaminar los suministros de agua potable.

• Flujos de lavas.

La roca fundida (magma) que emerge o se derrama sobre la superficie de la tierra se llama lava y forma flujos de lava. La composición química de la lava determina la viscosidad o capacidad de fluir de la misma, las lavas con mayor

contenido de sílice (SiO_2), presentan menor fluidez y por tanto las velocidades de avance están entre pocos metros a cientos de metros por hora, forma flujos de lavas cortos y de gran espesor o domos que cubren pocos kilómetros. En cambio la lava basáltica que tiene bajo contenido de sílice puede formar corrientes de movimiento rápido (16 a 48 kilómetros por hora) o esparcirse en amplias capas delgadas de hasta varios kilómetros de amplitud.

Dadas las velocidades de los flujos de lavas, que se consideran bajas, estas raras veces constituyen una amenaza para la vida humana, aunque hay circunstancias excepcionales. La mayor amenaza lo representa el daño o destrucción total por enterramiento, trituración o incendios de todo lo que encuentra a su paso.

- **Flujos piroclásticos (o flujos calientes de ceniza).**

Son masas secas y calientes ($300^\circ > 900^\circ\text{C}$) de ceniza caliente, fragmentos de roca y gases que se movilizan rápidamente a ras de la superficie a velocidades de 160 a 240 kilómetros por hora. Pueden descender por los flancos de un volcán durante erupciones explosivas o cuando un domo de lava que esta creciendo se colapsa y se rompe en pedazos.

Un flujo piroclástico se compone de dos partes. Un flujo basal, denso y que viaja a ras del suelo y una nube turbulenta de ceniza que precede o cabalga al flujo propiamente dicho.

Estos se forman de diversas formas: por colapso gravitacional de columnas eruptivas verticales, destrucción gravitacional o explosiva de domos lávicos y flujos de lavas calientes y por colapso de columnas eruptivas de poca altura.

Este tipo de eventos es muy común en volcanes andesíticos y dacíticos y en calderas silíceas, presentan una amplia gama de composición y temperatura, volumen y tasa eruptiva, lo que se manifiesta en el amplio rango de distancias a los cuales este tipo de flujos puede movilizarse, tendiendo a seguir el curso de los valles, cauces, barrancas y quebradas, y son capaces de derribar y quemar todo en su camino.

Los flujos piroclásticos de bloques y cenizas (fragmentos densos o ligeramente vesiculados dentro de una matriz de ceniza) por lo general son de poco volumen y baja movilidad, por lo que están restringidos a unas pocas decenas de kilómetros de los centros de emisión. Mientras que los flujos piroclásticos de densidad menor, compuestos por pómez, lapilli y cenizas

pueden extenderse hasta 200 km de distancia y cubrir miles de kilómetros cuadrados de superficie. La energía y velocidad que estos flujos alcanzan le permite sobrepasar barreras topográficas de cientos de metros de altura y por lo tanto tienen la capacidad de afectar áreas que yacen fuera de las cuencas hidrográficas cuyas cabeceras apuntan hacia el frente del volcán.

- **Caídas de tefra y proyectiles balísticos:**

La tefra constituye el peligro directo de mayor alcance derivado de erupciones volcánicas, son una amenaza para la vida y las propiedades debido a la fuerza del impacto de los fragmentos que caen, a las partículas en suspensión en el aire y agua, al transporte de gases nocivos ácidos, sales y al enterramiento que producen.

La tefra está constituida por fragmentos de roca y lava que han sido expulsadas hacia la atmósfera y que luego caen nuevamente sobre la superficie terrestre. Las partículas son transportadas hacia arriba por medio de columnas eruptivas, las cuales consisten de una zona inferior de empuje de gases y por una zona superior convectiva. (Sparks & Wilson, 1976), la columna sube hasta la atmósfera hasta que su densidad es igual a la de la atmósfera, y posteriormente se expande lateralmente formando una amplia nube o penacho, al incrementarse la distancia desde el centro de emisión la capa de tefra presenta una disminución en tamaño del grano y forma depósitos mas delgados.

La altura de la columna eruptiva esta determinada por la temperatura del material y por la tasa de emisión del mismo, los cuales en conjunto con la dirección y fuerza del viento, son los factores que controlan el transporte de tefra a grandes distancias.

La tefra varia de tamaño desde ceniza (< 2 mm) a lapilli (2-64 mm) hasta bloques y bombas (>64mm). Las densidades varían desde pómez y escorias de baja densidad, hasta fragmentos líticos muy densos. Cuando está húmeda incrementa su densidad lo que puede generar colapsos de edificios.

Los proyectiles balísticos abandonan el cráter a velocidades de entre decenas a centenas de metros por segundo y siguen trayectorias que no son afectadas por la dinámica de la columna eruptiva o por el viento. El peligro de impacto por grandes fragmentos es máximo cerca del cráter y decrece al incrementarse la distancia del mismo. Por tanto, estos proyectiles se hayan restringidos en un radio de 5 km desde su centro de emisión (Blong, 1984)

Amenazas volcánicas indirectas

- **Deslizamientos o derrumbes volcánicos**

Un **deslizamiento** o **avalancha de escombros** es un movimiento rápido pendiente abajo de material rocoso, nieve y/o hielo. Los deslizamientos volcánicos varían de tamaño, desde movimientos pequeños de escombros poco consolidados hasta colapsos masivos de la cima completa o de los flancos de un volcán. (ejemplo el volcán Mombacho). Los volcanes con pendientes inclinadas son propensos a los deslizamientos o derrumbes porque están contruidos parcialmente de capas de fragmentos de roca suelta. Algunas rocas de volcanes también han sido transformadas en minerales de arcilla plástica debido a la alteración hidrotermal por acción del agua subterránea ácida y caliente. Los deslizamientos de las pendientes de los volcanes se desatan cuando las erupciones, la lluvia intensa o los terremotos de gran magnitud causan que estos materiales se rompan y se muevan pendiente abajo.

- **Lahares**

Los flujos de lodo o **flujos de escombros** que están compuestos principalmente de materiales de los flancos de un volcán se denominan lahares. Estos flujos de lodo, roca y agua, pueden ser calientes o fríos y pueden bajar torrencialmente por los valles, barrancas, quebradas y corrientes de agua de las laderas del volcán. Pueden recorrer mas de 80 kilómetros a velocidades de 32 a 65 kilómetro por hora. Algunos lahares contienen una cantidad tan elevada de detritos (del 60 al 90% en peso), que parecen ríos rápidos de concreto húmedo. Lejos de su fuente, estos flujos pueden inundar con lodo todo a su paso.

Históricamente, los lahares han sido uno de los peligros volcánicos más mortíferos, y pueden ocurrir durante una erupción o incluso cuando el volcán está tranquilo. El agua que crea los lahares puede provenir de lluvias intensas o del rompimiento de un lago situado en un cráter elevado o descongelamiento de la nieve. Los lahares de gran magnitud son un peligro potencial para muchas comunidades ubicadas en las laderas o partes bajas de los volcanes.

- **Tsunamis**

Los tsunamis pueden ser generados por la actividad volcánica cuando grandes masas de agua, son repentinamente desplazadas por una erupción o deslizamiento. La erupción del Krakatoa en 1883 provocó un tsunami que mato a más de 34,000 personas.

