



## Modelamiento asistido por Computador de Flujos piroclásticos en el Volcán Cerro Machín (Tolima, Colombia)

MILTON GIOVANNI OBANDO-QUINTERO <sup>(1)</sup>

RICARDO ANDRES RAMOS-PATÍÑO <sup>(2)</sup>

MODESTO EUSEBIO PORTILLA-GAMBOA <sup>(3)</sup>

HECTOR CEPEDA-VANEGAS <sup>(4)</sup>

(1) E-mail: m geobando\_ci@hotmail.com

(2) E-mail: ricardoramosp@hotmail.com

(3) Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. E-mail: mportillag@ciencias.unal.edu.co

(4) INGEOMINAS, Bogotá, E-Mail: hcepeda@ingomin.gov.co

OBANDO-QUINTERO, M.O.; RAMOS-PATINO, R.A.; PORTILLA GAMBOA, M.E. & CEPEDA-VANEGAS, H., G. (2003): Modelamiento asistido por computador de flujos piroclásticos en el Volcán Cerro Machín (Tolima, Colombia).- GEOLOGIA COLOMBIANA, 28, pp. 21-37, 15 figs., 2 Tablas, 1 Lamina, Bogotá.

### RESUMEN

Los modelamientos asistidos por computador, se constituyen en una herramienta muy útil para la elaboración de la evaluación de la amenaza por flujos piroclásticos ante erupciones de volcanes activos. Un flujo piroclástico es el resultado del colapso gravitacional de una columna de erupción o de domos volcánicos emplazados durante el evento eruptivo; este flujo puede ser modelado como un bloque que se desliza sobre una superficie, en donde la fuerza de gravedad es la que genera el movimiento y las propiedades intrínsecas del flujo, tales como la viscosidad y la cohesión, juegan un papel importante, en cuanto a la movilidad que puede alcanzar dicho flujo, la velocidad máxima lograda por el mismo y la distancia a la que puede llegar. De esta manera. Conociendo la dispersión alcanzada por flujos piroclásticos emitidos por el Volcán Cerro Machín (VCM) es posible establecer parámetros que serán de utilidad para la simulación de flujos piroclásticos por medio del programa FLOW3D (SHERIDAN & KOVER 1997). Con estas simulaciones es posible establecer los escenarios de afectación ante una eventual erupción.

Palabras clave: Modelamientos asistidos por computador, Flujos piroclásticos, FLOW3D, Volcán Cerro Machín, Evaluación de la amenaza.

### ABSTRACT

Computer-assisted models are a useful tool for the pyroclastic flows hazard assessment during volcanic eruptions in active volcanoes. A pyroclastic flow is the product of the gravitational collapse from an eruption column or volcanic domes which are emplaced during the eruptive event; these flows can be simulated like a block which is moved over an inclined surface, where the gravity force is the mechanism which triggers movement, and the intrinsic properties like viscosity and cohesion play an important role in the flow mobility, maximum velocity, and maximum distance reached by the flow. In this way, if the dispersion of the pyroclastics emitted by the Cerro Machín Volcano (VCM) in the past is known, it is possible to establish the parameters which will be important for the simulations with the FLOW3D program (SHERIDAN & KOVER 1997). With the simulations it is possible to establish the zones which might be affected by pyroclastic flows during an eventual eruption.

Keywords: Computer-assisted modelling, Pyroclastic flows, FLOW3D, Cerro Machín Volcano. Hazard Assessment.

## INTRODUCCION

A lo largo del siglo XX se han desarrollado grandes avances con respecto al modelamiento de flujos conducidos por gravedad (tales como flujos de escombros, flujos piroclásticos, flujos de lodo y oleadas piroclásticas entre otros); ALBERT HEIM en 1932 desarrolló el modelo de la línea de energía para explicar la dinámica de un flujo de escombros ocurrido en Elm, Suiza, a finales del siglo XIX. Posteriormente, a principios de la década de los ochenta, sucedió un evento que fue estudiado con gran detalle, la erupción del Monte Santa Helena con lo que fue posible desarrollar nuevos modelos como los de McEWEN & MALIN (1989), utilizando una herramienta como los computadores, por medio de los cuales no es solo posible desarrollar cálculos de velocidades de los flujos y su dispersión sino que también es posible, en una interface gráfica, mostrar las áreas que pueden verse potencialmente afectadas, lo que facilita la comprensión del evento. Para la década de los noventa, Sheridan, Malin y Kover desarrollaron el código FLOW a partir de las observaciones hechas sobre el Santa Helena; de esta manera se logró el programa FLOW3D (SHERIDAN & KOVER 1997) el cual permite modelar en tres dimensiones y en tiempo real, flujos piroclásticos emitidos durante una erupción. Con estos modelos es posible realizar simulaciones para flujos piroclásticos emitidos por el Volcán Cerro Machín (VCM) y que puedan llegar a afectar la localidad de Cajamarca (Tolima, Colombia).

## MODELAMIENTO DE FLUJOS PIROCLASTICOS

### 1. Modelos del bloque deslizando y de la línea de energía

Los deslizamientos, los flujos piroclásticos, los flujos de lodo, las corrientes de turbidez de alta densidad y muchos otros tipos de flujos de escombros se caracterizan por alcanzar grandes velocidades durante su desplazamiento, así como por la capacidad que tienen de recorrer grandes distancias. Muchas teorías han sido desarrolladas para explicar la movilidad de este tipo de flujos. HELM (1932) planteó el modelo de la línea de energía para explicar el deslizamiento de 1881. En este modelo se parte del supuesto que la masa en movimiento se comporta como un cuerpo rígido el cual se desplaza sobre una superficie inclinada como resultado de la acción de la fuerza de gravedad  $g$  (Fig. 1).

En esta primera aproximación solo existe un ángulo de inclinación  $\alpha$  donde el bloque de masa  $m$  se encuentra sometido bajo fuerzas deslizantes  $F_D$  y fuerzas de Fricción  $FF$  que se encuentran en balance; De este manera con un ángulo  $\alpha$  el bloque se deslizará en un movimiento continuo con una velocidad constante, la tangente del ángulo de

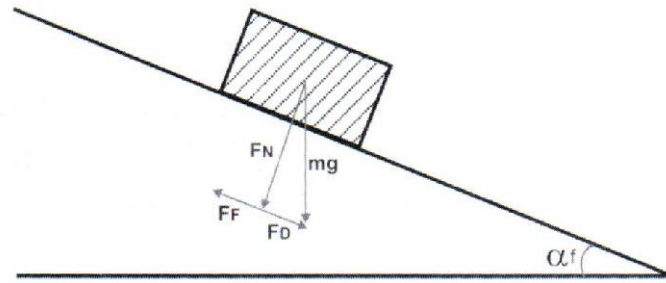


Fig. 1. Modelo del Bloque Deslizante

inclinación  $\alpha$  es el coeficiente de fricción dinámico  $\mu$  para el bloque que se desliza sobre la superficie; este parámetro puede utilizarse para expresar la relación constante entre las fuerzas normales y las fuerzas de fricción por medio de la siguiente ecuación:

$$FF = - F_D = \mu F_N = \mu mg \cos \alpha$$

La fuerza deslizante  $F_D$  y la fuerza normal  $F_N$  dependen de la inclinación de la superficie sobre la cual se desliza el bloque. En esta situación (Fig. 2), el bloque se acelera con la pendiente y se desacelera a lo largo de su recorrido horizontal donde el ángulo de inclinación es prácticamente cero. Como se observa en la Fig. 2, la distancia total de recorrido a lo largo de la horizontal  $L$ , puede ser dividida en dos segmentos denominados: distancia de aceleración  $L_A$  y distancia de desaceleración  $L_D$ .

La energía inicial del bloque corresponde a su energía potencial dada por la siguiente ecuación:

$$E_{pot} = mgH$$

donde  $m$  = masa del bloque,  $g$  = aceleración debida a la fuerza de gravedad y  $H$  = a la altura desde la cual se inicia el movimiento.

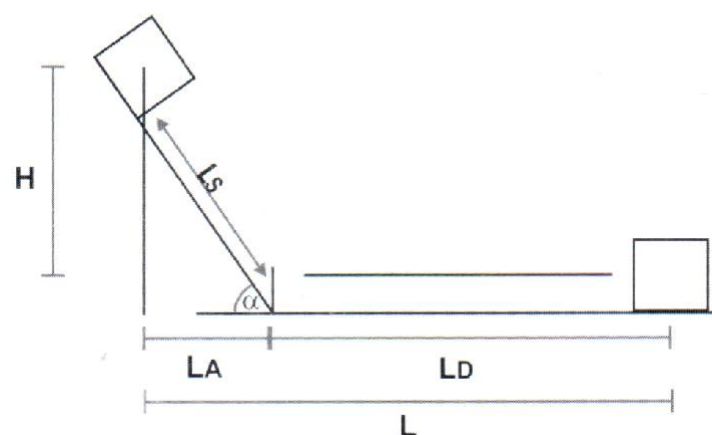


Fig. 2. Diagrama de un Bloque deslizando a través de una superficie con pendiente variable

De esta manera, en el segmento donde se encuentra la mayor inclinación, la energía potencial del bloque será transformada en energía cinética; una porción de esa energía cinética es consumida como resultado del trabajo de fricción durante la aceleración  $W_A$  como se expresa en la siguiente ecuación:

$$W_A = - F_{FA} L_S$$

donde  $F_{FA}$  es la fuerza de fricción a lo largo de la superficie inclinada y  $L_S$  es la distancia a lo largo de la pendiente. En el segmento donde la inclinación se hace cero, la energía cinética remanente es consumida por efecto de la desaceleración del bloque debida al cambio de pendiente; de esta manera se tiene un trabajo de desaceleración expresado mediante la siguiente ecuación:

$$W_D = - F_{FD} L_D$$

donde  $F_{FD}$  es la fuerza de Fricción a lo largo del trayecto horizontal donde ocurre la desaceleración  $L_D$

Esta serie de ecuaciones puede ser resumida mediante la siguiente ecuación de energía:

$$E_{pot} + W_A + W_D = 0$$

De esta manera el trabajo total  $W$  debido a la fricción puede ser expresado de la siguiente manera:

$$W = - E_{pot} = W_A + W_D = - F_{FA} L_S - F_{FD} L_D = - \mu mg L_S \cos \alpha - \mu mg L_D$$

Si  $L_S \cos \alpha = L_A$ , la ecuación se puede simplificar de la siguiente forma:

$$W = - \mu mg (L_A + L_D) = - \mu mg L$$

Incorporando esta nueva ecuación a la ecuación de energía se tiene:

$$E_{pot} + W = mg H - \mu mg L = 0$$

De esta manera se obtiene una expresión simple para el coeficiente de fricción  $\mu$  mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \mu &= mgH / mg L \\ \mu &= H/L \end{aligned} \quad (1)$$

Así, la distancia horizontal recorrida  $L$  depende de la altura a la cual se origina el movimiento  $H$  y del coeficiente de fricción  $\mu$ ; también se tiene que el coeficiente de fricción es independiente de la masa del bloque que se desliza y en tanto  $L_S \cos \alpha = L_A$ , será también independiente del patrón de deslizamiento.

HEIM (1932) aplicó este modelo conectando el punto más alto del borde donde se inició el deslizamiento de Elm (HEIM *op. cit.*) con el punto más lejano del frente del flujo (Fig. 3); la línea recta resultante es la línea de energía de la masa en movimiento y la tangente del ángulo  $\Theta$  formado entre la línea de energía y la horizontal da como resultado el coeficiente de Heim ( $H/L$ ) que es equivalente al coeficiente de fricción  $\mu$  descrito anteriormente.

Por analogía con corrientes de escombros, de caída de rocas y avalanchas de nieve, Hsü (1975), SHERIDAN (1979) y MALIN & SHERIDAN (1982) adaptaron el modelo de la línea de energía para simular el emplazamiento de flujos piroclásticos; la línea de energía está definida en este caso por la altura de caída vertical del flujo piroclástico ( $H$ ) y la distancia máxima recorrida por la avalancha ( $L$ ).

$$H/L = (1/Mc) \cdot \tan \alpha = \tan \Theta_f \quad (2)$$

donde:

$Mc$  = factor de movilidad.

$\tan \alpha$  = análogo dinámico del coeficiente de fricción estático entre granos.

$\Theta_f$  = ángulo mínimo de la línea de energía para el flujo de granos.

