

Pablo Samaniego^{1,2}
Claude Robin²
Michel Monzier²
Jean-Philippe Eissen^{1,3}
Patricia Mothes¹
Minard L. Hall¹

EL COMPLEJO VOLCÁNICO CAYAMBE: SÍNTESIS GEOLÓGICA, ACTIVIDAD HOLOCÉNICA Y EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

- 1 Instituto Geofísico/
Departamento de Geofísica.
Escuela Politécnica Nacional,
Quito.
- 2 IRD, UR Processus et Aléas
Volcaniques. Laboratoire
Magmas et Volcans, Université
Blaise Pascal; 5, rue Kessler,
63038 Clermont-Ferrand,
France.
- 3 IRD, casilla 17-12-857, Quito,
Ecuador.

Resumen

El complejo volcánico Cayambe está constituido por tres edificios: a) un antiguo edificio efusivo, el "Viejo Cayambe"; b) el volcán joven o "Nevado Cayambe" caracterizado por una historia mucho más compleja y dinámicos eruptivos más explosivos; y c) un cono satélite construido en el extremo oriental del complejo, el "Cono de La Virgen". La actividad reciente del Nevado Cayambe (últimos 4 000, aBP) ha presentado tres ciclos de actividad de 300, 600 y 900 años de duración, separados por períodos de calma de 600 y 1 000 años respectivamente. El último período eruptivo, iniciado hace 1 100 años, se ha caracterizado por el crecimiento de domos de lava, la generación de flujos piroclásticos de colapso de domo, la producción de lahares asociados a la fusión del casquete glaciar y una limitada distribución de piroclastos. Una síntesis de estos datos nos permite proponer un primer mapa de peligros volcánicos asociados a este volcán.

Abstract

The Cayambe volcanic complex is comprised of three edifices: a) an old effusive edifice, the "Viejo Cayambe"; b) the young volcano "Nevado Cayambe", characterized by a complex history and explosive eruptive dynamics; and c) a satellite cone constructed on the extreme east end of the complex, "Cono de la Virgen". The recent activity of Nevado Cayambe (last 4 000 years) has presented three cycles of activity at 300, 600 and 900 years of duration, separated by calm periods of 600 and 1 000 years respectively. The last eruptive period, which begin about 1 100 years BP is characterized by the growth of lava domes, the generation of pyroclastic flows from dome collapse, the production of lahars associated with the fusion of the glacial cap and the limited distribution of tephra falls. A synthesis of these data permits us to propose a preliminary hazard map concerned with the volcanic hazards associated with this volcano.

Pablo.Samaniego@ird.fr

INTRODUCCIÓN

El Complejo Volcánico Cayambe (CVC) se encuentra ubicado en la parte Norte de la Cordillera Real de los Andes Ecuatorianos, a 60 km al NE de la ciudad de Quito y a solo 15 km al E de la ciudad de Cayambe (~20 000 habitantes). Previo a los trabajos de Hall y Mothes (1994) se consideraba a este gran edificio volcánico como inactivo, sin embargo estos autores reportan seis caídas de ceniza relacionadas con la actividad holocénica de este edificio. Estudios tefro-cronológicos más recientes (Samaniego, 1996 y Samaniego, *et al.*, 1998), así como un reconocimiento geológico general de este complejo volcánico (Samaniego, 2001) han permitido conocer su historia geológica. Estas evidencias, junto con la intensa actividad sísmica que caracteriza este edificio (Guillier *et al.*, 1999), nos permiten afirmar que se trata de un volcán activo con una importante actividad en los últimos miles de años. Sobre la base de esta información, en este artículo trataremos de presentar una evaluación de los peligros volcánicos asociados con este volcán.