2.3 CRITERIOS RECOMENDADOS PARA EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR ERUPCIONES VOLCÁNICAS

Metodología propuesta

La amenaza tiene la siguiente expresión:

$$A_v : f (I \times P)$$

Donde:

I: intensidad, magnitud o volumen, duración del evento, alcance, extensión, velocidad, temperatura)

P: Probabilidad

- probabilidad de ocurrencia de un determinado tipo de proceso eruptivo en un intervalo de tiempo dado;
- ó la probabilidad de alcance máximo de los productos de un proceso eruptivo;
- ó la probabilidad de distribución espacial de los productos relacionados con un proceso eruptivo.

Como se mencionó en capítulos anteriores, **la amenaza volcánica** es la probabilidad de ocurrencia de un evento volcánico de una determinada intensidad, alcance o distribución en un tiempo y área determinada.

La amenaza volcánica (**A_v**) está en función de la Intensidad (magnitud o duración del evento) y de la probabilidad de que dicho evento ocurra.

Evaluación de la amenaza volcánica

A mediano y largo plazo que implica lo concerniente a la identificación, evaluación, cartografía y zonificación de la amenaza volcánica en función de su probabilidad e intensidad.

A corto plazo, estudios referidos al monitoreo volcánico y a la preparación para enfrentar un posible proceso eruptivo.

Este documento se referirá exclusivamente a los estudios a medio y largo plazo, que involucra la elaboración de mapas de amenazas volcánicas para los diferentes procesos eruptivos.

La base para la evaluación de la amenaza de un volcán es la reconstrucción de las erupciones históricas y las prehistóricas, la geología y estratigrafía del área, por tanto la disponibilidad de información geológica abundante es fundamental para llevar a cabo una evaluación de amenazas y poder construir los mapas de amenaza correspondiente.

El proceso para la evaluación de la amenaza volcánica es muy complejo y es muy difícil separar el análisis de la intensidad, de la probabilidad, sin embargo, con el fin de darle una mayor claridad al documento, se presentaran de manera separada ambos aspectos.

Criterios recomendados para la evaluación de la **intensidad** del evento

La evaluación de la intensidad de los procesos o eventos asociados a una erupción volcánica implica el análisis de parámetros diferentes para cada evento, cada parámetro influencia de diferente forma el grado de amenaza del volcán. Entre estos factores o parámetros se mencionan los siguientes: tasa, volumen, velocidad, temperatura, distancia de viaje desde el volcán hasta el área afectada, etc.

Cada una de estos parámetros físicos influyen la capacidad del fenómeno de producir daño, por ejemplo las variables que determinan la extensión de un flujo de lava, de una corriente de densidad piroclástica o de un lahar son volumen, movilidad, velocidad y transformaciones del flujo, mientras que para las Caídas de tefra, la intensidad se basa en la magnitud en función del volumen total de tefra caída o en la relación *espesor versus distancia* del centro de emisión, lo cual puede ser conocido de anteriores caídas de tefra y de los modelos regionales de circulación de los vientos; otros autores han definido zonas circulares a varias distancias y han identificado los sectores hacia los cuales el viento sopla con mayor frecuencia.

En el caso de los Flujos de lava la intensidad se puede medir en función de los espesores de los flujos, la velocidad del movimiento y la extensión areal que cubren estos flujos. A manera de resumen se presentan en la tabla siguiente una serie de parámetros, para cada proceso eruptivo y la intensidad que puede estar asociada a ellos:

Proceso Eruptivo	INTENSIDAD			
	Distancia del impacto (km desde el centro de emisión)	Volumén (m ³)	Espesor	Indice de explosividad (VEI)
Flujos piroclásticos	< 10 Extremo 10-20 Alta > 10 Media			> 4 Alta 2 - 4 Media 0 - 2 Baja
Flujos de lava	< 10 Alta 10-30 Media > 30 Baja			
Gases	< 30 Alta 30-100 Media > 100 Baja			
Caídas de Tefra	< 30 Alta 30-100 Media > 100 Baja	>10 ³ Alta 10 ⁶ -10 ⁸ Media > 10 ⁶ Baja	>1m Alta 0.3 - m Media > 0.3 m Baja	
Proyecciones balísticas	< 1 Alta 1-5 Media > 5 Baja			

Criterios recomendados para evaluar la **probabilidad** de ocurrencia del evento

Para determinar la probabilidad de ocurrencia de una erupción volcánica de características definidas es importante realizar una extrapolación estadística de los patrones de la actividad volcánica pasada. Una aproximación estadística se justifica por el hecho de que los volcanes son sistemas complejos regulados por procesos aleatorios.

El reconocimiento de las distribuciones estadísticas de la ocurrencia de las erupciones y los períodos de reposo, partiendo de la premisa básica de que el comportamiento futuro de un volcán está contenido en su actividad pasada.

En Nicaragua en el marco del proyecto BGR, se han utilizado escalas de frecuencia para definir los niveles de amenaza. En base a esa experiencia recomiendan las siguientes escalas de frecuencia de ocurrencia:

Es sumamente difícil predecir el tiempo exacto de una erupción volcánica y la razón principal es la gran complejidad en la interacción de factores que gobiernan el comportamiento de un volcán por lo que una erupción puede ser considerada como un evento aleatorio en el tiempo y la secuencia de erupciones como un ejemplo de proceso estocástico (Wickman, 1965).

Periodo	Frecuencia	Período de retorno
Anual y Decenal	Alta	$Tr \leq 50$ Años
Centenario	Media	$50 \text{ Años} < Tr \leq 200$
Centenario	Baja	$200 \text{ Años} < Tr \leq 500$
Milenio	Muy Baja	$Tr \geq 500$ Años

Criterios recomendados para determinar la **probabilidad de alcance y distribución** de un evento volcánico

Como se mencionó anteriormente, en el caso de la amenaza volcánica, se puede estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado proceso de una magnitud dada, de igual forma también se puede estimar a probabilidad de que un determinado evento tenga una extensión o alcance determinado.

En estos casos, los rangos para la probabilidad de alcance máximo de los productos de un proceso eruptivo; ó la probabilidad de distribución espacial de los productos relacionados con un proceso eruptivo se mencionan a continuación:

Proceso Eruptivo	Alcance (km desde el centro de emisión)	Probabilidad de alcance	Distribución Espacial (Km)	Probabilidad de distribuc. espacial
Flujos piroclásticos	< 10 10-20 > 20	Muy Alta Alta Media	Decenas Centenas Miles	Alta Media Baja
Flujos de lava	< 10 10-30 > 30	Alta Media Baja	Decenas Centenas Miles	Alta Media Baja
Gases	< 30 30-100 > 100	Alta Media Baja	Decenas Centenas Miles	Alta Media Baja
Caídas de Tefra	< 30 30-100 > 100	Alta Media Baja	Decenas Centenas Miles	Alta Media Baja
Proyecciones balísticas	< 1 1-5 > 5	Alta Media Baja	Decenas (m) Centenas Miles	Alta Media Baja

Determinación de los niveles de amenaza por erupción volcánica

Conforme, lo descrito anteriormente, los rangos o niveles para los mapas de amenazas resultan de la relación intensidad y frecuencia es la siguiente:

Intensidad	Extrema				
	Alta				
	Media				
	Baja				
		Alta	Media	Baja	Muy Baja
		Al menos un evento en 50 año o +	Al menos un evento en 100 años	Al menos un evento en 500 años	Al menos un evento en 1,000 años
		Tr < 50 años	50 > Tr < 200	200 < Tr < 500	Tr > 500 años
		Frecuencia /Tr			