El valor de  $Mc$  es mayor a 1,0 y se incrementa con el aumento de la fracción volátil o cuando el flujo es turbulento; el valor de  $\tan \alpha$  es estimado en 0,6, que es un valor promedio para granos sin cohesión, según observaciones hechas por Hsü (1975).

El concepto de línea de energía puede también explicar la manera por la cual los flujos pueden superar las barreras topográficas a grandes distancias desde el conducto de erupción (Fig. 4).

## 2. Modelo FLOW3D

La base del código FLOW3D es la generación de un

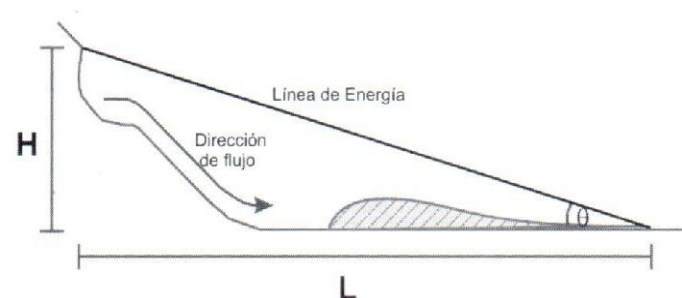
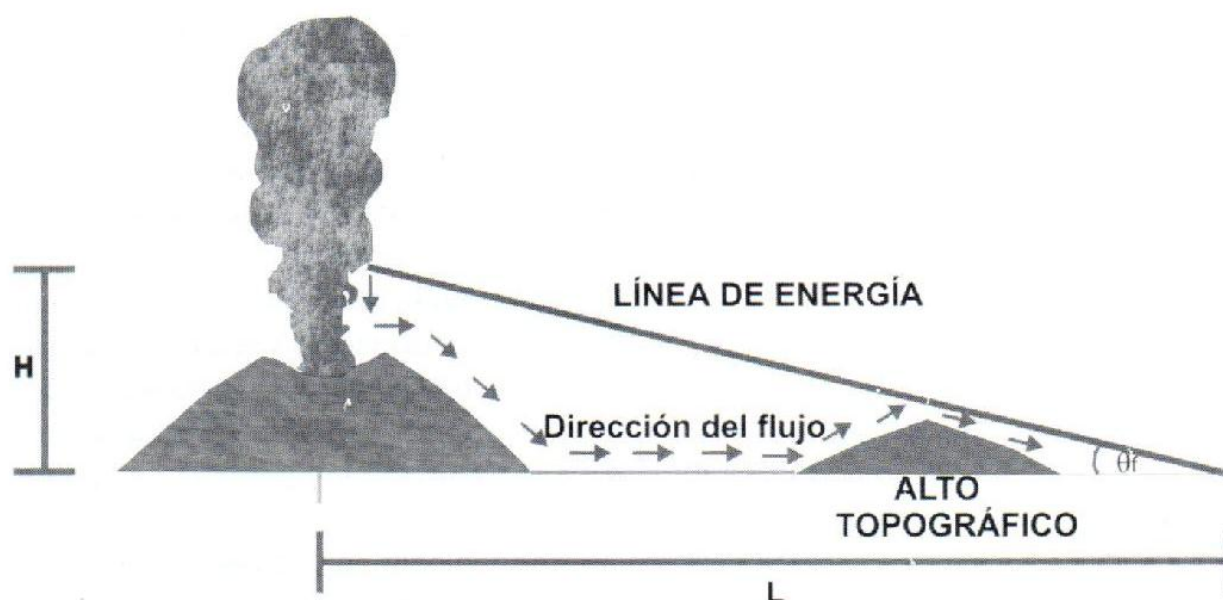


Fig. 3. Modelo de la Línea de Energía



**Fig. 4. Modelo de la línea de energía para flujos piroclásticos.**

modelo digital del terreno (DTM), que representa la superficie topográfica a lo largo de la cual los flujos gravitacionales se mueven. El código se basa en un modelo cinemático para el movimiento de cantidades o paquetes de material sobre una red triangular irregular TIN (*Triangular Irregular Network*) de elevaciones (como resultado de modificaciones al modelo de línea de energía). La información necesaria está dada por mapas topográficos del área bajo estudio y un conocimiento de la historia geológica del volcán. Estos datos incluyen el número, la localización y el tamaño de los diferentes tipos de flujos conducidos por gravedad que ocurrieron en el pasado. El código FLOW3D (SHERIDAN & KOVER 1997) provee velocidades de corrientes de partículas a lo largo de patrones de flujo en tres dimensiones. Múltiples patrones de flujo son incrementados cada 0,1 segundos a través de elementos triangulares con el uso de, por lo menos, tres parámetros para calcular la resistencia de cizalla ( $\tau_r$ ): fricción basal o resistencia de Coulomb ( $a_0$ ), viscosidad ( $a_1$ ) y turbulencia debida a la interface del flujo con la atmósfera ( $a_2$ ).

$$\tau_r = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 \quad (3)$$

donde  $a_0 = c + tg \Theta$ , siendo  $\Theta$  el ángulo de fricción interno y  $c$  la cohesión del flujo.

$$a_1 = k + \eta (dv/dy)$$

siendo  $k$  una constante,  $\eta$  la viscosidad del flujo y  $(dv/dy)$  el gradiente de deformación en el flujo debido a la viscosidad.

$$a_2 = -c_a (p_a/p) V^2 / (2D)$$

donde  $c_a$  es el coeficiente de arrastre para la atmósfera (0.1 - 1),  $p_a$  es la densidad de la atmósfera ( $1.0 \text{ Kg/m}^3$ ),  $p$  es la densidad del flujo piroclástico ( $1000\text{-}2000 \text{ Kg/m}^3$ ) y  $D$  es el espesor del flujo piroclástico durante su emplazamiento.

El término  $v$  corresponde a la velocidad inicial del flujo que para el caso de flujos piroclásticos producidos por el colapso de una columna de erupción, podrá ser determinado por la ecuación de velocidad para caída libre.

$$v = (2 g h)^{1/2} \quad (4)$$

siendo  $g$  la gravedad y  $h$  la altura de caída.

El algoritmo del flujo es una modificación de modelos para deslizamientos conducidos por gravedad; si se asume que la masa, el grosor y la densidad son constantes para el flujo, así como que futuros eventos serán similares a los ocurridos en el pasado, la aceleración debida a la gravedad está dada por un vector que es constante dentro de un triángulo determinado; esta aceleración es determinada una vez el programa corre y se usa dentro de los TIN; la magnitud de la aceleración ( $a_g$ ) está dada por la relación:

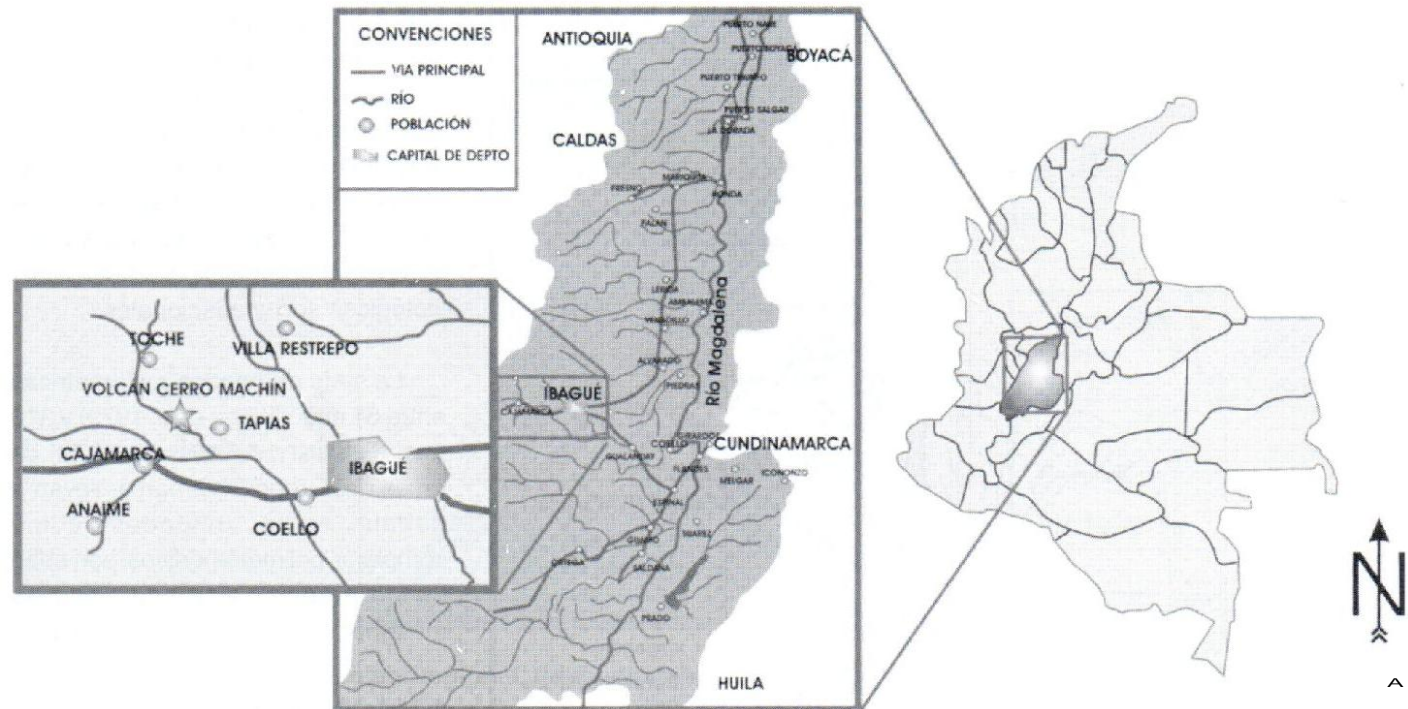
$$a_g = g \sin \Theta \quad (5)$$

donde  $\Theta$  es el ángulo de pendiente del triángulo en dirección al flujo.

El cambio instantáneo en la cantidad de movimiento de un elemento en la columna del flujo es:

$$d(Mv)/dt = Mg \sin \Theta - (a_0 + a_1 v + a_2 v^2) / p D \quad (6)$$





**Fig. 5. Mapa esquemático de localización del VCM**

donde  $M$  es la masa del flujo, y el producto entre la masa y la velocidad define la cantidad de movimiento transferido según la segunda ley de Newton.

Si la masa del elemento permanece constante, entonces la aceleración es:

$$dv/dt = g \sin \theta - (a_0 + a_1 v + a_2 v^2) / \rho D \quad (7)$$

Reemplazando por la ecuación (5) se tiene:

$$dv/dt = a_g - (a_0 + a_1 v + a_2 v^2) / \rho D \quad (8)$$

Esta ecuación es el resultado de modelos empíricos de resistencia al flujo con términos de pendientes  $v$  y  $v^2$ , para flujos o porciones de flujo donde el espesor permanece casi constante. Fue aplicada para hacer las simulaciones de flujos piroclásticos para las erupciones del Monte Santa Helena (McEWEN & MALIN 1989).

En el caso del código para el programa FLOW3D, la ecuación (8) cambia, ya que no se tiene en cuenta la densidad ni la profundidad del flujo para efectos de facilitar la simulación; además, para hacer simulaciones en volcanes cuyas erupciones no han sido observadas, es decir cuyos parámetros  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  no han podido ser calculados, es necesario conocer la dispersión general de los depósitos y las barreras topográficas que han sido superadas por los mismos con el fin de establecer la relación de  $H/L$  que es equivalente a la variable  $a_0$ ; en el caso de la variable  $a_1$ , esta es ajustada por ensayo y error

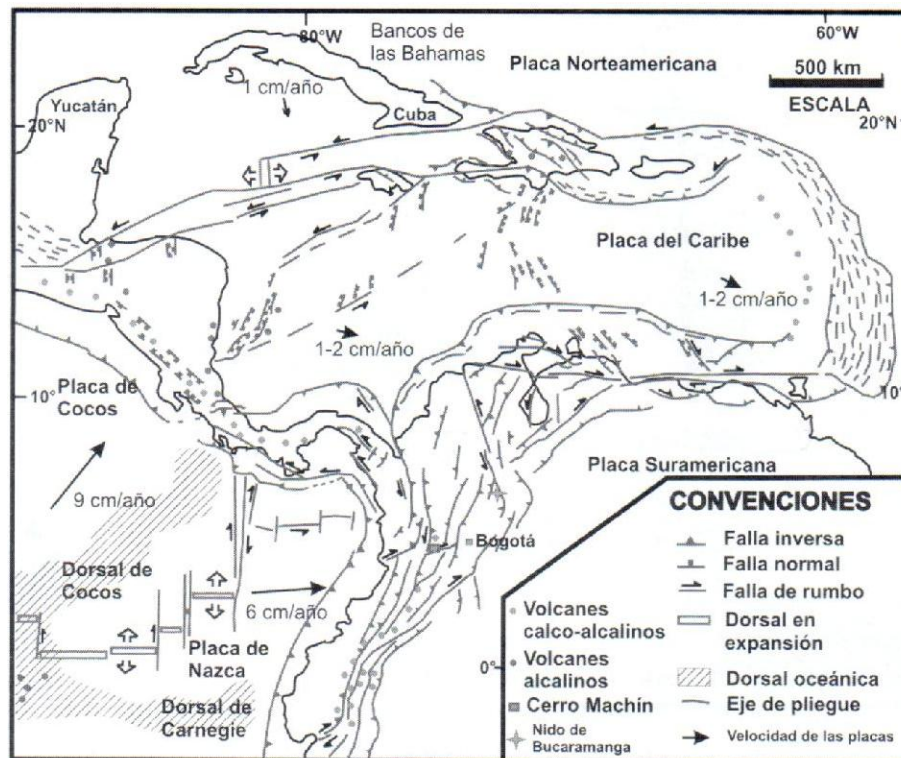
en los modelamientos; la variable  $a_2$  es tan pequeña en flujos piroclásticos que para la mayoría de modelamientos en estas condiciones se asume como igual a cero.

#### LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El VCM (o El Hoyo, como se conoce en algunos mapas topográficos) se localiza en el flanco oriental de la Cordillera Central de Colombia; específicamente en el departamento del Tolima (Fig. 5), 17 km al noroeste de la ciudad de Ibagué, 150 km al SW de la ciudad de Bogotá D.C. y 7 km al NE de la localidad de Cajamarca, entre las coordenadas planas  $X1 = 852.500$ ;  $Y1 = 986.000$  y  $X2 = 856.500$ ;  $Y2 = 990.000$  de la plancha topográfica 244-II-C del IGAC; la localización en coordenadas geográficas es de  $4^{\circ}29'N$  y  $75^{\circ}22'W$ ; su cúspide se encuentra a una altitud de 2.750 metros sobre el nivel del mar siendo así el volcán activo de Colombia con menor elevación.

#### MARCO GEOTECTÓNICO

El VCM fundó su edificio volcánico sobre rocas metamórficas del Grupo Cajamarca, que se hallan afectadas por fallamiento de dirección dominante NE y plegadas como respuesta a esfuerzos compresionales, transversales a la Cadena Andina (CEPEDA *et al.* 1995 y 1996). El origen del volcán es la respuesta a la interacción



**Fig. 6. Marco geotectónico de las placas de la region de los Andes del Norte y del Caribe, indicando los principales sistemas de fallas activas y volcanes (modificado de TABODA *et al.* 2000).**

entre las placas tectónicas de Suramérica y de Nazca (Fig. 6), que forman un borde convergente destructivo; la placa de Nazca subduce bajo la placa Suramericana.

El VCM se encuentra desplazado hacia el oriente de la cadena volcánica de la Cordillera Central en ese sector, debido a un control tectónico que establece su ubicación en el cruce de las fallas Machín y Cajamarca (Figs. 7 y 8) que presentan evidencias de movimiento durante el Pleistoceno - Holoceno (CEPEDA *et al.* 1995), con desplazamientos inversos y normales de hasta 5m en flujos de lodo en el sector del río Coello, Municipio de Coello al W de la localidad de Girardot y en flujos de pómez y ceniza, en los sectores río Bermellón - San Lorenzo Bajo, San Juan -Toche y camino Toche - La Playa.

## GEOLOGIA REGIONAL

El área de estudio del presente trabajo se localiza en la Cordillera

Central, la cual en el transepto Ibagué (Tolima) - La Línea (Quindío) está conformada por las siguientes formaciones geológicas (Fig. 7):

### 1. Neises y Anfibolitas de Tierradentro

Denominación utilizada por BARRERO & VESGA (1976) para describir una secuencia de neises cuarzo-feldespáticos, neises biotíticos, neises anfibólicos y anfibolitas que afloran al norte del departamento del Tolima.

VESGA & BARRERO (1978) mediante una datación de 1360Ma en una anfibolita cerca de Armero le asignan a estas rocas una edad Precámbrica.

### 2. Grupo Cajamarca

NELSON (1962) engloba dentro de este grupo a todas las rocas metamórficas que se encuentran

sobre la carretera que de Ibagué conduce a Armenia; MOSQUERA *et al.* (1982), utilizan esta denominación con algunas restricciones en cuanto a su litología y extensión geográfica, dividiendo esta unidad en esquistos negros, esquistos verdes, y cuarcitas; los contactos entre los diferentes tipos litológicos son gradacionales.

La serie de edades radiométricas entre 61 Ma (NUÑEZ *et al.* 1979) y 312 Ma (RESTREPO & Toussaint 1978) de rocas del Grupo Cajamarca, llevan a definir estas unidades como complejos polimetamórficos, con edad de formación y primer evento metamórfico no bien conocido aun.

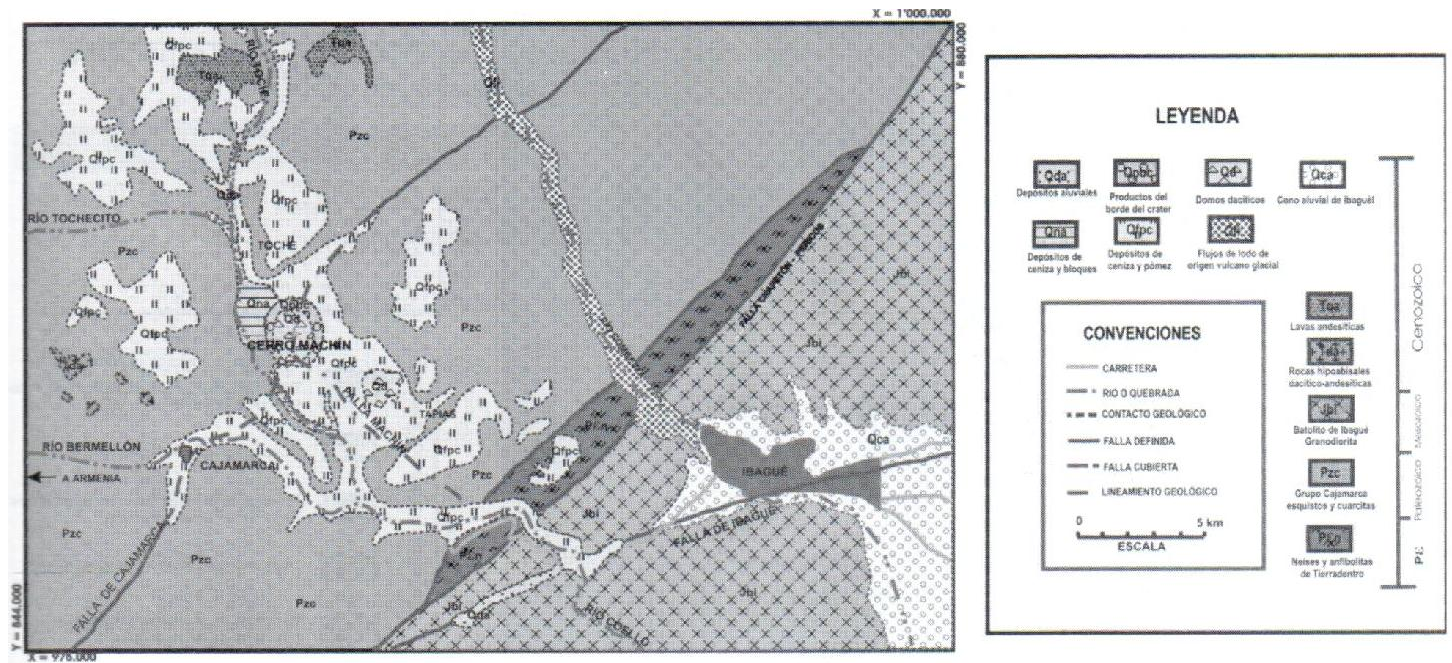
### 3. Batolito de Ibagué

En los alrededores de Ibagué, NELSON (1959) describía un cuerpo ígneo intrusivo, de composición granodiorítica, al que posteriormente le dio el nombre de Batolito de Ibagué. La roca predominante es una granodiorita con variaciones a tonalita y cuarzodiorita; el tamaño de grano varía entre media y grueso. La edad del batolito ha sido considerada Jurásico por NELSON (1962); posteriormente VESGA & BARRERO (1978) confirman esta edad con base en dataciones radiométricas por el método K/Ar en hornblenda y biotita, hechas a una cuarzodiorita al sur de Armero, las cuales dieron una edad de  $147 \pm 7$  Ma correspondiente al Jurásico Superior.

### 4. Rocas Hipoabisales

Se describen bajo esta denominación diques y cuerpos de rocas afaníticas - porfiríticas, de composición dacítica-andesítica. Estas manifestaciones ígneas son comunes al occidente de Cajamarca y noroccidente de Rovira; su tamaño rara vez supera los 4 km<sup>2</sup>; los diques presentan espesores entre pocos centímetros y 2 metros. Las edades





**Fig. 7. Mapa Geológico Regional, transecto Ibagué —La Línea (modificado de CEPEDA et al. 1995).**

radiométricas de pórfidos de la Cordillera Central dan cifras que corresponden al Terciario Medio y Superior (Irving 1971; Barrero y Vesga 1976; Gonzalez 1976).

### 5. Rocas Volcánicas

Se agrupan con este nombre los flujos de lava y las emisiones piroclásticas de los volcanes Tolima y Cerro Machín. La textura de las lavas es variable entre porfírica y afanítica. La plagioclasa varía entre andesina y labradorita; la hornblenda parda, la biotita y los orto y clinopiroxenos constituyen los fenocristales; la matriz está constituida por microlitos de plagioclasa y por vidrio. Las rocas dominantes son andesitas y basaltos hipersténicos y augíticos. Parte de la actividad volcánica formó una gran cantidad de piroclastos; este material está representado por flujos de ceniza y pómez, bloques y ceniza, y ocasionalmente bombas; la composición es intermedia (andesitas y dacitas). Las manifestaciones efusivas se iniciaron en el Mioceno y tuvieron su máximo desarrollo en el Cuaternario.

### 6. Depósitos Cuaternarios

Son depósitos sedimentarios de origen fluvial, glacial, coluvial o mixto, poco o nada litificados. La más extensa de estas acumulaciones corresponde al Abanico de Ibagué, descrito inicialmente por ETHERINGTON (1942) y BARRERO (1969). Los demás depósitos son de origen vulcanoglacial y aluviones. Los flujos de lodo provienen principalmente del Nevado del Tolima y del VCM; son acumulaciones de cantos de rocas volcánicas,

principalmente, que rellenan los valles de los ríos preexistentes. Los aluviones son comunes en todas las corrientes de agua que drenan la zona, su composición y espesor varían de acuerdo con la litología y el relieve del área drenada por cada corriente en particular. La edad de todos estos depósitos ha sido considerada como Cuaternario.

### GEOLOGÍA DEL VCM

El VCM se localiza en el eje de la Cordillera Central de Colombia y se encuentra emplazado en las rocas del Grupo Cajamarca que conforman el núcleo de la Cordillera Central en este sector. El volcán está compuesto por un sistema de domos rodeados por acumulaciones de material piroclástico (Fig. 8).

La depresión del cráter del VCM posee un diámetro de 2,4 km y se encuentra ocupada por domos dacíticos con actividad fumarólica (CEPEDA et al. 1995; CEPEDA & CORTES 1999). El volcán se encuentra activo y es altamente explosivo; presenta un VEI = 5, lo que lo coloca dentro de los volcanes de tipo Pliniano que se caracterizan por sus erupciones violentamente explosivos de rápida y continua emisión de un gran volumen de productos piroclásticos.