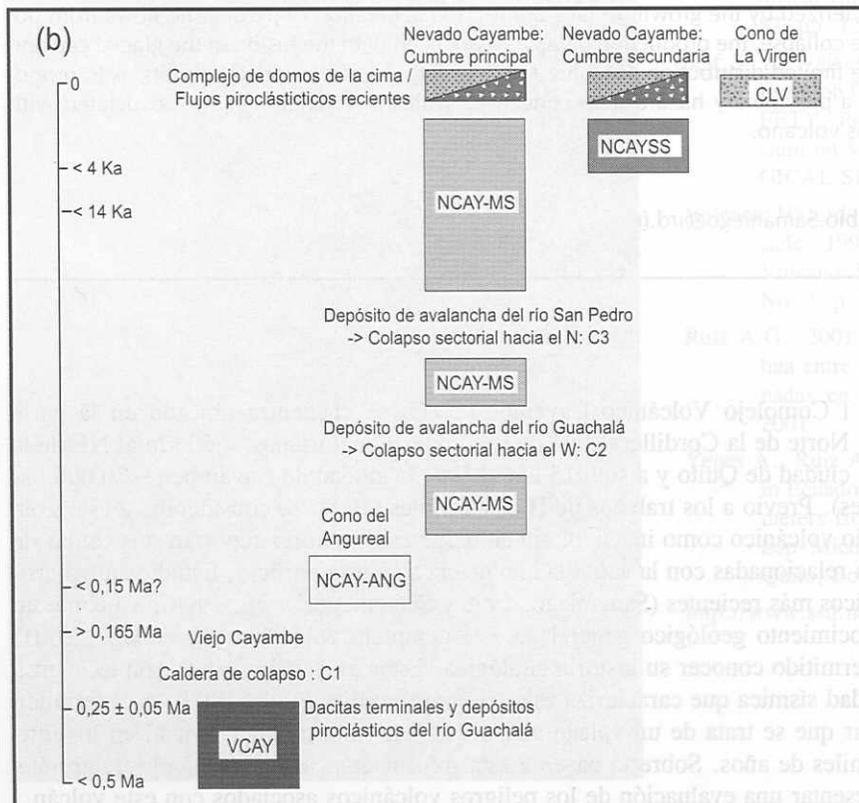
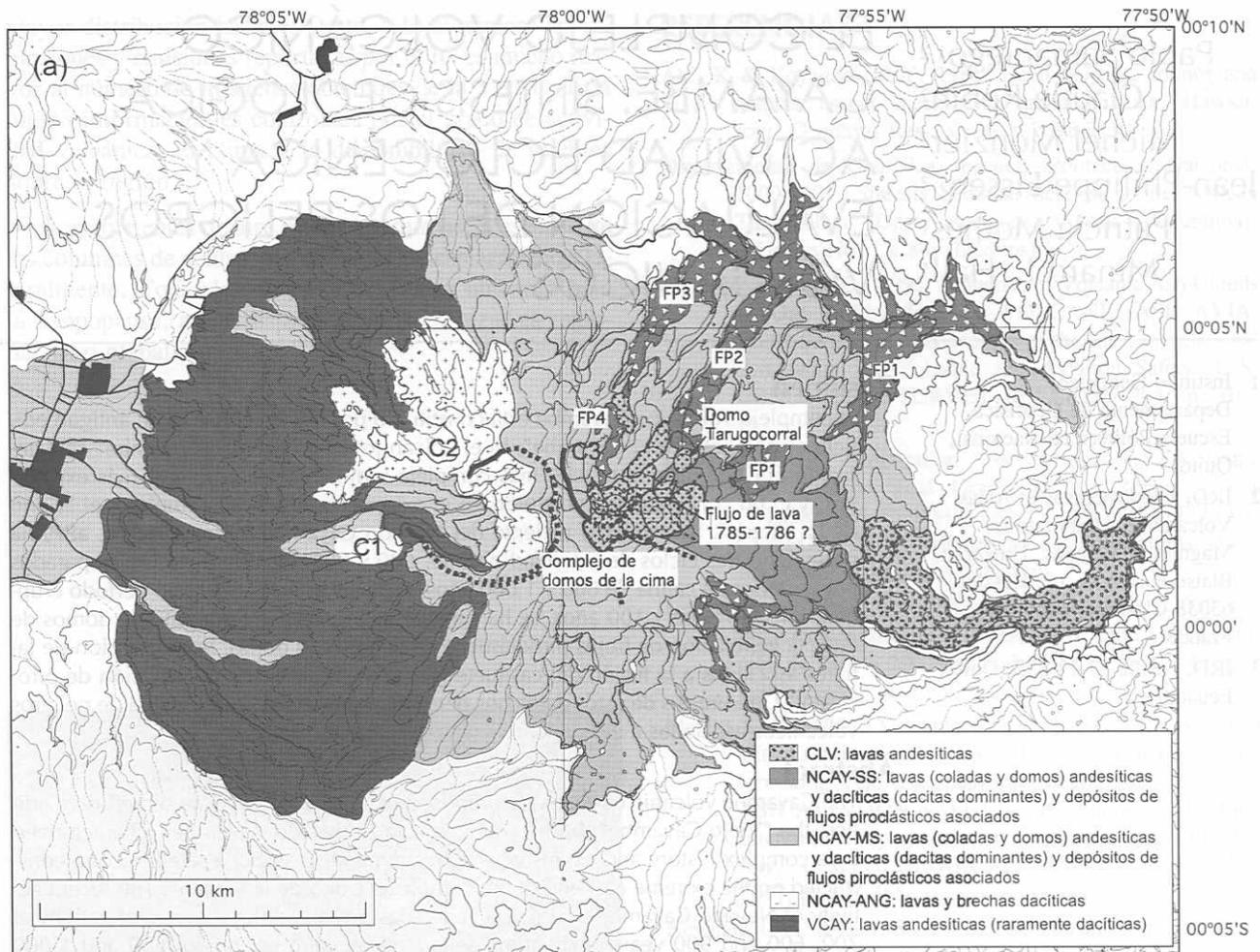