Leyenda:

Amenaza Extrema



Amenaza Alta



Amenaza Media



Amenaza Baja



Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio

Los mapas de amenaza volcánica (intensidad vs frecuencia o Tr) son utilizados en los procesos de planificación y gestión territorial, por lo que estos deben representar el uso que se le puede dar y los daños potenciales a que este uso estaría expuesta una determinada zona:

Significado de los mapas de amenazas para la planificación del territorio		
Grado de amenaza	Pérdidas y daños previsibles en caso de uso para asentamientos humanos	Implicaciones para el ordenamiento territorial
Amenaza Alta (Rojo)	Las personas están en peligro tanto adentro como afuera de los edificios. Existe un alto peligro de destrucción total y repentina de edificios, viviendas, cultivos, etc. O Los eventos se manifiestan con una intensidad relativamente débil, pero con una frecuencia elevada. En este caso, las personas están sobre todo amenazadas afuera de los edificios.	Zona de prohibición , no apta para la instalación, expansión o densificación de asentamientos humanos. Áreas ya edificadas deben ser reubicadas, o protegidas con medidas de reducción de amenaza, obras de protección, sistemas de alerta temprana y evacuación temporal.
Amenaza Media (Naranja)	Las personas están en peligro afuera de los edificios, pero no o casi no adentro. Se debe contar con daños en los edificios, pero no destrucción repentina de éstos, siempre y cuando su modo de construcción haya sido adaptado a las condiciones del lugar.	Zona de reglamentación , en la cual se puede permitir la expansión y densificación de asentamientos humanos, siempre y cuando existan y se respeten reglas de ocupación del suelo y normas de construcción apropiados. Construcciones existentes que no cumplan con las reglas y normas deben ser reforzadas, protegidas o desalojadas y reubicadas.
Amenaza Baja (Amarillo)	El peligro para las personas es débil o inexistente. Los edificios pueden sufrir daños leves, pero puede haber fuertes daños al interior de los mismos, daños a la agricultura, abrasión, corrosión por gases a maquinarias, equipos y herramientas.	Zona de sensibilización , apta para asentamientos humanos, en la cual la población debe ser sensibilizada ante la existencia de amenazas moderadas y poco probables, para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento apropiadas ante éstas.
Amenaza residual (Rayas amarillas)	Existen amenazas que tienen una probabilidad de ocurrencia muy débil y que se pueden manifestar con una intensidad fuerte.	Zona de sensibilización , apta para asentamientos humanos, en la cual los usuarios del suelo deben ser sensibilizados ante la existencia de amenazas muy poco probables, para que conozcan y apliquen reglas de comportamiento apropiadas ante éstas.
	Verde Claro: ninguna amenaza conocida, o despreciable según el estado actual de conocimientos	

2.4 LEYENDAS Y FORMATOS RECOMENDADOS PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE AMENAZA POR ERUPCIÓN VOLCÁNICA.

El mapa de amenaza volcánica deberá mostrar los múltiples fenómenos eruptivos de forma simple, clara y entendible por el público en general; deberá contener diseño de gráficos, tablas, esquemas e imágenes de forma simplificada. Deberá incluir la descripción, impacto y efectos de los diferentes eventos volcánicos; esquemas explicativos e ilustrativos de las amenazas identificadas o factores naturales (dirección del viento) que amplifican el alcance de la amenaza. También elementos de la metodología, como datos cartográficos, coordenadas, escala, mapas de localización e índice, autores y fecha.

Los mapas de amenaza son herramientas que describen la distribución probable, en espacio y tiempo, de productos relacionados con la ocurrencia de ciertos procesos eruptivos. Describen escenarios de magnitud probable de ocurrir para procesos eruptivos, de acuerdo con eventos ocurridos en un sitio de características similares, para el cual existen datos detallados

Por tanto, los mapas de amenaza volcánica son mapas de pronósticos de procesos eruptivos basados en la simulación de eventos calibrados o calibrables. Los pronósticos son establecidos para escenarios de diferente magnitud. No obstante, hay que reconocer que los pronósticos son limitados.

La finalidad de un mapa de amenaza volcánica es mostrar cartográficamente los posibles alcances de los productos volcánicos de acuerdo con escenarios específicos de erupción y, por otra parte, contar con un recurso cartográfico que permita a las autoridades de gobierno y defensa civil, la planeación de actividades encaminadas a la prevención y mitigación de los efectos de la actividad volcánica y, a la población que vive cerca de los volcanes, informarse respecto a los peligros potenciales del medio que habitan.

Tipos de mapas de amenazas de erupciones volcánicas

Los mapas de amenaza volcánica pueden construirse para volcanes individuales, regiones y sitios específicos.

- **Mapas para volcanes específicos.**

Los mapas de amenaza volcánica pueden mostrar una zonificación de acuerdo con el tipo de proceso geológico o volcánico que se lleva a cabo o se podrían llevar a cabo en el futuro en un volcán determinado.

Cada uno de los procesos puede ser simulado (en el caso que se tenga a mano una herramienta computacional o de otro tipo a mano) de acuerdo con los diferentes niveles de magnitud que se esperarían durante una erupción, con base en criterios geológicos y volcanológicos normados por las secuencias estratigráficas e observaciones de erupciones históricas que den parámetros de las magnitudes posible que pueden llevarse a cabo en un sitio particular.

Si no se cuenta con la información necesaria acerca del volcán es posible tomar la información disponible del volcán más cercano, siempre considerando criterios volcanológicos para ajustar condiciones eruptivas de un volcán que presenta o ha presentado en el pasado condiciones similares a aquél que se requiere zonificar.

- **Mapas regionales.**

El problema a resolver es la zonificación de amenazas combinadas de varios volcanes en una región para reconocer la influencia de la actividad eruptiva en zonas específicas tales como zonas habitacionales, industriales, plantas hidroeléctricas y nucleares, entre otras.

- **Mapas de sitio.**

La construcción de mapas de amenaza para sitios específicos, está dirigida a reconocer los procesos específicos que afectan la funcionalidad de una infraestructura particular. La información para construir estos mapas puede incluir (Hoblitt et al., 1987):

- Frecuencia y magnitud de los eventos volcánicos registrados en la geología histórica del sitio, o que pueden ser inferidos para el sitio a partir del registro geológico de otros lugares.
- Historia eruptiva de cada volcán que podría afectar el sitio.
- Eventos de tipo o magnitud sin precedentes en volcanes cercanos al sitio, pero que han ocurrido en un volcán similar.

Características que deben poseer los mapas de amenaza por erupción volcánica.

1. **Congruencia.** Los conceptos involucrados en el mapa, deben ser congruentes con los contenidos. Un mapa de amenazas,
 - a. No es un mapa geológico modificado.
 - b. No es un mapa de isopacas o isopletas.
 - c. No es un mapa geomorfológico o de dinámica del relieve.
 - d. Es un mapa de probabilidades.

2. **Objetividad:** Un mapa de amenazas volcánicas es un mapa que refleja diferentes niveles de probabilidad de ocurrencia o alcance de eventos o productos eruptivos. Por ello,
 - a. Se debe señalar y describir con detalle en la memoria de construcción los parámetros utilizados.
 - b. Se debe señalar que clase de información se está cartografiando (probabilidad de ocurrencia, de alcance, etc.).