El registro geológico indica que la actividad del VCM se encuentra restringida a los últimos 45.000 años. Según CEPEDA et al. (1995), las evidencias de la actividad volcánica son: ocurrencia de actividad fumarólica, presencia de fuentes termales en y cerca al edificio volcánico, registros



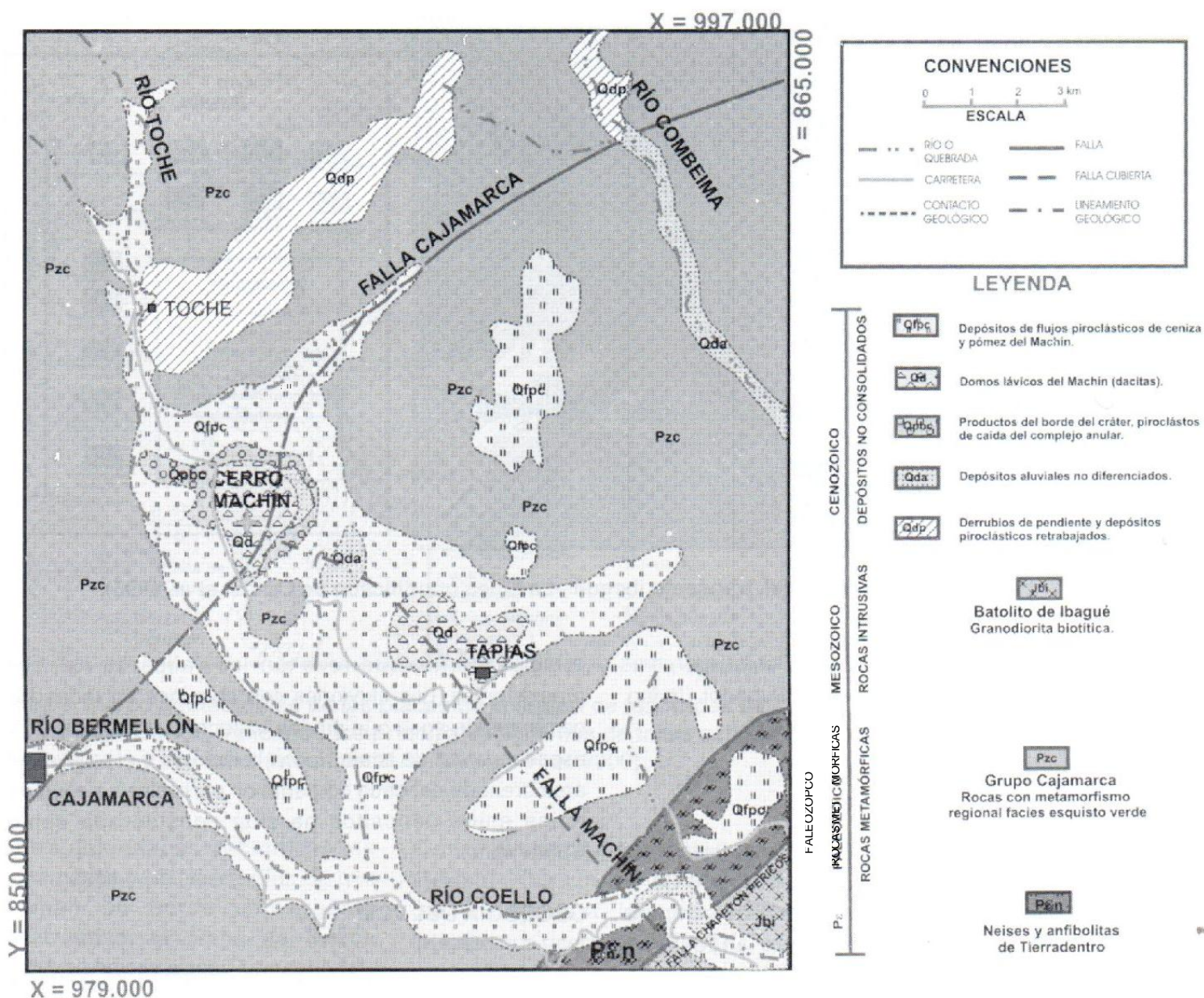


Fig. 8. Mapas de los depósitos del VCM (modificado de CEPEDA *et. al.* 1995).

instrumentales de actividad sísmica de origen volcánico y finalmente la edad de los productos volcánicos que restringe su actividad a los últimos 45.000 años.

A través de toda su actividad el VCM se ha comportado como un volcán tipo Pliniano; debido a esto presenta una amplia gama de productos de composición eminentemente dacítica, entre los cuales se destacan los flujos de lodo, las caídas de piroclastos y los flujos piroclásticos; para el presente artículo se hará énfasis en los flujos piroclásticos.

### 1. Flujos piroclásticos

Estos son de dos tipos: flujos de pómez y ceniza que fueron generados por el colapso de las columnas de erupción y flujos de bloques y ceniza que son el producto del colapso de domos. Los depósitos originados por el colapso de las columnas de erupción han podido alcanzar distancias cercanas a los 15 km en línea recta desde su fuente de origen, mientras que los generados por el colapso de domos se encuentran restringidos a las

partes proximales del edificio volcánico y la distancia recorrida por estos no supera los 5 Km. En cuanto a las edades de los distintos flujos piroclásticos se ubican entre los 45.000 y 800 años AP determinados por dataciones radiométricas de  $^{14}\text{C}$  (MENDEZ 1999, MENDEZ 2002 y MENDEZ comunicación verbal) (Tabla 1 y Fig. 9), pudiéndose distinguir siete (7) eventos eruptivos principales.

**Flujo Boquerón:** es un depósito de un flujo piroclástico de ceniza, pómez y líticos, masivo, muy compacto, de color gris, datado en  $45.000 \pm 2400$  años, el cual yace principalmente sobre un paleosuelo originado por la meteorización del Batolito de Ibagué y sobre las rocas que componen al Grupo Cajamarca. Es el evento de mayor magnitud ya que evidencias de campo indican que



**TABLA I**  
**Dataciones radiométricas  $^{14}\text{C}$  de madera carbonizada en los flujos**  
**piroclásticos del volcán Machín (MENDEZ 1999)**

EDAD	MUESTRA	LOCALIZACIÓN	REFERENCIAS
820 ± 100	GrN15740	Anillo piroclástico	Thouret y otros (1995)
1205 ± 185	LAM 2582	Camino Machín – Juntas	Cepeda y otros (1995)
2505 ± 135	JGP 6 - 01	Carretera Carmen de Bulira-Rovira	Méndez (1999)
2550 ± 70	RMM – 506 C	La Laguna VCM	Méndez (1999)
2805 ± 55	LAM 2587	Quebrada Santa Marta	Cepeda y otros (1995)
3475 ± 190		Camino Machín – Juntas	Cepeda y otros (1995)
3605 ± 315	HC – 89	Caserío Toche	Cepeda y otros (1995)
3670 ± 60	RMM – 14 A	San Lorenzo Alto	Méndez (1999)
3675 ± 35	GrN13509	Cajamarca	Thouret y otros (1995)
3675 ± 120		Los Tunjos RMM – 7 A	Méndez (1999)
3710 ± 50	RMM – 28 A	Los Tunjos	Méndez (1999)
3780 ± 95	GrN 5172	Chicoral	Thouret y otros (1995)
4420 ± 225	RMM – 38 A	Quebrada El Tigre	Méndez (1999)
4665 ± 70	HC 103B	Rio Anaime	Cepeda y otros (1995)
4710 ± 185	JGP – 02 - 2	Rio Anaime	Méndez (1999)
4740 ± 65	HC – 106	Camino Planadas	Cepeda y otros (1995)
4770 ± 60	HC – 91	Confluencia río Toche	Cepeda y otros (1995)
4820 ± 60	RMM – 06 E	Finca Luna Park – Anaime	Méndez (1999)
4855 ± 65	JGP – 02 - 7	Rio Anaime	Méndez (1999)
4860 ± 60	HC – 94	Camino Machín – Toche	Cepeda y otros (1995)
4895 ± 55	RMM- 11 A	Camino Planadas - San Lorenzo	Méndez (1999)
4960 ± 60	RMM - 17 A	8.2 Km Cajamarca - San Lorenzo	Méndez (1999)
4980 ± 25	GrN15737	Cajamarca	Thouret y otros (1995)
4960 ± 160	RM – 424	Quebrada Santa Marta	Cepeda y otros (1995)
5055 ± 60	RMM – 12 A	Camino Planadas - San Lorenzo	Méndez (1999)
5100 ± 110	RM- 474	Quebrada El Espartillal	Cepeda y otros (1995)
5120 ± 125	RMM - 22 A	Carretera San Lorenzo	Méndez (1999)
45000 ± 2400	RMM - 09 A	Boquerón	Méndez (1999)

probablemente llegó a afectar el área donde se ubica actualmente la ciudad de Ibagué.

Flujo El Espartillal: corresponde a una secuencia de depósitos de oleadas y flujos piroclásticos de ceniza y pómez, originados en una erupción que ocurría hace 5100 años ± 110 años y los cuales están principalmente localizados y datados en la quebrada El Espartillal, afluente

del río Anaime, a unos 2 km al sur de la población de Cajamarca y en los alrededores de la vereda San Lorenzo Baja. Los eventos que generaron estos depósitos fueron producto de la actividad volcánica explosiva del VCM en la cual se genera una columna de erupción de tipo Pliniano, la cual colapsa, originando así flujos piroclásticos los cuales se movilizan siguiendo los cauces de los ríos aledaños al edificio volcánico.

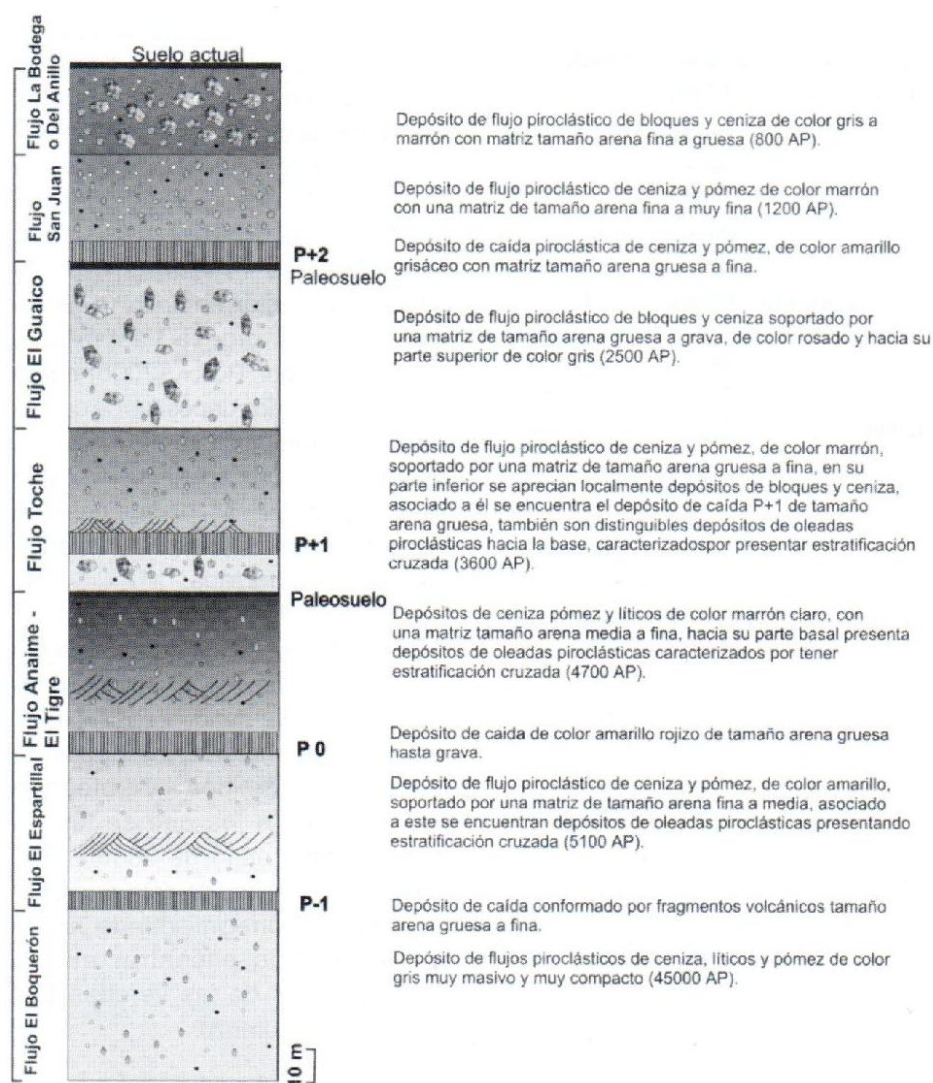
Flujo Anaime - El Tigre: se trata de una serie de depósitos de flujos de ceniza, pómez y líticos, los cuales rellenaron los cauces de los ríos Toche, Bermellón, Anaime y las quebradas La Cerrejosa y El Tigre. Se le ha asignado una edad de 4700 ± 185 años. Asociado a él se encuentra un depósito de caída de color amarillo rojizo de tamaño arena gruesa hasta grava denominado por RUEDA (2000) como P0. Además de los depósitos de ceniza y pómez y del depósito de caída PO, se encuentran presentes depósitos de oleadas piroclásticas, de composición dacítica, caracterizados por presentar estratificación cruzada.