Figura 1. a) Mapa estructural del Complejo Volcánico Cayambe (CVC). b) Estratigrafía simplificada del CVC.

ESTRATIGRAFÍA DEL COMPLEJO VOLCÁNICO CAYAMBE

El Complejo Volcánico Cayambe (CVC) presenta una base aproximadamente rectangular (24 km E-W por 18 km N-S), ubicada a una altura de 2 800-3 000 msnm (metros sobre el nivel del mar) en la parte occidental y 3 400-3 800 msnm en la parte oriental. La parte superior del complejo, alargada en dirección E-W, está constituida por una cumbre principal (5 790 m) y una cumbre secundaria (5 487 m) ubicada a 1.5 km al E de la primera. Sobre los 4 800 msnm, el complejo está cubierto por un importante casquete glacial que cubre un área de aproximadamente 22 km² y que alcanza un espesor de 30-50 m en la cumbre. De este casquete glacial descienden grandes lenguas glaciares hasta los 4 400 m en el flanco oriental, mientras que en el flanco occidental, más seco, los glaciares llegan hasta una altura de 4 600-4 800 m. El complejo volcánico Cayambe, está formado por tres edificios sucesivos (figura 1).

El “Viejo Cayambe” (VCAY) es un edificio lávico, bastante erosionado, ubicado en la parte occidental del complejo volcánico y que se construyó durante el Pleistoceno (0.5-0.25 Ma, Barberi *et al.*, 1988; Samaniego, 2001). Considerando la inclinación de los flujos de lava que constituyen los remanentes de este edificio, se puede inferir que la parte central del mismo se ubicó aproximadamente en la parte central del complejo y que alcanzó una altura de 4 300-4 400 msnm. El reconocimiento de importantes secuencias pumíticas en la parte SW del complejo (río Guachalá) y a la forma arqueada del valle del río Blanco, sugieren que la evolución de este edificio terminó con la formación de una caldera de colapso asociada a una importante actividad piroclástica. Las rocas de este edificio constituyen una serie andesítica de medio-K (57-73 wt% SiO₂), siendo las dacitas y las riolitas escasas y restringidas exclusivamente a la etapa terminal de este edificio. La mineralogía característica del VCAY incluye la presencia de plagioclasa, ortopiroxeno, clinopiroxeno y óxidos de Fe-Ti.

El edificio actual o “Nevado Cayambe” (NCAY) es un estratovolcán compuesto, construido sobre los remanentes orientales del volcán de base durante el Pleistoceno superior y el Holoceno. Las correlaciones estratigráficas con una capa guía regional (la caída de lapilli y ceniza denominada “Pifo” por Hall y Mothes, 1997) nos permiten determinar que la edad de este edificio es inferior a 0.165 Ma. Petrográficamente las rocas de este edificio constituyen también una serie calco-alcalina de medio-K (58-69 wt% SiO₂), siendo en este caso las dacitas más abundantes que las andesitas. La mineralogía característica de las lavas del NCAY está constituida por la presencia de plagioclasa, anfíbol, ortopiroxeno, clinopiroxeno y óxidos de Fe-Ti. El NCAY está constituido por tres edificios sucesivos:

- El cono del Angureal (NCAY-ANG) es el edificio que marca la transición entre el volcán de base y el volcán reciente. Se trata de un edificio bastante erosionado, cortado por el profundo valle del río Blanco. La reconstrucción de este edificio basada en la inclinación de los flujos de lava del mismo implica que su cumbre se ubicó aproximadamente a 3 km al oeste de la cumbre actual y su altura fue de alrededor de 5 200 m. La estructura en forma de herradura abierta hacia el occidente ubicada en la cabecera del río Blanco sugiere la ocurrencia de un colapso sectorial, el cual debió afectar las secuencias volcánicas de este cono y del edificio subyacente (VCAY).
- El edificio que forma la cumbre principal del complejo (NCAY-MS) es un edificio complejo, coronado por un complejo de domos somitales. Este edificio ha presentado diferentes fases de construcción (flujos y domos de lava) y de destrucción del edificio (erupciones ignimbriticas y colapsos sectoriales). En particular se debe señalar la ocurrencia de dos colapsos sectoriales que afectaron los flancos W y N. El colapso del flanco occidental se evidencia por la estructura en herradura de la cabecera del río Blanco y los depósitos de avalancha que afloran en el río Blanco, Granobles y Guachalá; mientras que los productos del colapso del flanco norte, constituyen el depósito de avalancha del río San Pedro (figura 1b).
- La cumbre secundaria del complejo (NCAY-SS) fue construida sobre el flanco occidental del NCAY-MS. Este edificio se encuentra exento de erosión glacial, lo cual sugiere una edad holocénica (post-glacial).

Finalmente, en el extremo oriental del complejo se encuentra un pequeño edificio satélite, el “Cono de la Virgen” (CLV), igualmente de edad holocénica y caracterizado por la generación de importantes coladas de lava dirigidas hacia el oriente. Estas rocas son andesitas ricas en K (59-60 wt% SiO₂) diferentes del resto de rocas del complejo.

ACTIVIDAD RECIENTE DEL COMPLEJO

La actividad reciente del complejo fue responsable de la construcción de la cumbre secundaria (NCAY-SS) y del complejo de domos somitales ubicado en las dos cumbres del mismo. Dicha actividad ha presentado de manera general un estilo eruptivo peleano caracterizado por la extrusión de domos y flujos de lava, el colapso explosivo de los mismos con la consiguiente formación de flujos piroclásticos y la caída de piroclastos. A esto se debe sumar la generación de flujos de escombros.

Flujos piroclásticos

En los flancos N y NE del complejo se han reconocido al menos cuatro unidades de flujos piroclásticos (figura 1a). Las tres unidades más antiguas reconocidas en

estos flancos (FP1-3) son grandes depósitos de bloques y ceniza (*block-and-ash flow deposits*) asociados con flujos piroclásticos de colapso de domo, mientras que la unidad más joven (FP4) es una secuencia de oleadas piroclásticas (*surges*).

- El depósito más antiguo (FP1) se encuentra rellenando el valle del río San Jerónimo y está asociado al colapso de un domo de la cumbre secundaria (5 487 m). El espesor de esta unidad, en la parte baja de dicho valle, es de 20-40 m y su volumen estimado es de 0.3-0.4 km³. Este depósito está constituido por bloques de roca densa de composición dacítica (63-66 wt% SiO₂). Según su posición estratigráfica, el grado de erosión y la cantidad de cobertura vegetal que presenta cada una de estas unidades (FP1-3), este depósito es claramente más antiguo que los depósitos denominados FP2 y FP3, ubicados más al occidente.
- La secuencia denominada FP2 consiste de al menos 15 a 20 unidades de flujos piroclásticos de bloques y ceniza. Esta secuencia se originó en un centro de emisión denominado domo *TarugoCorral* (4 553 m) ubicado en el flanco NE de la cumbre máxima del complejo. Actualmente se encuentra rellenando el valle del río Arturo, alcanzando una distancia de 7-8 km y un espesor máximo de 80-100 m, lo cual implica un volumen aproximado de 0.3-0.5 km³. Los bloques de estos depósitos son igualmente densos pero muestran frecuentemente texturas bandeadas entre un polo andesítico (61 wt% SiO₂) y un polo dacítico (65 wt% SiO₂). La mayor parte de esta secuencia fue depositada en intervalos de tiempo cortos, razón por la cual no se observan niveles de suelo entre los diferentes depósitos. Sin embargo en la parte proximal de la secuencia, en las cercanías del domo *TarugoCorral*, se puede apreciar que la mayor parte de la secuencia (30-40 m) está sobreyacida por un nivel de suelo que contiene una capa de ceniza fina de color amarillo rica en biotita, interpretada como proveniente de la erupción de 800 yBP (years Before Present: años antes del presente) del volcán Quilotoa (Mothé y Hall, 1998).
- El depósito denominado FP3 constituye un único evento que actualmente se encuentra rellenando los valles de los ríos San Pedro y Azuela. El represamiento de este último por estos productos piroclásticos dio lugar a la formación de la laguna de San Marcos. Este depósito se puede mapear por 6-7 km de longitud desde el río Azuela hasta una cicatriz bajo la cumbre principal (NCAY-MS). El volumen de este depósito es de 0.3-0.4 km³. Así, se considera que este depósito se originó por el colapso de un domo extruido en la parte superior del flanco norte del complejo. Al igual que el depósito anterior, los bloques de esta unidad presentan una importante heterogeneidad petrográfica, que varía entre las andesitas y las daci-