3. **Sencillez.** Un mapa será utilizado de manera intensa por personas no especializadas en vulcanología. Por esta razón el mapa debe reflejar de manera sencilla los niveles y procesos que se plasman. Un mapa de amenazas,
 - a. No debe involucrar nomenclatura que no sea explicada claramente en la leyenda o en la simbología.
 - b. No debe mostrar simbología especializada (lineamientos de fallas y fracturas, rumbo y buzamiento de capas, etc.).
 - c. Debe mostrar de manera integral diferentes escenarios de acuerdo con niveles de magnitud eruptiva, para diferentes tipos de procesos (por ejemplo, 3 niveles de explosividad; 3 niveles de alcance de flujos piroclásticos, 3 niveles de alcance de cenizas, etc.).
 - d. Aspectos técnicos necesarios como curvas de nivel, deben mostrarse en tonos tenues que permitan ver el contenido del mapa claramente.

4. **Solidez.** El mapa debe ser construido utilizando información geológica básica, simulaciones empíricas tomando en cuenta las situaciones actuales y parámetros físicos conocidos. Cabe señalar que,
 - a. Un flujo de lava nuevo se moverá por cauces diferentes a los flujos anteriores. de acuerdo a una topografía cambiante con cada erupción. Esto implica que el producto final debe ser dinámico.
 - b. Para la construcción de escenarios de amenaza por lahares se pueden utilizar los niveles de precipitación conocidos para otros volcanes y/o los niveles conocidos en la región bajo estudio.

- 5 **Permanencia.** Un mapa de amenaza volcánica debe construirse, pensando que no será posible modificarlo en el corto o mediano plazo. Esto implica que,
- Deben establecerse claramente los objetivos, lineamientos, metodologías, diseño, alcances y contenidos de los mapas, antes de elaborarlos.
 - La zonificación de los escenarios contemplados debe apoyarse en bases científicas y los textos involucrados deben expresar y explicar los contenidos, significados y procesos descritos en el mapa, en un lenguaje claro, sencillo y accesible a todo público.
 - El mapa de amenazas debe ser pensado y reflexionado cuidadosamente antes de publicarlo.
 - Debe pensarse para permanecer por bastante tiempo, por que los planificadores lo usaran y lo procesarán en lapsos que duran muchos años. Si el mapa se sustituye por otro más reciente, puede generarse confusión, desconfianza y disminución de la credibilidad. En realidad, hay casos en que surge la necesidad de elaborar un mapa de amenaza por motivos administrativos aunque no haya suficientes datos geológicos. Por consiguiente, se debe aclarar en el mapa que el mismo se elaboró en base a los resultados de estudios y el nivel técnico existentes.
6. **Relevancia.** Un buen mapa de amenazas, es una herramienta muy útil para la planificación y por ello es un producto de alto impacto.
- Los mapas los utiliza la defensa civil para la planeación de estrategias.
 - Las decisiones de desarrollo urbano, comercial e industrial los deben tomar en cuenta para la planificación del desarrollo y para la construcción de nuevas infraestructuras.
 - Un mapa de amenazas construido de manera precipitada, sin fundamentos científicos y técnicos sólidos, confuso, críptico y sin apego a la realidad de los procesos, es un mapa de poca utilidad que sólo sirve para guardarlo en el armario.
7. **Divulgación de los Mapas de Amenaza**
- El mapa debe estar disponibles para todo aquella persona o institución que necesite la información que contienen, por tal razón deben ser elaborados en forma sencillas y en diferentes formatos simples, de manera tal que pueda ser reproducible en libros para escuelas primarias, secundarias, sitios Web, etc.

Leyenda de los mapas de amenaza por erupción volcánica

La representación de la información base en estos mapas como las curvas de nivel, hidrografía, Vegetación, centros poblados, red vial, etc, será conforme la leyenda oficial que utiliza el INETER y que se anexa a este documento.

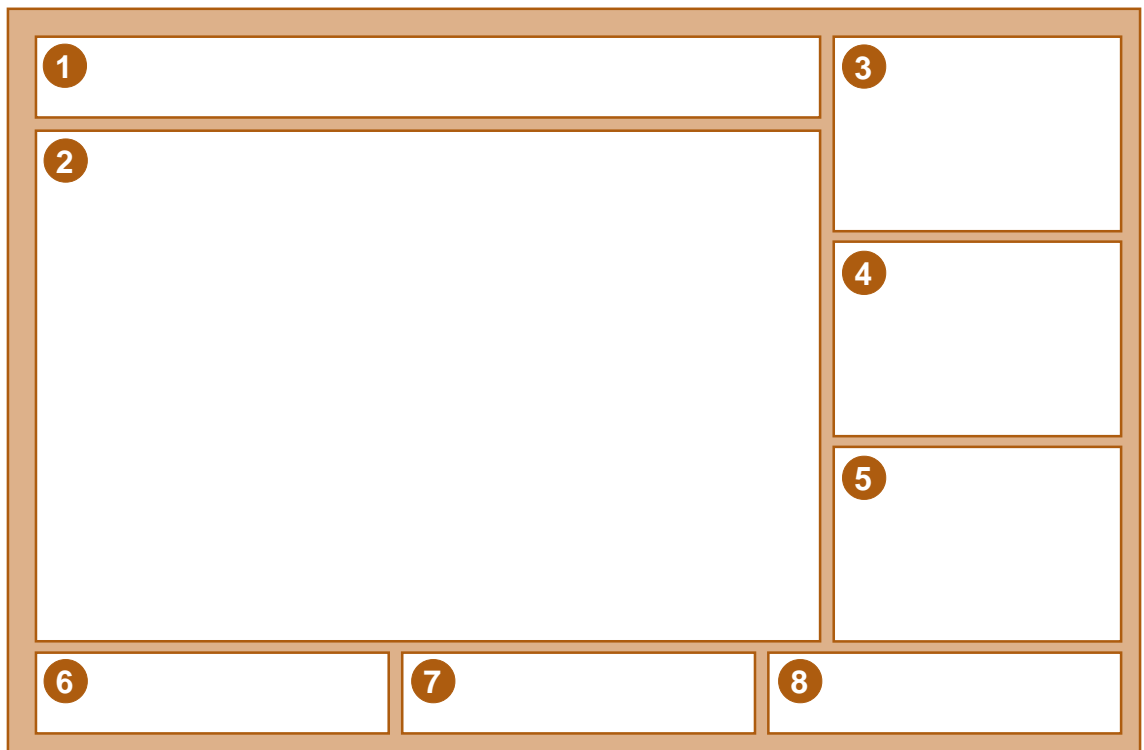
La leyenda temática, es decir referida a los procesos eruptivos y niveles de amenazas, se realizará conforme los estándares internacionales. En el caso de deslizamiento, seguir los criterios y leyendas elaborados para este fenómeno.