Flujo Toche: recibe su nombre del corregimiento de Toche, Municipio de Ibagué. En él se pueden observar los depósitos de una serie de pulsos de flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas, a los que se les ha asignado una edad de 3600 ± 315 años. Los depósitos de esta erupción, edemas del Corregimiento de Toche, se han podido encontrar en las inmediaciones de las veredas Los Tunjos y San Lorenzo.

Flujo El Guaico: es un depósito localizado al Sureste del VCM, y corresponde a una erupción que ocurrió hace 2550 ± 70 años. Es un depósito masivo, con estratificación cruzada, soportado por una matriz de tamaño arena gruesa a grave, de color rosado y hacia su parte superior de color gris.

Flujo San Juan: su principal afloramiento este localizado en las inmediaciones de la quebrada San Juan, al Oeste del VCM, rellenando el cauce de la quebrada que lleva su nombre y parcialmente el del río Toche. Es masivo, matriz soportado, compuesto por una matriz tamaño arena fina a muy fina y el cual ha sido datado obteniéndose una edad de 1205 ± 185 años.

Flujo La Bodega: se ha denominado con este nombre a una erupción



**Fig. 9. Columna estratigráfica generalizada sin escala de los flujos piroclásticos emitidos por el VCM (Modificada de PINILLA & PINO 2002)**

datada por THOURET *et al.* (1995) en  $820 \pm 110$  años. Sus depósitos se encuentran ubicados en el borde Suroccidental del anillo piroclástico del VCM; se trate de un flujo de bloques y ceniza de color gris; se pueden apreciar fragmentos en una matriz de tamaño arena fina a muy gruesa.

## 2. Flujos de Lodo

Los flujos de lodo asociados a la actividad del VCM se movilizaron siguiendo en primera instancia el cauce del río Coello y, posteriormente, el del río Magdalena. CORTÉS (2001) hace relación de seis depósitos de flujos de lodo asociados a seis eventos

de magnitud considerable, de los cuales cuatro dejaron depósitos de flujos de lado hiperconcentrados (= flujos de sedimento y agua que se mueven bajo la fuerza de gravedad, que ocurren como eventos de alta descarga y tienen 25—40 % de su volumen en agua) y los otros dos corresponden a depósitos de flujos de escombros (= measas coherentes saturadas en agua, con escombros de roca que fluyen bajo la fuerza de la gravedad en una forma predominantemente laminar, con un porcentaje en peso de 10 a 25 % en agua). CORTÉS (2001) llama a estas unidades de flujo, de manera informal, depósitos de flujo hiperconcentrado de Coello (DFHC<sub>3</sub>),

Guamo (DFHC<sub>2</sub>), Espinal (DFHC<sub>1</sub>) y Chaguala (DFHC<sub>0</sub>) y depósitos de flujos de escombros de Chicoral (DFD<sub>2</sub>) y del Carmen (DFD<sub>1</sub>); la acumulación de los flujos de lodo, especialmente la de los tres más antiguos, según CORTÉS (2001), fue controlada por la topografía. Las unidades que se observan se caracterizan por formar grandes planicies como las pertenecientes a los abanicos de Espinal, Gualanday y Guamo.

## 3. Depósitos de Caída de Piroclastos

Es muy poco el material de caída de piroclastos encontrado en los alrededores del VCM, debido quizás a las altas pendientes del edificio volcánico que favorecen una erosión rápida e impiden la depositación. Algunos bloques pumíticos, de proyección balística se encuentran en un área de 5 km de diámetro alrededor del volcán, especialmente en el camino Finca Machín — Toche.

Durante las erupciones del VCM, los vientos han tenido una dirección predominante hacia el occidente, lo cual ha permitido la dispersión de los piroclastos emitidos en cada erupción. En la carretera Cajamarca - La Línea - Calarcá pueden observarse depósitos de caída de piroclastos, tamaño lapilli y ceniza, conformados por material pumáceo, predominantemente, y por fragmentos líticos. No se tienen dataciones radiométricas para hablar de las edades de las diferentes emisiones de piroclastos, sin embargo, según THOURET *et al.* (1985), algunos flujos de ceniza y pumita tienen una edad de  $3.475 \pm 190$  años AP.

Según RUEDA (2000), basándose en secciones estratigráficas y análisis sedimentológicos, se logró identificar cuatro unidades de depósitos Plinianos de caída de piroclastos que fueron denominados P-1, P0, P1 y P2.



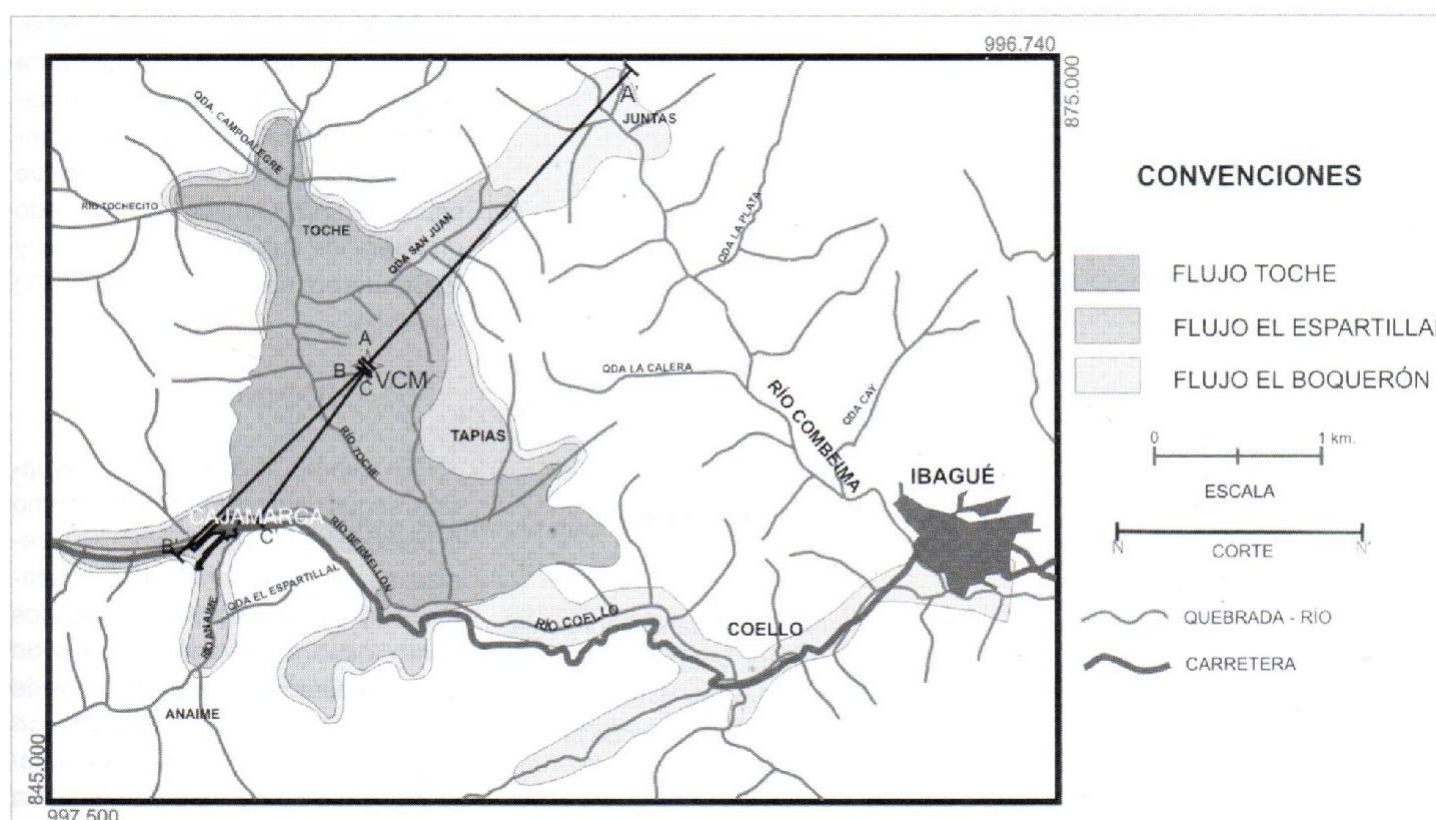


Fig. 10. Mapa de dispersión de los flujos piroclásticos: El Boquerón, El Espartillal y Toche

#### DETERMINACION DE PARAMETROS PARA EL MODELAMIENTO

Se hará énfasis en los flujos piroclásticos de El Boquerón, El Espartillal y Toche, con el fin de establecer los parámetros necesarios para realizar el modelamiento asistido por computador para los flujos piroclásticos que pueden ser generados durante una eventual erupción del VCM; para esto se realizaron perfiles con base en el mapa de dispersiones para estos flujos (Fig.10).

##### 1. Flujo piroclástico El Boquerón

Es el más grande de todos los flujos piroclásticos dejados por el VCM, ya que alcanza al sitio donde actualmente está localizada la ciudad de Ibagué; es posible observar parte de los depósitos en el sector de la quebrada Altamira, lo cual indica que para llegar hasta ese punto, los flujos piroclásticos emitidos durante el evento de El Boquerón, debieron haber superado un alto topográfico denominado Alto La Sierra, hacia el costado nororiental del volcán, llegando hasta el valle del río Combeima, recorriendo una distancia horizontal máxima de aproximadamente 25 Km. Se trata del primer evento eruptivo del VCM ocurrido hace aproximadamente 45.000  $\pm$  2400 años; es un flujo piroclástico generado por el colapso de una columna de erupción, en donde se pueden apreciar fragmentos de pómez, líticos y ceniza.

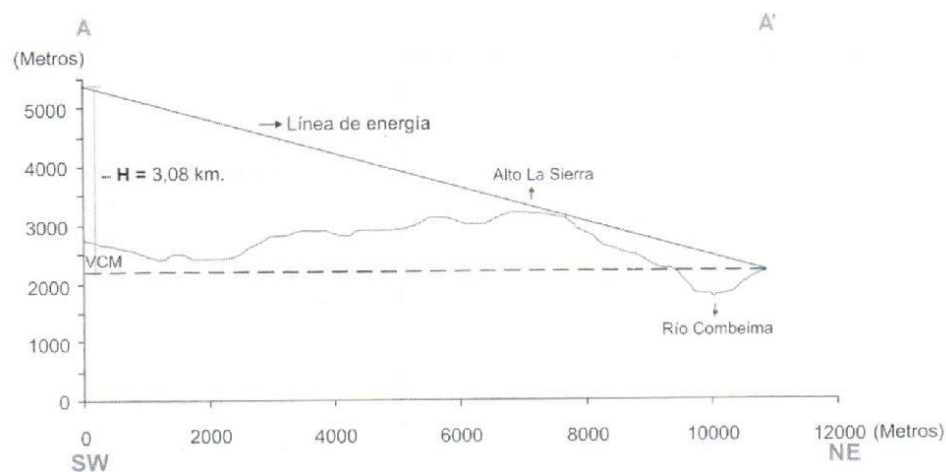
Para efectos de la simulación se realizó un corte teniendo en cuenta la distribución especial de los celositos de El Boquerón. Por medio del corte y de la Línea de energía se pudo estimar la relación de  $H/L$  que tendría un flujo piroclástico de características similares al de El Boquerón. Una vez determinado el valor de  $H$  y de  $L$  se realizó el cálculo de la relación de  $H/L$  (Ecuación 1):

$$H/L = 3,08\text{Km} / 26,03\text{Km} = 0,1182$$

Para determinar esta relación se tomó como  $H$  la distancia dada en el corte (Fig. 11), ya que se supera el mayor alto topográfico, el cual está dado por el Alto La Sierra; para un flujo piroclástico similar al de El Boquerón la relación  $H/L$  es de 0.1182, siendo así un flujo muy móvil si se tiene en cuenta que un valor  $<0,6$  corresponde a un flujo extremadamente móvil, según Hsü (1975).