tas (62-66 wt% SiO₂). Adicionalmente, en este depósito se observan bloques menos densos y bombas “en coliflor” lo que sugiere una mayor explosividad (i.e. mayor contenido de gases y/o freato-magmatismo).

- Los depósitos denominados FP4, aparentemente relacionados con el mismo centro eruptivo que el flujo precedente, constituyen un evento inmediatamente posterior al evento FP3. Estos depósitos se encuentran cubriendo un área restringida en el flanco N, sobre los 4 200 msnm y presentan un espesor de ~10 m. Esta secuencia está constituida por niveles finamente estratificados de ceniza y lapilli, y se encuentra sobreyaciendo un suelo con abundante material carbonizado. Una datación ¹⁴C de este material dio una edad de 360 ± 70 yBP.
- Finalmente, en el flanco SE del complejo se observan pequeños depósitos de flujos de colapso de domo (< 0.1 km³), cuyos bloques son densos y de composición generalmente andesítica (62-63 wt% SiO₂). Estos depósitos se encuentran cubiertos por una serie de caídas de ceniza y lapilli, lo cual sugiere que se trata de eventos más antiguos que los precedentes (FP1-4). Por su ubicación bajo la cumbre secundaria, estos depósitos están asociados al colapso de los domos de dicha cumbre.

DEPÓSITOS DE CAÍDA

En los flancos superiores del complejo (por sobre los 3 800 msnm) se pueden observar importantes secuencias de suelos y caídas de ceniza y lapilli, testigos de la actividad Holocénica (post-glacial) del volcán. La base de este estudio constituye una sección realizada en una turbera del flanco SW del volcán, ubicada a 4 300 msnm (figura 2). Dicha información fue completada y correlacionada con la obtenida en otras secciones estratigráficas realizadas en los flancos N y S del complejo. En la sección de la turbera se pudieron identificar 23 niveles de ceniza y lapilli, intercalados con niveles de turba. Adicionalmente se realizaron seis dataciones ¹⁴C que permitieron conocer la tasa de formación de turba y a partir de esta información se pudo establecer una escala de tiempo que permitió asignar una edad aproximada a cada uno de los niveles de turba (i.e. a cada evento eruptivo registrado en la sección).

La interpretación de estos resultados (Samaniego *et al.*, 1998) muestra que la actividad Holocénica del Nevado Cayambe estuvo limitada a los últimos 4 000 años y que se repartió en tres períodos de 300, 800 y 900 años de duración, separados por períodos de reposo de 600 y 1 000 años respectivamente. Sobre la base de correlaciones petrográficas entre los niveles de ceniza y los depósitos piroclásticos del flanco N y NE, se ha interpretado que dichos depósitos pertenecen al último período eruptivo iniciado hace 1 100 yBP. Así, las edades estimadas

para cada evento son $\sim 1\ 070$ yBP para la unidad FP1, 910-650 yBP para la secuencia FP2, y 380-360 yBP para las unidades FP3 y FP4.

Finalmente, la actividad reciente del Nevado Cayambe aun no habría terminado como lo atestigua un reporte encontrado en la correspondencia del Barón Alexander von Humboldt (Ascásubi, 1802), que describe una erupción en los años 1785-1786. Según este reporte, la erupción se habría producido en la parte oriental del complejo (la relación no es clara al respecto), y se describe como una erupción subglaciar que habría producido importantes emisiones de ceniza (se habla de 13 mm en el pueblo de Cayambe) y que habría terminado con una flujo de lava o un lahar en 1786. Una colada de lava viscosa, de aspecto joven, ubicado en el flanco NE del complejo a solo 700 m bajo la cumbre secundaria podría corresponder al flujo descrito en la relación anteriormente citada.