Mientras que los niveles de amenaza que se cartografiaran serán cuatro:

Amenaza Extrema		Amenaza Media	
Amenaza Alta		Amenaza Baja	

Formatos de los mapas de amenaza por erupción volcánica

La forma y tamaño del mapa así como la distribución de la información que contiene el mapa, estará en dependencia de la forma del área cartografiada y de la escala a utilizar, sin embargo en la medida de lo posible se tratará de utilizar un layout horizontal que contenga la siguiente información:



- 1 Zona de título, Lista de autores y personas que han contribuido, logotipos de las instituciones
- 2 Cuerpo del mapa temático conteniendo el Norte, y la malla con las coordenadas geográficas y UTM, Curvas de nivel principales y secundarias, red vial, red hídrica, poblados y caseríos e infraestructura importante.
- 3 Leyenda con la explicación de los símbolos utilizados; tanto los símbolos cartográficos básicos como los temáticos, presentados de forma separada y claramente descrita.
- 4 Texto en el cual se explica los objetivos del mapa y la metodología utilizada o el procedimiento de elaboración del mapa y su nivel de precisión. También incluir resumen de los resultados y los criterios utilizados para elaborar el mapa con gráficos y o fotos.
- 5 Mapa de Nicaragua con la ubicación del área de estudio.
- 6 Declinación magnética, fuente de datos básicos, referencias, sistema de coordenadas y datum utilizados.
- 7 Escala grafica y numérica.
- 8 Mosaico con la ubicación de las hojas topográficas que abarcan el área de estudio.

Escala y precisión de los mapas de amenaza por erupción volcánica

Conforme lo establecido por la UNESCO, 1976, en cuanto a la clasificación de la escala de los mapas, los mapas a escala 1: 50 000 son considerados como escala media, escala grande 1:10,000 y menores. Los mapas para planificación municipal a escala 1: 10,000 a 1: 50,000 son suficientes, no obstante para planeamiento urbano deben ser escala mas grandes, menores de 1:10,000.

Las amenazas cartografiadas en mapas a escala 1:50,000 no pueden ser utilizadas para el análisis de sitios muy particulares, estudios de detalle deben recomendarse en esos casos.

El grado de precisión es inherente a la metodología utilizada en la elaboración del mapa y a la escala del mapa. A mayor escala se espera mayor precisión. La precisión del mapa depende de un sin numero de variables incluyendo la calidad de los datos y otra información de base, la continuidad de las series de datos, calidad de análisis de modelos empíricos y sus correlaciones, la calidad de los datos de campo y de la experiencia de los autores.

Por consiguiente, los mapas de amenaza tiene que tomar más en consideración quienes son los usuarios. Los mapas de amenaza deben ser disponibles para evacuación, entendimiento del fenómeno volcánico, planificación del uso de tierra, entre otros. Dado que es indispensable para los usuarios que el mapa tenga cierta calidad, es necesario actualizar los mapas básicos y mapas de amenaza de acuerdo a los estudios geológicos, información volcánica, o uso de tierra.

Como mínimo, el grado de confiabilidad debe ser brindado en el mapa, y explicar la potencial fuente de errores.

Contenido mínimo del informe técnico

1. Introducción
2. Metodología
3. Caracterización geológica
 - a. Registro estratigráfico, tipo de actividad eruptiva (incluyendo magnitudes) y sus alcances y dimensiones (distancias, espesores y tamaños de partículas)
 - b. Períodos de reposo mínimos, promedios y máximos
4. Recopilación de datos físicos necesarios o construcción de la cartografía base.
 - a. Modelos digitales de elevación.
 - b. Datos de precipitación.
 - c. Datos de intensidad y dirección del viento.
 - d. Mapas topográficos para vaciado de la información.
5. Simulación de fenómenos eruptivos.
 - a. Procesos eruptivos a recrear.
 - b. Escenarios y niveles que se recrearán.
 - c. Simulación de los fenómenos eruptivos alimentados, calibrados y ajustados a los datos físicos recopilados y a criterio geológico normado con la recopilación del inciso 3.
6. Zonificación de las amenazas

2.5 GLOSARIO DE TÉRMINOS

Avalanchas de escombros: Tienen mayor movilidad que sus equivalentes no volcánicas, por ello, viajan más lejos. El alto grado de facturación de las rocas dentro de los volcanes y la presencia de fluidos y gases hidrotermales y/o magmáticas favorece su ocurrencia. Entierran y destruyen lo que encuentran a su paso, y alteran la topografía preexistente. Se pueden generar lahares y crecientes a partir del desagüe de avalanchas de escombros o drenar catastróficamente y generar lahares y crecientes.

Caídas de tefra: Son fragmentos de roca y lava (ceniza, lapilli, bloques y bombas) expulsados a la atmósfera y que caen nuevamente sobre la superficie terrestre y constituyen el peligro directo de mayor alcance derivado de erupciones volcánicas. La caída y el enterramiento puede provocar colapso de techos de edificios, afectar la visibilidad y salud de personas, dañar maquinaria, líneas de energía, medios de comunicación, contaminar fuentes de agua y causar incendios. El transporte aéreo y en carreteras, son especialmente vulnerable.

Colapsos estructurales: Son comunes en volcanes debido a pendientes fuertes, fallas, materiales débiles, deformación interna causada por intrusiones, y otros factores. La formación repentina de caídas de rocas, deslizamientos de roca, y avalanchas de escombros, constituyen una gran amenaza ya que pueden iniciarse repentinamente y tienen una gran movilidad.

Domos volcánicos: Son generados por lava demasiado viscosa para fluir lateralmente (dacita y riolita), y forman flujos cortos y gruesos, o domos empinados de pocos kilómetros cuadrados. La principal amenaza son los flujos piroclásticos y explosiones generadas desde su interior. En dependencia de la topografía pueden viajar grandes distancias y si se mezclan con agua pueden generar lahares capaces de alcanzar mayores distancias.

Explosiones lateralmente dirigidas: Son fenómenos complejos que comparten características de flujos y oleadas piroclásticas. Resultan de la despresurización repentina del sistema magmática y/o hidrotermal dentro del volcán, ya sea por deslizamientos o por alguna otra razón.

Flujo de lava: Corriente de roca fundida que sigue la pendiente del terreno desde una fuente central, con velocidades de pocos a cientos de metros por hora para flujos de lava silíceos y de varios kilómetros por hora, para flujo de lava basálticos. El mayor riesgo es el daño parcial o total por enterramiento, trituration o incendio de lo que encuentra a su paso.

Flujos piroclásticos: Son mezclas secas y calientes (300 a 800°C), de escombros piroclásticos y gases que se movilizan rápidamente a ras de la superficie a velocidades con un rango de 10 a varios cientos de metros por segundo. Representan amenaza de muerte por asfixia, enterramiento, incineración e impacto. Se pueden mezclar con agua superficial para formar lahares y crecientes, que pueden causar graves destrozos en los valles aguas abajo.

Flujos de lodo o lahares: Son mezclas de escombros rocosos movilizadas por agua que se origina en las pendientes volcánicas. Sus propiedades físicas dependen del tamaño de los fragmentos y contenido de agua. Pueden alcanzar velocidades de varios metros hasta 40 metros por segundo, sobrepasar barreras topográficas y amenazar propiedades, vidas humanas, destruir campos cultivados e infraestructuras, rellenar los cauces de ríos.

Flujos hiperconcentrados: Son mezclas fluidas de agua y sólidos granulares las cuales poseen un esfuerzo de cedencia que se produce cuando la concentración de partículas sólidas (arena, arcilla) se encuentra entre 55 a 60 % en peso o 35 a 40% en volumen

Flujos de escombros: Son mezclas fluidas de agua y sólidos granulares sumamente viscosas que tienen un significativo esfuerzo de cedencia. Son capaces de transportar partículas sólidas de tamaño grava y la concentración de partículas sólidas se encuentra entre 75 a 80 % en peso o 55 a 60% en volumen. Un flujo de escombros puede diluirse y transformarse en un flujo hiperconcentrado. Pueden ser generados de la mezcla de escombros de roca y agua en un volcán.