##### 2. Flujo piroclástico El Espartillal

Se trata de un flujo de ceniza y pómez generado por el colapso de una columna de erupción, presentando en algunos sectores, hacia la base del depósito, secuencias de oleadas piroclásticas relacionadas con el mismo flujo piroclástico (Fig. 9); estas unidades de oleadas precederían al flujo de manera que quedan depositadas antes del mismo, ubicándose de este modo como unidades hacia la base de la secuencia del flujo. Las dataciones



**Fig. 11. Perfil de la línea de energía para el flujo El Boquerón**

hechas por el método de  $^{14}\text{C}$  dan una edad de  $5100 \pm 110$  años (Tabla 1); aunque alcanza una menor extensión que el flujo El Boquerón, de igual manera que este, cubrió el área donde actualmente se encuentra la localidad de Cajamarca, logrando superar el alto topográfico de la Cuchilla de San Lorenzo; evidencia de su paso por este sector son los depósitos dejados a la altura de la quebrada El Espartillal; sus depósitos están localizados a lo largo de los ríos Anaime y Bermellón y en la quebrada El Espartillal, hacia el suroccidente del edificio volcánico, así como en los valles del río Toche y la quebrada San Juan, al norte y al noreste del VCM respectivamente; en algunos sectores el depósito alcanza espesores de hasta 40m y a la altura de la quebrada El Espartillal, ubicada a 10 Km al suroeste del edificio volcánico, se pueden apreciar fragmentos de madera carbonizada de gran tamaño, lo cual es evidencia de las altas temperaturas que pudo alcanzar el o los flujos piroclásticos; estas temperaturas tuvieron que ser superiores a los  $300^\circ\text{C}$  para lograr la carbonización total de la madera.

El parámetro H para el flujo de El Espartillal se calculó de igual manera que para el flujo de El Boquerón; como resultado se tiene una altura de 1,09 km (Fig. 12).

En cuanto a la distancia horizontal máxima recorrida, esta tiene un valor de 10,7 km; utilizando la Ecuación 1, se pudo determinar el valor de la relación H/L de la siguiente manera:

$$H/L = 1,09\text{km} / 10,7\text{km} = 0,1022$$

### 3. Flujo piroclástico Toche

Se trata de un flujo piroclástico de ceniza y pómez generado por el colapso de una columna de erupción, encontrándose hacia la base un depósito de flujo de bloques y ceniza, lo cual indicaría un emplazamiento al inicio del evento eruptivo y el colapso de los mismos, similar a lo ocurrido en los volcanes El Chichón en México en 1982 y Pinatubo en Filipinas en 1991 (PINILLA & PINO 2002). La edad del depósito por el método de  $^{14}\text{C}$  es de  $3600 \pm 315$  años. En algunos sectores pueden ser apreciados depósitos de caída conocidos bajo el nombre de nivel P+1, los cuales fueron el producto de una columna de erupción Pliniana con una altura entre 36 y 39 Km (RUEDA 2000); sobre estos depósitos se encuentran las oleadas piroclásticas relacionadas con los flujos de ceniza y pómez que corresponderían al evento de colapso de la columna de erupción; al igual que los eventos anteriores, los flujos lograron superar el alto de la Cuchilla de San Lorenzo, alcanzando en algunos sectores espesores de hasta 100 m.

El valor de H para un flujo de similares características que se diera con la topografía actual, fue estimado en 1,406 km (Fig. 13). La distancia máxima recorrida por el flujo fue estimada en 7,7 km; del mismo modo que para los flujos de El Espartillal y El Boquerón, usando la ecuación (1) tenemos:

$$H/L = 1,406\text{km} / 6,7\text{km} = 0.1826$$

En cuanto al escenario de erupción, según datos estratigráficos, como la presencia de flujos de bloques y ceniza, se puede evidenciar el emplazamiento y colapso de domos dacíticos como inicio del evento eruptivo de Toche generando así los depósitos de flujos de bloques y ceniza; posteriormente se generó la columna de erupción que dio lugar al depósito de caída P+1 y a los depósitos de ceniza y pómez (PINILLA & PINO 2002 y DOMINGUEZ 2003).

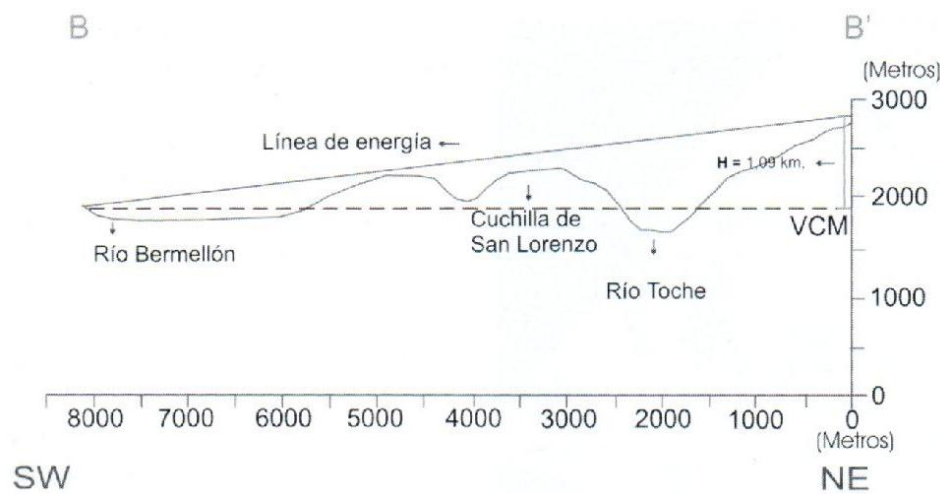
### MODELAMIENTO DE FLUJOS PIROCLASTICOS UTILIZANDO EL PROGRAMA FLOW3D (SHERIDAN & KOVER 1997)

Como primer paso se realizó la digitalización de la zona de estudio con base en la plancha 244 del IGAC a una escala 1:100.000. Para esta digitalización se empleó el programa de uso público LISA; como producto final se obtuvo el DTM (modelo digital del terreno, Fig. 14); los datos de este DTM fueron exportados a un formato DXF. Utilizando el archivo DXF se procesó en el programa FLOW3D para convertirlo en un archivo XYZ.

Una vez los datos se dejaron en un formato XYZ, se procedió a cargarlos en el programa FLOW3D.

El programa FLOW3D, al recibir los datos del DTM en el formato XYZ, los cambia a un formato TIN (<<Triangular Irregular Network>>), como se mencionó en un apartado anterior. La Fig. 15





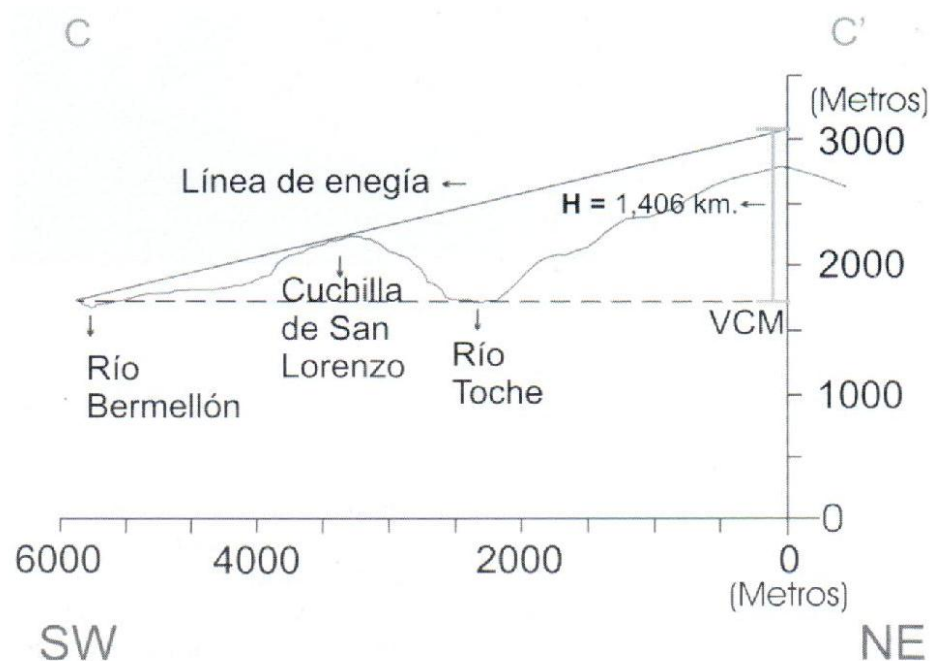
**Fig. 12. Perfil de la línea de energía para el flujo El Espartillal**

ilustra el TIN para el modelo digital del terreno del VCM; sobre esta serie de triángulos es donde el programa efectúa la simulación, ya que son estos triángulos la representación de la superficie topográfica sobre la cual se mueven los flujos gravitacionales; un TIN es un buen tipo de representación de este modelo por las siguientes razones: los triángulos son contiguos y no se presentan discontinuidades, los cálculos dentro de los triángulos son sencillos ya que se asumen variaciones lineales y la topografía puede ser mostrada como una red.

Una vez cargado el TIN, se procedió a incorporar al modelo los parámetros ya calculados para  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y velocidad inicial; como en el caso del VCM no se tienen erupciones que hayan sido observadas y por lo tanto medidas, el valor de  $a_0$  no puede ser determinado por ensayos sino por analogía con la relación  $H/L$  ya que tanto  $a_0$  como  $H/L$  son equivalentes. Para el VCM se encontraron valores de 0.1022, 0.1182 y 0.1826 para flujos producidos por el colapso de una columna de erupción y se tomaron valores de 0,25 para el caso de los flujos producidos por el colapso de domos (Sheridan 2002, comunicación verbal); estos valores fueron incorporados al programa para efectuar las simulaciones. Para determinar el coeficiente de viscosidad ( $a_7$ ) se hicieron múltiples

ensayos hasta encontrar el valor que más se ajustara a los patrones de los depósitos dejados en erupciones anteriores; en este caso se encontraron los mejores resultados para valores de  $a_1 = 0,01$ ; para la variable  $a_2$  se tomó un valor de 0, ya que esta variable se encuentra asociada a la turbulencia generada por la interacción del flujo piroclástico con la atmósfera circundante cuyos valores son muy pequeños; y para el caso de los flujos piroclásticos este parámetro se puede obviar como se mencionó anteriormente.

Los modelos realizados son de tipo



**Fig. 13. Perfil de la línea de energía para el flujo Toche**

En cuanto a la velocidad inicial de los flujos, para efectos del modelamiento, se tomaron valores de 150 m/s, 120 m/s, 100 m/s que corresponden a alturas de colapso de 1150, 735 y 510 metros respectivamente.

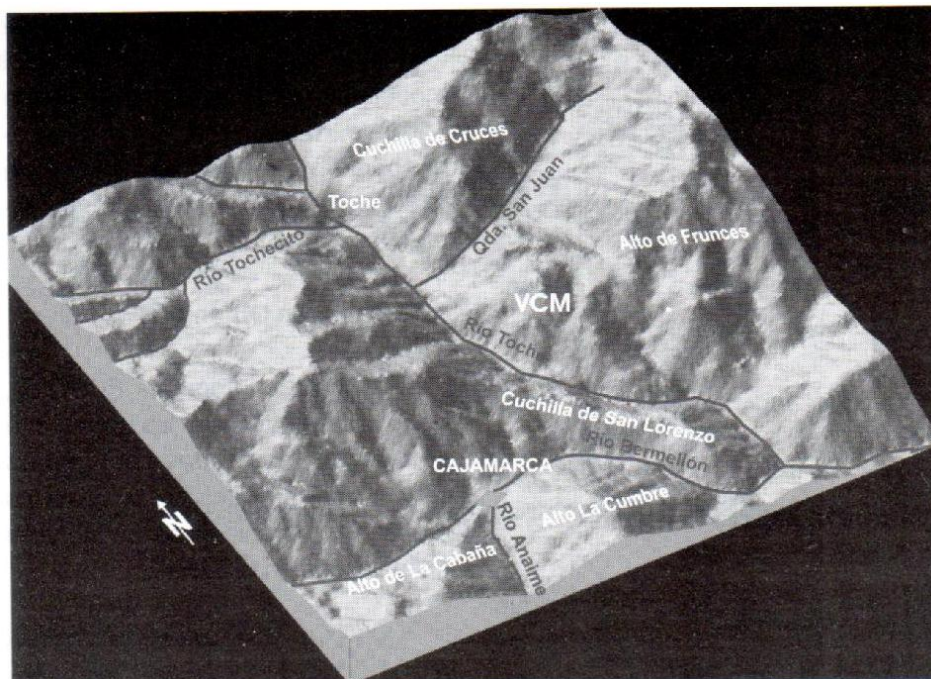
## 1. Resultados Obtenidos

Utilizando el programa FLOW3D, fue posible establecer las zonas que se verán afectadas por flujos piroclásticos emitidos por el VCM; los resultados obtenidos se encuentran relacionados en la Tabla 2.