Flujos de lodo y escombros (lahares)

En la parte occidental del complejo volcánico se han reconocido varias unidades de flujos de lodo relacionados con la actividad reciente del volcán. Estos depósitos se encuentran en el abanico formado por el río Blanco y sobre el cual se encuentra construida la ciudad de Cayambe. El espesor de estos depósitos en la planicie de Cayambe varía entre 0.5 y 1.5 m. La presencia de abundante material antrópico (cerámica y obsidiana tallada) sugiere una edad inferior a 800 yBP (J. Stephen Athens, com. pers, 2001). Esta afirmación será confirmada con una datación ^{14}C de material orgánico relacionado con la cerámica encontrada en esta unidad. De todas formas, parece que estos eventos laháricos estuvieron relacionados con los importantes eventos piroclásticos que caracterizan el último ciclo eruptivo del volcán ($< 1\ 100$ yBP).

Los depósitos de flujos de lodo recientes encontrados en la planicie de Cayambe se encuentran cubriendo parcialmente un depósito lahárico más antiguo, evento que debió ocurrir durante la primera mitad de edificación del NCAY-MS (> 20 ky BP). Este depósito se encuentra rellenando la planicie de Cayambe y aflora en los valles de los ríos Blanco, Granobles y Guachalá, en donde presenta espesores de hasta 15 m. Este depósito presenta bloques angulares y fracturamiento radial y una matriz cohesiva arenosa/arcillosa, lo que implica que tuvo su origen por el colapso del flanco occidental del complejo volcánico. Un porcentaje importante de los bloques (hasta 20%) presentan una importante alteración hidrotermal, indicando el estado del edificio volcánico previo al evento de colapso.

EVALUACIÓN DE LOS PELIGROS VOLCÁNICOS

Los estudios geológicos llevados a cabo en este volcán (Samaniego, 1996; Samaniego, 2001) muestran que los fenómenos volcánicos más frecuentes en este volcán han sido los flujos piroclásticos de colapso de domos, los flujos de lodo y escombros (lahares) asociados a la fusión del casquete glaciar y las caídas de lapilli y ceniza. Las avalanchas de escombros (y los lahares asociados) a pesar de ser eventos extremadamente raros en la historia de un volcán serán también considerados pues representan eventos muy peligrosos y de una gran magnitud.

Flujos piroclásticos

Los flancos en los cuales han sido extruidos los domos de lava han sido los flancos N y E del NCAY, por lo cual se considera que estos flancos son los más propensos a presentar este tipo de actividad extrusiva y los subsecuentes flujos piroclásticos que siguen a la actividad extrusiva. Estas áreas son generalmente zonas deshabitadas por lo que el riesgo asociado con este fenómeno es bajo. Sin embargo, los recientes trabajos de captación del proyecto de agua "Tabacundo", ubicados en la parte norte del volcán (trasvase Laguna de San Marcos-río La Chimba) se encuentran en la zona de mayor peligro por este tipo de fenómeno. Finalmente, se debe considerar la posibilidad de extrusión de un domo en la parte somital del volcán, en cuyo caso se podrían generar flujos piroclásticos que descenderían por el flanco N pero también por el flanco W (en particular por el valle del río Blanco), en cuyo caso el riesgo para las zonas altas de la ciudad de Cayambe y en particular el cauce del río Blanco es mayor.

Para delimitar las áreas afectadas por flujos piroclásticos utilizamos la técnica denominada "cono de energía" (Malin y Sheridan, 1982), ampliamente utilizada en la elaboración de mapas de peligros volcánicos alrededor del mundo. Este método considera que el alcance horizontal (L) alcanzado por un flujo es función de la diferencia de alturas (H) entre el punto de generación del flujo y el punto de depositación. Así, el ángulo ($\arctan H/L$) del denominado cono de energía corresponde a una medida de la movilidad del flujo. Dado que todos los depósitos de flujos piroclásticos reconocidos corresponden a flujos de colapso de domo, se ha considerado como altura del colapso (H) la altura de la cumbre principal, lo que correspondería a un colapso de domo en la parte somital del volcán (cumbre principal o cumbre secundaria). Por otro lado, utilizando los depósitos piroclásticos mapeados se ha podido determinar la relación H/L para cada evento, que corresponde a un ángulo del cono de energía de 8° a 14° , con un valor promedio de 12° , el cual es propio de flujos piroclásticos de este tipo (Crandall, *et al.*, 1984).