Gases volcánicos: El magma contiene gases disueltos que escapan a la atmósfera durante las erupciones cuando este permanece estacionado cerca de la superficie o es emitido por sistemas hidrotermales. El más abundante es el vapor de agua, otros gases importantes son el dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de azufre, ácido sulfhídrico, cloro y flúor. Son transportados desde sus centros de emisión como aerosoles ácidos, compuestos químicos por la tefra y como sales, en partículas microscópicas. Sus efectos se relacionan con su concentración, la cual decrece con la distancia desde su punto de emisión.

Lluvia ácida: Es la reacción con el agua de los compuestos de azufre (cloruro y fluoruros) para formar ácidos venenosos, que aún en concentraciones bajas, son nocivos para los ojos, la piel y el sistema respiratorio de personas y animales. En dependencia de su concentración y tipo de vegetación, también pueden destruir tejidos textiles y metales.

Oleadas piroclásticas: Son dispersiones gas-sólido, turbulentas, bajas en concentración de partículas, que fluyen sobre la superficie del terreno a altas velocidades. Son altamente peligrosas debido a sus altas velocidades de decenas de metros por segundo, y a su gran movilidad. Adicionalmente, amenazas por nubes de ceniza, impacto de fragmentos de roca, enterramiento, incineración, gases tóxicos. Mezclados con agua, se convierten en flujos de lodos y lahares.

Tsunamis: Son olas o trenes de ondas marinas de período largo, generadas por un repentino desplazamiento de masas de agua. Estas atraviesan aguas profundas a gran velocidad en forma de olas anchas y bajas, para luego elevarse considerablemente al acercarse a la playa. Al parecer sismos volcánicos o volcano-tectónicos, explosiones, colapso, deslizamiento, lahares o ingreso de flujos piroclásticos al mar, pudieran originarlos.

2.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- **CERG-UNIGE, 2002.** Workshop on Volcanic Risk Assessment and its Management for the Eolian Island Vulcano (Italy)
- **DELGADO, G. H. 2002.** Curso de Peligros y riesgos volcánicos. INETER
- **DELGADO, G. H. Y NAVARRO, M. y FARRAZ, A. 2002.** Mapas de amenazas volcánicas del volcán Concepción (I,II, III). Escala 1:40 000
- **DELGADO, G. H. Y NAVARRO, M. y FARRAZ, A. 2004.** Mapas de amenazas volcánicas del volcán Cerro Negro. Escala 1:50 000
- **INETER-BGR, 2003.** Mapa amenaza volcánica de Managua y alrededores. Proyecto de Mitigación de Georiesgos en Centroamérica. Escala 1:100 000.
- **NAVARRO, M.** Procedimientos para determinar la amenaza volcánica. INETER. Informe interno
- **TILLING, I. R. 1993.** Apuntes para un curso breve sobre Los Peligros Volcánicos.

ANEXOS

**Metodología
para la elabo-
ración de ma-
pas de ame-
nazas por
erupciones
volcánicas**

En Nicaragua, en colaboración con la Universidad Autónoma de México y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, se ha elaborado una serie de mapas de amenaza volcánica, utilizando metodologías cuyo proceso se presenta en este capítulo de manera resumida, y cuya experiencia se retoma en este documento.

Generalmente, y dada las ventajas que la utilización de herramientas de información geográfica, representa, se utilizan modelos de simulación para modelar los diferentes escenarios, los cuales son calibrados con información de campo.

Las actividades que conllevan las diferentes metodologías que se pretenden aplicar son las siguientes:

Paso 1: Recopilación y análisis de bibliografía y material cartográfico

En esta actividad se recopila y analiza información relativa al área o centro volcánico que se pretende estudiar.

Entre los mapas a revisar están el mapa topográfico y de pendiente que contienen elementos cartográficos (carreteras, pueblos, ríos, elevaciones, nombres geográficos, curvas de nivel) y las variaciones locales en la topografía del edificio volcánico y es importante por su estrecha relación con algunas amenazas volcánicas que pueden ser amplificadas por la pendiente del terreno, como es el caso de lahares y flujos piroclásticos.

También los mapas geológicos y estructurales permiten representar patrones estructurales de fallas de diverso tipo y estructuras tectónicas que pueden ser indicativas del comportamiento tectónico evolutivo del volcán, así como la distribución de los materiales geológicos sobre la superficie de la corteza terrestre, indica su edad relativa y relaciones entre ellos, y además sugiere su posición bajo la superficie.

Las **imágenes de sensores remotos (foto aérea, satélite y radar)** son también herramientas auxiliares de trabajo que permiten reconocer estructuras de fallas, lineamientos estructurales, zonas de fracturas y actividad hidrotermal y pueden cumplir además con propósitos de monitoreo de la actividad volcánica consideradas en conjunto.

Paso 2: Clasificación de las erupciones por tamaño y magnitud

La asignación correcta del tamaño y magnitud de la actividad pasada puede ser crucial en la identificación del patrón estadístico que describa la ocurrencia temporal de las erupciones. Sin embargo el problema de medir el tamaño de la erupción y asignarle un valor es complejo.

En un intento por encontrar una forma práctica para la escala de las dimensiones de las erupciones Newhall y Self (1982) definieron el índice de explosividad (VEI), que es empleado para asignar las dimensiones a erupciones pasadas a partir de diversas estimaciones, entre las que se encuentran los parámetros de Walker (1980). (anexo 1)

Considerando la secuencia de las erupciones históricas del volcán bajo estudio se le asignan a cada una un valor de VEI y se pueden representar datos de ocurrencia de la erupción por tamaño. Para lo cual se construye una tabla en la cual los renglones representan los intervalos de tiempo y las columnas el valor de VEI, partiendo de que tal estimación de las dimensiones de la erupción son buenos. Aquí sólo se muestra como ejemplo una pequeña parte de la tabla.

Década	Índice de explosividad				
	2	3	4	>2	>3
1560 - 69	1	0	0	1	0
1570 - 79	0	1	0	1	1
1580 - 89	0	0	1	1	1
1590 - 99	0	1	0	1	1
Total	1	2	1	4	3

Número de erupciones reportadas en el volcán Colima por categoría de VEI

Paso 3: Caracterización geológica

Para estimar la frecuencia de erupciones pasadas, la edad del registro estratigráfico de la actividad eruptiva y la actividad relacionada debe ser determinada con exactitud.

En primer lugar se determina **el periodo de referencia o tiempo que abarcara dicho estudio**. La elección del intervalo dependerá de la frecuencia eruptiva y el estilo de la actividad. Si existe suficiente información, se recomienda que el período de referencia o de estudio date de aproximadamente 3000 años al presente.

Es importante determinar los períodos de actividad y de reposo de un volcán, para lo cual son de gran utilidad las descripciones detalladas de los contactos que separan las unidades eruptivas y que pueden aportar información sobre los intervalos de tiempo entre los eventos eruptivos. La comprensión del patrón temporal de la actividad volcánica es esencial para la modelación de la actividad y la evaluación de las amenazas volcánicas.

El estudio del comportamiento de un volcán durante largo tiempo incrementa la probabilidad de que se conozca el rango tanto de su tipo y frecuencia eruptiva, como de la magnitud de sus erupciones.