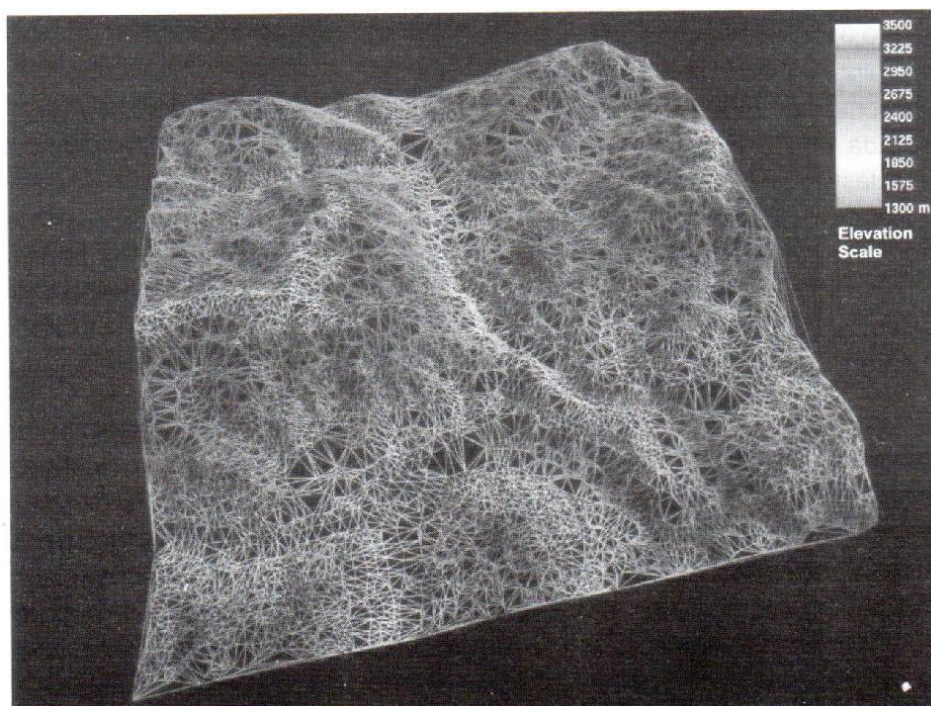
radial, el número de flujos simulados es de 250, el radio del cráter es de 600 metros y la localización es 854484 Este y 988031 Norte.

En los modelos FLOW3D realizados utilizando el método del bloque deslizante, los grupos de vectores que representan el flujo se aceleran o desaceleran dependiendo de la pendiente del terreno, las velocidades iniciales de flujo, así como por la intervención de los parámetros de flujo





**Fig. 14. Modelo digital del terreno del area de estudio.**



**Fig. 15. TIN para el área de estudio del VCM**

$a_1$  y  $a_2$ . Los ángulos locales de las pendientes son establecidos para el TIN; tanto la dirección de los vectores como las velocidades son calculadas en incrementos de tiempo de 0.1 segundos, donde la aceleración por la gravedad y la desaceleración por fricción y viscosidad, son tenidas en cuenta. La relación  $H/L$  para los modelos de flujo fue estimada a partir de los perfiles de la línea de energía. La cinética de los vectores de flujo fue ajustada a partir

de ensayo y error usando diferentes combinaciones de las variables, determinando así la combinación que más se ajustara al comportamiento que ha tenido el volcán a través de toda su actividad, manifestada por el registro litológico dejado por cada flujo piroclástico.

Con relación a los modelos realizados por el método del bloque deslizante, se observe que se tienen los mayores alcances de flujo para los

modelos 1 a 8 (Lamina 1 Figs. A a H), los cuales se simularon con velocidades iniciales desde 150 hasta 100 m/s y con valores de  $a_0$  de 0.1022, 0.1182 y 0.1826 respectivamente; esto representaría eventos eruptivos fuertes, similares a los ocurridos para los depósitos de El Espartillar, El Boquerón y Toche. Se encontró que a velocidades iniciales de 150 a 120 m/s se tienen flujos piroclásticos capaces de llegar al área donde se localiza en la actualidad la localidad de Cajamarca. Según estos modelos, los flujos piroclásticos son capaces de superar el alto de la Cuchilla de San Lorenzo, teniendo en cuenta la morfología actual del terreno, de manera similar a como lo han hecho los flujos piroclásticos en el pasado; para erupciones con velocidades iniciales menores, se observe que no tendrían la energía suficiente como para afectar a Cajamarca. En el caso de la simulación realizada para flujos piroclásticos generados por el colapso de domos (modelo 9, Lamina 1 Fig. I), se utilizaron valores de velocidad inicial iguales a cero, con lo que se asume que el colapso se dará de manera gravitacional, durante el emplazamiento de los domos, sin la intervención de ningún otro factor que pueda imprimir una componente de aceleración al flujo piroclástico.

Cabe anotar que para las simulaciones se tiene en mente solo la topografía actual sin alteración en sus condiciones. No debe olvidarse que cuando ocurran las futuras erupciones, que produzcan flujos piroclásticos como los esperados, la topografía ya habrá sido alterada por erupciones previas y el cauce del río Toche podrá estar parcialmente relleno. Esto implicaría que flujos piroclásticos con velocidades iniciales menores a las modeladas podrían superar el alto topográfico de la Cuchilla de San Lorenzo.



**TABLA 2**  
**Datos de modelamiento con el programa FLOW3D**

Modelo	Vi m/s	$a_0$	$a_1$	$a_2$	Figura
1	150	0.1022	0.01	0	A lámina 1
2	150	0.1182	0.01	0	B lámina 1
3	150	0.1826	0.01	0	C lámina 1
4	120	0.1022	0.01	0	D lámina 1
5	120	0.1182	0.01	0	E lámina 1
6	120	0.1826	0.01	0	F lámina 1
7	100	0.1022	0.01	0	G lámina 1
8	-100	0.1826	0.01	0	H lámina 1
9	0	0.25	0.01	0	I lámina 1

### CONCLUSIONES

- Según los modelos efectuados por el método del bloque deslizante se necesitarían velocidades iniciales para los flujos piroclásticos de 120 m/s para que la localidad de Cajamarca fuese afectada durante la materialización de un evento eruptivo; esto implicaría una altura para la zona de colapso de 735 m. El valor de la relación implica que los flujos piroclásticos emitidos por el VCM presentan una alta movilidad; esta es la razón fundamental por la cual ha sido posible que dichos flujos superen con facilidad el alto topográfico de la Cuchilla de San Lorenzo y de igual manera en erupciones futuras, dicho alto topográfico sea superado nuevamente.
- Para unas velocidades iniciales de 120 a 150 m/s, los flujos piroclásticos, después de superar a la Cuchilla de San Lorenzo, llegarían a la localidad de Cajamarca con unas velocidades de 25 a 75 m/s; se estaría hablando de velocidades que oscilarían entre 90 y 270 km/h. De ser afectada Cajamarca por estos flujos piroclásticos y con estas velocidades, destruirían prácticamente todo lo que hubiera a su paso; la probabilidad de que cualquier forma de vida sobreviviera a su impacto es prácticamente nula, los efectos de contusión, impacto de material en suspensión, sofocación o calor intenso, individualmente o combinados serían mortales. Los efectos sobre edificaciones y estructuras serían igualmente devastadores; de esta manera todo lo que se encontrara en el paso directo de los flujos sería destruido y sepultado. Los flujos piroclásticos podrían además remover todo tipo de vegetación que se halle en las inmediaciones del volcán, derribando grandes árboles desde su raíz (este tipo de efectos pudo ser observado en las erupciones del Monte Santa Helena en 1980 con unas velocidades de flujo similares a las modeladas en el presente trabajo).
- Según los modelamientos realizados, las localidades que pueden ser potencialmente afectadas por flujos piroclásticos emitidos por el VCM corresponden a Cajamarca, Toche y Tapias, así como las veredas que se encuentran en las inmediaciones del edificio volcánico, estos seguirían principalmente los valles de los ríos Tohecito, Toche, Bermellón, Anaime y Coello, así como la quebrada San Juan.
- En el caso de flujos producidos por el colapso de domos, las zonas afectadas estarían restringidas a las inmediaciones del edificio volcánico y según los modelos realizados, se localizarían preferencialmente hacia el flanco SW del edificio volcánico, represando así el valle, del río Toche.
- Según la composición dacítica del VCM la cual se ha mantenido constante a través de todos los eventos eruptivos se puede concluir que el modelo presenta una mayor confiabilidad con respecto a simulaciones hechas en otros volcanes en el mundo para los cuales se han presentado variaciones composicionales en sus productos durante toda su actividad.

### RECOMENDACIONES

Los modelamientos se pueden mejorar empleando una base topográfica a mayor escala, ya que, en el presente trabajo se empleó una base topográfica 1:100.000, debido a que las planchas 1:25.000 244 I B y II A del IGAC presentan errores de cartografía y no empatan, lo cual altera el resultado del DTM afectando considerablemente el modelo generado por el programa FLOW3D.

El Modelo FLOW3D ha demostrado ser viable en el estudio de volcanes en todo el mundo; como se evidencia

en este trabajo, se recomienda que se utilice este modelo para realizar análisis de otros volcanes en Colombia, como soporte en la evaluación de la amenaza volcánica.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar sus agradecimientos al geólogo y vulcanólogo Michael Sheridan por haber facilitado el programa FLOW3D así como por todos los comentarios y la ayuda prestada en los modelamientos realizados para el VCM; al ingeniero geólogo Ricardo Méndez y a los geólogos Marta Calvache, Gloria Cortes, Margareth Mercado y Bernardo Purgarín (INGEOMINAS); a los geólogos Isaac Farraz y Hugo Delgado de la UNAM por todas las recomendaciones con respecto a los modelamientos realizados para el VCM. A los ingenieros Sloan Moreno, Jean Pierre Charalambos y Manuel Forero del Laboratorio de Geomática y Computación Gráfica de la Universidad Nacional de Colombia por toda la asesoría prestada en el manejo de las estaciones de trabajo así como en el proceso de instalación y ejecución del programa FLOW3D. Finalmente y de manera muy especial a Lucía Domínguez por todos sus comentarios y recomendaciones así como por su valiosa amistad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRERO, D. (1969): Petrografía del Stock de Payandé y metamorfitas asociadas.- Bol. Geol., 17 (1-3):113-114. Bogotá.
- BARRERO, D. & VESGA, C. J. (1976): Mapa Geológico del Cuadrángulo K-9 y mitad sur del J-9.- Dirección Regional, INGEOMINAS, Ibagué.
- CEPEDA, H. *et al.* (1995): Volcán Cerro Machín, Departamento del Tolima, Colombia: Pasado, Presente y Futuro.- INGEOMINAS, Informe interno.
- CEPEDA, H. *et al.* (1996): Actividad eruptiva del volcán Machín. Cordillera Central de Colombia.- Memorias VII Congreso Colombiano de Geología, INGEOMINAS.
- CEPEDA, H. & CORTES, G. P. (1999): El Cerro Machín, un volcán holocénico explosivo en el centro de Colombia.- IV Reunión Técnica de la Comisión de Geofísica. Departamento de Geodesia y Topografía, Tucumán-Argentina.
- CORTES, G. P. (2001): Lahares asociados a la actividad eruptiva del VCM, Colombia.- Memorias VIII Congreso Colombiano de Geología, INGEOMINAS.
- DOMINGUEZ B, L. (2003): Caracterización petrográfica de los depósitos piroclásticos asociados a la erupción ocurrida hace 3600 años en el volcán Cerro Machín. Mecanismo eruptivo, transporte y sedimentación (Trabajo de grado).- Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C.
- ETHERINGTON, T. J. (1942): Distribución geográfica de la Formación Gualí (Pleistoceno) en una parte del valle del alto Magdalena.- Inst. Geol. Petr. Est. T 4: 3-9.
- GONZALEZ, H. (1976): Geología del Cuadrángulo J-8. Inf. 1704.- Dirección Regional, Medellín, INGEOMINAS, 421 p.
- HEIM, A. (1932): Der Bergsturz von Elm. Deutsch. Geol. Gesell. Zeitschr.
- HSU, K. J. (1975): Catastrophic debris stream (Sturzstroms) generated by rockfalls.- Geological Society of America Bulletin, v. 86, p. 129-140.
- IRVING, E. M. (1971): La evolución estructural de los Andes más septentrionales de Colombia.- Bol. Geol., Bogotá, 19 (2): 90 p.
- MALIN, M. C. & SHERIDAN, M. F. (1982): Computer assisted mapping of pyroclastic Surges.- Science 217.
- McEWEN, A.S. & MALIN, M. C. (1989): Dynamics of Mount St Helens 1980 pyroclastic flows, rockslide avalanche, lahars, and blast.- J. Volcano I. Res., 37:205-231.
- MENDEZ, R. A. (1999): Modelo eruptivo del VCM, flujos piroclásticos.- INGEOMINAS, Informe interno, inédito. Manizales.
- \_\_\_\_\_ (2001): Informe sobre la Geología y Estratigrafía de Flujos Piroclásticos Asociados al VCM.- INGEOMINAS, Informe interno, inédito. Manizales. 35 p.
- \_\_\_\_\_ (2002): Mapa Geológico de flujos piroclásticos VCM, Proyecto AG2-3.- INGEOMINAS, Centro Operativo Regional, Manizales.
- MOSQUERA, D. *et al.* (1982): Mapa Geológico del cuadrángulo K-8, Manizales, escala 1:100.000, INGEOMINAS.
- NELSON, W. N. (1959): Contribution to the geology of the Central and Western Cordilleras of Colombia in the sector between Ibagué and Cali.- Leidsche. Geol. Medel., Leiden, 22:1-75.
- \_\_\_\_\_ (1962): Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia. Sección Ibagué y Armenia.- Boletín Geológico, 10 (1-3): 161-202, Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
- NUÑEZ, A. *et al.* (1979): Nuevas edades radiométricas K/Ar de los esquistos verdes del Grupo Cajamarca.- Pub. Esp. Geol., Medellín, 23: 8 p.
- PINILLA H, E. & PINO A, D. H. (2002): Caracterización del depósito de flujo piroclástico en el sector de Los Tunjos. Municipio de Cajamarca (Tolima) (Trabajo de grado).- Universidad de Caldas, Manizales.
- RESTREPO, J. J. & TOUSSAINT, J. F. (1978): Datación de una metadiabasa del Grupo Cajamarca.- Pub. Esp. Geol., Medellín, 16: 3 p.
- RUEDA, H. (2000): Depósitos de caída piroclástica asociados a la actividad del VCM, Caracterización y evaluación de su amenaza potencial (Trabajo de Grado).- Universidad de Caldas, Manizales.
- SHERIDAN, M. F. (1979): Emplacement of pyroclastic flows — A review.- Chapin CE, Elston WE, editors. *Ash Flow Tuffs*. P 125-136, Geol. Soc. Amer. Special Paper 180.
- SHERIDAN, M.F. & KOVER, T. (1997): FLOW3D: A computer code for simulating rapid, open-channel volcanic flows.- P. 155-163.