Un registro extenso podría documentar patrones de comportamiento episódico o cíclico, o mostrar evidencias de un patrón evolutivo distinto, lo cual sería de gran valor para estimar las posibilidades de ocurrencia y las características de una reactivación de un volcán en estado latente.

La reconstrucción del registro geológico de las erupciones pasadas y su actividad reciente a través del mapeo geológico comprende:

1. Establecer la secuencia estratigráfica de las erupciones pasadas.
2. Determinar la extensión de depósitos individuales o de grupos de depósitos y a partir de esto estimar la magnitud de las erupciones que los produjeron y las áreas afectadas por erupciones futuras.
3. Determinar el origen de los depósitos
4. Determinar la edad de los depósitos por medio de varias técnicas con el objeto de determinar una cronología de eventos y estimar su frecuencia.

Rossi (1996) enfatiza que la reconstrucción de la actividad volcánica sobre intervalos de decenas o milenios se basa principalmente en un estudio estratigráfico, ya que este tipo de estudios permite:

1. Delinear la historia volcánica, identificando períodos de reposos y de actividad.
2. Definir las características de las fases eruptivas y evaluar la probable extensión de las áreas afectadas.
3. Datar eventos eruptivos y la duración de los períodos de reposo
4. Evaluar los parámetros eruptivos relevantes para reconstrucciones precisas de los eventos pasados (por ejemplo, la tasa de descarga, volumen, línea de energía).
5. Determinar las características de la mayor erupción esperada y proveer los parámetros necesarios para su simulación.
6. Establecer parámetros de actividad volcánica (por ejemplo, secuencias recurrentes de fenómenos eruptivos).
7. Definir ciclos magmáticos que estén relacionados tanto a reservorios someros o a sistemas de alimentación profundos.

No obstante la aplicación de los conceptos estratigráficos a terrenos volcánicos podría ser complicada debido a:

1. La variación del volumen y dispersión de las unidades volcánicas.
Lo elemental de volcanología es establecer tanto la secuencia para cada uno de los volcanes como la comparación con la secuencia más extensa de la región.
2. La posibilidad de que una intensa erosión haya afectado los materiales volcánicos durante los períodos de reposo.
3. La presencia de variaciones laterales y verticales dentro de la misma unidad eruptiva.

Establecer la secuencia estratigráfica de las erupciones pasadas.

La estratigrafía es la técnica que puede permitir el reconocimiento del comportamiento eruptivo de un volcán, aunque la actividad eruptiva futura puede no ser igual a la actividad eruptiva del pasado y esto tiene que ser entendido tanto por las personas que realizan la evaluación de las amenazas como por quienes utilizarán tal evaluación. No obstante, el establecimiento de la secuencia de erupciones pasadas es una condición mínima para conocer las características y procesos de las actividades volcánicas y constituye la información más importante del volcán, en cuanto a su utilidad.

Una vez que las diferentes unidades estratigráficas han sido identificadas, los depósitos pueden ser analizados para cuantificar los parámetros eruptivos y de transporte. Tal información permite un entendimiento sustancial del volcán y provee información básica para la modelación de erupciones futuras. Los datos requeridos incluyen compilaciones de mapas y documentos, así como la determinación de parámetros físicos. Los mapas y los parámetros relevantes deben ser particularmente precisos y completos para que puedan ser considerados como representativos de la erupción más violenta que pueda presentarse en el futuro.

Es importante enfatizar, sin embargo, que la interpretación de la estratigrafía requiere varias líneas de evidencia, que incluyen el espesor del depósito, su litología, composición química, estratificación, relación con la topografía, distribución areal así como la variación de los rasgos con respecto a la distancia a la fuente.

Determinar la magnitud de las erupciones

Los parámetros volcanológicos incluyen volumen de magma emitido, tamaño de grano y distribución de componentes, tasa de descarga de masa, características físicas del magma, etc. Para conocer la extensión se utilizan técnicas de mapeo geológico para determinar la extensión de los depósitos de los eventos volcánicos, esto es necesario para estimar la magnitud de los eventos pasados y así identificar áreas que podrían ser afectadas por erupciones futuras.

La mayoría de estos datos representan los parámetros de entrada para la modelación de una erupción futura y para la compilación de mapas de amenaza asistidos por computadora.

Determinar el origen de los depósitos

Se realiza a través de estudios petrológicos y geoquímicas (su naturaleza, distribución y volumen).

Es uno de los aspectos más difíciles de estudiar, puesto que depósitos de apariencia similar pueden haber sido formados por diferentes procesos. Algunas de las características específicas son el tamaño de grano, litología, grado de selección, estratificación, evidencia de calor, expresión topográfica y distribución superficial.

Determinar la edad de los depósitos.

Se determina la cronología de eventos y así estimar la edad del registro estratigráfico de la actividad eruptiva y de la actividad relacionada. Esto es su frecuencia eruptiva. Existen varios métodos para conocer la edad de un depósito, por ejemplo:

- Registros Históricos: Son datos de erupciones presenciadas por el hombre pero en ocasiones no siempre están a disposición, o son incompletos, cortos o inexactos.
- Dendrocronología: Método utilizado en zonas donde los árboles desarrollan anillos de crecimiento y pueden proporcionar con exactitud (+ 1 año) la edad de eventos volcánicos (Brantley et al., 1986).
- Carbono radioactivo: Es una técnica especialmente útil para determinar la edad de depósitos volcánicos en un rango de edad de los últimos 10 000 años.
- Los métodos de determinación de la edad por termoluminescencia (TL) y resonancia del espín del electrón (REE): Se basan en medir la dosis de radiación que una muestra o espécimen ha recibido desde la ocurrencia de un cierto evento, tal como transporte, cristalización, exposición a la luz del sol, calentamiento o fallamiento.
- La determinación de la edad por hidratación de la obsidiana: Basado en la hidratación de la obsidiana a lo largo de fracturas y superficies, la cual es función de la composición y de la temperatura (Friedman y Obradovich, 1981).
- Grado de modificación de la topografía a causa de procesos erosivos.- estudiado por Wood (1980) donde la degradación progresiva de cono de escoria.
- Métodos correlativos: La correlación de un evento o rasgo con otro de edad conocida puede proporcionar un control de edad preciso y confiable.
- Tefracronología Utilizada ampliamente en la estratigrafía volcánica, ya que las capas de tefra pueden ser usadas para determinar equivalencias cronológica de estratos a distancias pequeñas o grandes (Thorarinsson, 1981).
- Paleomagnetismo: Basado en la medición en las variaciones seculares del campo magnético terrestre.
- Fósiles y artefactos: Han tenido un uso limitado en la determinación de la edad de depósitos volcánicos jóvenes.

Además de los métodos mencionados anteriormente, existen muchos más, entre ellos el método K-Ar con la que se puede determinar la edad en unidad de 100 mil años. La determinación de la edad de los depósitos del volcán mediante un método de medición preciso es una de las medidas más importantes para aclarar las características eruptivas del volcán. En conjunto este proceso permitirá la reconstrucción del comportamiento eruptivo pasado del volcán, lo cual provee la base para evaluar los peligros o amenazas potenciales de futuras erupciones.

Reconstrucción de la historia eruptiva de un volcán

Los registros históricos y prehistóricos de la actividad volcánica y de su estado actual son la base para la mayoría de evaluaciones de las amenazas volcánicas. (Crandell et al., 1984).