- Proc. UJST workshop on the Technology of Disaster Prevention against Local Severe Storms, Norman, OK.
- TABOADA, A. *et al.* (2002): Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia).- *Tectonics*. vol. 19, N°5, p. 788.
- THOURET, J. C. *et al.* (1985): Cronoestratigrafía mediante dataciones K/Ar y C<sup>14</sup> de los volcanes compuestos del Complejo Ruiz - Tolima y aspectos volcano-estructurales del Nevado del Ruiz (Cordillera Central, Colombia).- VI Congreso Latinoamericano de Geología. Tomo I. pp 336 — 382.
- THOURET, J. C. *et al.* (1995): Quaternary eruptive history and hazard-zone model at Nevado del Tolima and Cerro Machín Volcanoes, Colombia.- *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 66: 397-426.
- VESGA, C. J. & BARRERO, D. (1978): Edades K/Ar en rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera Central de Colombia y su implicación geológica.- II Congreso Colombiano de Geología. Bogotá, Resúmenes: 19 p.

*Manuscrito recibido, Agosto de 2003 aceptado, Octubre de 2003*

## LÁMINA 1

**Figura A:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 150$  m/s,  $a_0 = 0,1022$  y  $a_1 = 0,01$ . Nótese como los flujos son capaces de superar la cuchilla de San Lorenzo y de alcanzar a la localidad de Cajamarca.

**Figura B:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 150$  m/s,  $a_0 = 0,1182$  y  $a_1 = 0,01$ . Al igual que en la figura A, los flujos son capaces de superar la cuchilla de San Lorenzo y de alcanzar a la localidad de Cajamarca.

**Figura C:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 150$  m/s,  $a_0 = 0,1826$  y  $a_1 = 0,01$ . También se supera el alto de la cuchilla de San Lorenzo y se alcanza a la localidad de Cajamarca.

**Figura D:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 120$  m/s,  $a_0 = 0,1022$  y  $a_1 = 0,01$ . Aunque la velocidad inicial de los flujos es menor, estos logran alcanzar a Cajamarca.

**Figura E:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 120$  m/s,  $a_0 = 0,1182$  y  $a_1 = 0,01$ . También se alcanza a la localidad de Cajamarca.

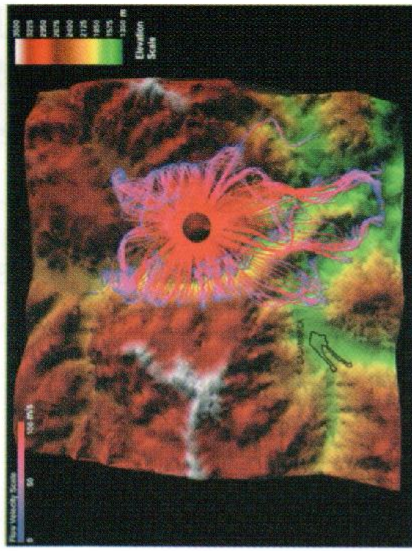
**Figura F:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 120$  m/s,  $a_0 = 0,1826$  y  $a_1 = 0,01$ . En este caso aunque se supera a la cuchilla de San Lorenzo Cajamarca no se vería afectada por un flujo de estas características.

**Figura G:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 100$  m/s,  $a_0 = 0,1022$  y  $a_1 = 0,01$ .

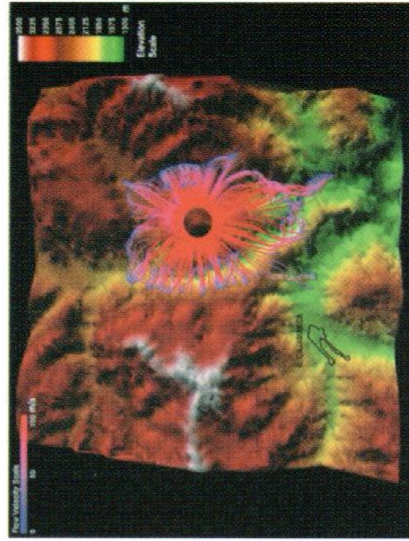
**Figura H:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 100$  m/s,  $a_0 = 0,1826$  y  $a_1 = 0,01$ . Tanto en las figuras G y H las velocidades iniciales no son suficientes como para que Cajamarca se vea afectada.

**Figura I:** Modelamiento de flujos piroclásticos con  $V_i = 0$  m/s,  $a_0 = 0,25$  y  $a_1 = 0,01$ . Se trata de un flujo piroclástico producido por colapso de domos.

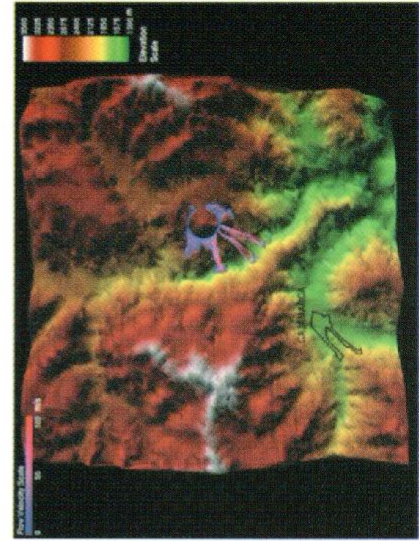




G

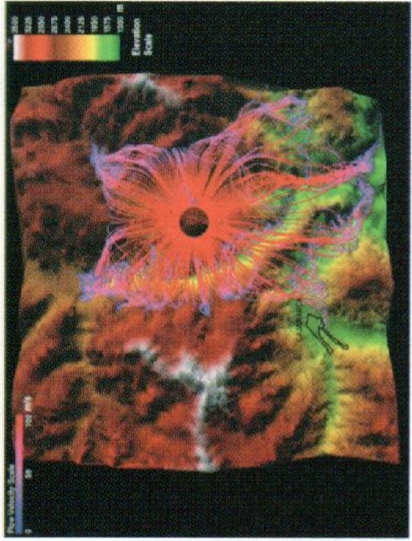


H

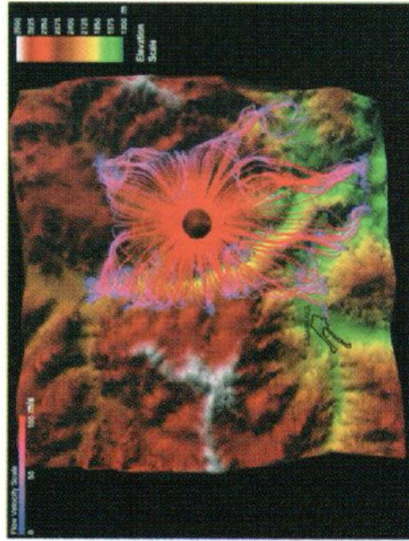


I

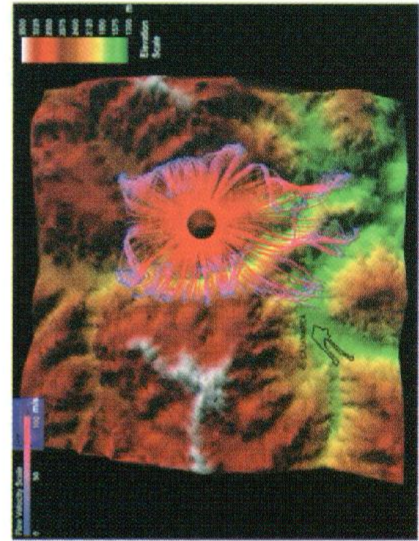
# LAMINA 1



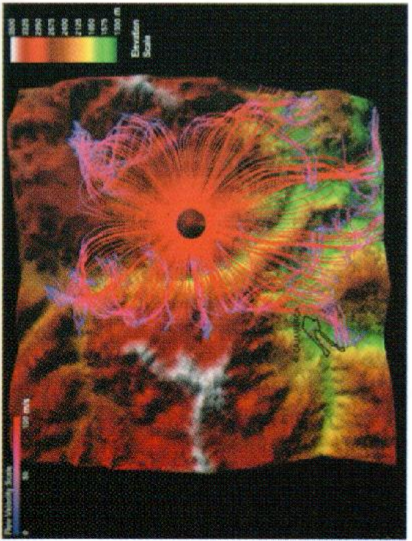
D



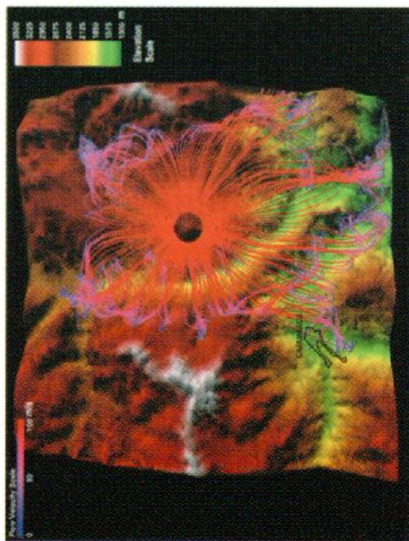
E



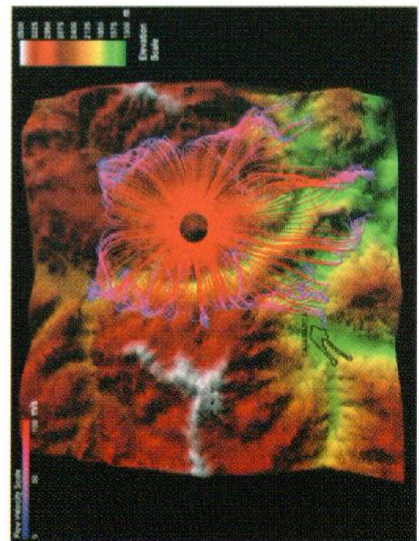
F



A



B



C