- **Erupciones históricas** son erupciones que ocurrieron en un intervalo de tiempo (desde 1000 a 100 años) y que fueron observadas por el hombre y las cuales han sido transmitidas de diferentes formas pero generalmente en forma verbal.

Las observaciones constituyen una fuente importante de información sobre las características de erupciones pasadas, su edad, las áreas impactadas y los efectos de las erupciones sobre la gente y sus alrededores. Además el estudio detallado de los depósitos de estas erupciones combinado con la interpretación de observaciones y fotografías proporciona valiosa información sobre sus características e incrementan el conocimiento sobre los procesos volcánicos (Taylor, 1958).

- **Erupciones prehistóricas** son erupciones que ocurrieron en un espacio de tiempo bastante amplio y las cuales no pudieron ser observadas por el hombre y el único registro que existe son los depósitos resultantes de las mismas erupciones.

La reconstrucción se realiza tomando en consideración la historia eruptiva de un volcán, la cual se realiza reconstruyendo el registro geológico de las erupciones pasadas y su actividad reciente (erupciones históricas y prehistóricas). , para ello contar con los datos descritos en el capítulo anterior referente a:

- 1 Secuencia estratigráfica.
- 2 Extensión de depósitos individuales o de grupos de depósitos y magnitud de las erupciones que las produjeron.
- 3 Origen de los depósitos.
- 4 Edad de los depósitos

La perspectiva alcanzada por el estudio del comportamiento de un volcán durante largo tiempo incrementa la probabilidad de que se conozca el rango tanto de su tipo y frecuencia eruptiva, como de la magnitud de sus erupciones. Asimismo un registro extenso podría documentar patrones de comportamiento episódico o cíclico, o mostrar evidencias de un patrón evolutivo distinto, lo cual sería de gran valor para estimar las probabilidades de la ocurrencia y las características de una reactivación de un volcán en estado latente.

Paso 4: Simulación por computadora

Los mapas de amenaza deben ser basados en la mayor cantidad posible de información científica, del volcán a evaluar. En caso de no contar con la información científica, del volcán a evaluar. En caso de no contar con la información para el volcán bajo estudio y de no contar con el tiempo mínimo (o recursos económicos) necesarios, se podrá utilizar la información de un volcán similar al volcán en cuestión.

Para realizar el trabajo de simulación por computadora, es necesario reunir toda la información geológica posible, adquirir los parámetros físicos básicos necesarios para analizar, sintetizar e interpretar los datos compilados e integrados, así como los datos de campo para establecer el concepto de probabilidad (o posibilidad en su caso), reconocer magnitudes, identificar escenarios máximos, intermedios y mínimos. Finalmente, de toda la información sintetizada, se identificará y seleccionarán los parámetros físicos para ser usados en las simulaciones.

Para las simulaciones por computadora, es necesario:

i. Seleccionar:

- Los procesos a simular
- Los escenarios que serán recreados
- Los programas de cómputo
- La entrada y salida apropiada de resultados (formato de datos, mapa base, DEM, etc.)

ii. Planear:

- La calibración y recreación de cada proceso usando datos seleccionados previamente.
- Después de la calibración, recrear eventos similares a lo largo del sitio siguiendo criterios geológicos basados en los antecedentes compilados.
- Corroborar qué tan realista es la salida de las simulaciones, así como la localización geográfica de las trayectorias, límites, etc.

iii. Procesar los resultados:

- Seleccionar la forma más sencilla de resumir las simulaciones de los escenarios.
- Sobreponer al mapa base.
- Acordar el diseño final del mapa.

Procedimiento para el análisis de las series de tiempo de la erupción de un volcán

Los estudios cuantitativos tratan de compilar, en lo posible, el mayor número de eventos eruptivos que permitan evaluar la duración de los tiempos de reposo entre las erupciones.

Los análisis de las series de tiempo de la erupción de un volcán, o grupo de volcanes pueden hacerse de varias formas. Dos métodos son especialmente útiles:

- 1- Graficar el número de ocurrencias vs tiempo: estas gráficas enfatizan tendencias sistemáticas y permiten una rápida percepción de las fluctuaciones en el número de eventos en cada tamaño o categoría, sin embargo proveen escasa información sobre los regímenes que involucran el proceso.

2- Gráficas acumulativas de la ocurrencia vs tiempo: en donde se puede mostrar el número total de erupciones que han ocurrido antes de t , se construyen graficando el número de erupciones acumuladas vs t , también se pueden graficar categorías de VEI, este tipo de gráfica permite observar tendencias y ver como la tasa de ocurrencia fluctúa en el tiempo.

En curvas acumulativas, el promedio del número de erupciones por unidad de tiempo de un período dado puede encontrarse fácilmente uniendo los puntos de la gráfica y midiendo la pendiente de la línea resultante. Este tipo de gráficas da información rápida acerca de los procesos estacionarios.

Los procesos dependientes del tiempo pueden mostrar cambios significativos en la pendiente relativa a la tasa promedio de ocurrencia, donde:

$$m = \frac{\text{n}^\circ \text{ total de erupciones}}{\text{duración total de la muestra}}$$

Para conocer el comportamiento de los datos sobre los períodos de reposos, se construyen un serial correlation scatter diagram, que consiste en una gráfica de tiempos de reposos sucesivos entre las erupciones, con el intervalo $D_{t_i+1} = t_{i+1} - t_i$ entre dos erupciones en el eje **Y** como una función de intervalos de reposo previos $D_{t_i} = t_i - t_{i-1}$ en el eje **X**.

Si la secuencia de la erupción es aleatoria, el resultado es un diagrama de dispersión que puede desplegar una alta dispersión de puntos con una tendencia a agruparse cerca de los ejes. Si la duración de los períodos de reposo es algunas veces es condicionado por valores previos, esta gráfica puede exhibir algunas regularidades.

También se puede obtener información interesante de la distribución de los tiempos de reposo empleando una teoría llamada empirical survivor function, que es definida como:

$y_N(t) =$ proporción de los intervalos de reposos mayores que t .

Graficada como una función de t , donde N es el número de intervalos de la

muestra. Frecuentemente, las survivor functions de los datos de un volcán son curvas exponenciales. Por lo que es más conveniente graficar el logaritmo de la empirical survivor function contra t . Una distribución exponencial (descrita como un proceso Poissoniano) puede producir una línea recta:

$$yN(t) = a \exp(-It),$$

donde a es el número de eventos contados en la correspondiente categoría de VEI durante todo el período muestreado y

$$I = \frac{\text{número total de erupciones en la categoría VEI}}{\text{número de décadas muestreadas}}$$

esto significa la tasa de ocurrencia (la misma que se definió como m). El inverso de este número, $1/I$ representa el ***promedio de tiempo entre erupciones***.

Es muy útil construir simultáneamente tablas de períodos de reposo entre erupciones, dichas tablas pueden elaborarse de dos formas:

- Tiempos de intervalo entre erupciones, considerando sus tamaños o considerando sólo aquellas de cierta magnitud.
- Distribución de tiempos de reposos para cada tamaño de categoría o conjunto de categorías, contando el número de períodos de reposo que exceden ciertos valores.

Las tablas o gráficas de ocurrencia de erupciones o tiempos de reposos frecuentemente muestran que las categorías bajas de VEI siguen siendo patrones erráticos y que el número de erupciones se incrementa con el tiempo.