

I-2357

*original*

INGEOMINAS

UNIDAD OPERATIVA POPAYÁN

OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMOLÓGICO

CONVENIO INGEOMINAS - CORPORACIÓN NASA KIWE

EVALUACIÓN DE AMENAZA Y VIGILANCIA VOLCÁNICA DEL COMPLEJO  
VOLCÁNICO NEVADO DEL HUILA

POPAYÁN, DICIEMBRE DE 1996

## CONTENIDO

	Pag.
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PRETEXTO	1
1.2 LOCALIZACIÓN	2
1.3 TRABAJOS ANTERIORES	4
1.4 METODOLOGÍA	4
1.5 PARTICIPANTES	5
2. ACTIVIDAD HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA	6
3. AMENAZA VOLCÁNICA POTENCIAL DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADO DEL HUILA	7
3.1 GENERALIDADES	7
3.2 GEOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN	7
3.3 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA	9
3.3.1 Flujos de Lava Nuevos	10
3.3.2 Flujos de Lava Antiguos	10
3.3.3 Flujos de Lava Pre-Huila.	10
3.3.4 Domos	11
3.4 AMENAZA POR ACTIVIDAD PIROCLÁSTICA	11
3.4.1 Caída de Piroclastos	12
3.4.2 Flujos Piroclásticos	13
3.5 AMENAZA POR LAHARES	13
3.5.1 El Casquete Glaciar	14
3.5.2 Escenario por Flujos de Lava	14
3.5.3 Escenario por Actividad Piroclástica	15
3.5.4 Escenarios con el Modelo <u>Mud Flow</u>	16
3.5.5 Limitaciones y Consideraciones sobre Zonificación por Lahares	17
3.5.6 Zonificación por Lahares en Belalcázar: Consideraciones	17
3.6 OTRAS AMENAZAS	19
3.6.1 Sismos Volcánicos	19
3.6.2 Gases Volcánicos	19
3.7 ZONIFICACIÓN	19
3.7.1 Zona de Amenaza Alta	21
3.7.2 Zona de Amenaza Media	21
3.7.3 Zona de Amenaza Baja.	21
4. REDES DE VIGILANCIA VOLCÁNICA	23
4.1 SISMOLOGÍA	23
4.2 DEFORMACIÓN	24
4.3 DETECCIÓN DE FLUJOS DE LODO	24
4.4 OTROS	26
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
6. BIBLIOGRAFÍA	31

## FIGURAS

	Pag.
1. Complejo Volcánico Nevado del Huila: Mapa de Localización	3
2. Complejo Volcánico Nevado del Huila: Focos de Emisión	8
3. Complejo Volcánico Nevado del Huila: Redes de Vigilancia y Límites del Edificio Volcánico	20

## ANEXOS (En Bolsillo)

1. Mapa de Amenaza del Complejo Volcánico Nevado del Huila (Segunda Versión).
2. Mapa de Amenaza por Flujos de Lodo. Sector Irlanda - Aranzazu.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRETEXTO

El 6 de junio de 1994, el Sismo de Páez conmovió a la nación paez, causando daños a sus vidas, sus bienes y a su territorio, es decir, a su cultura. Esneda es líder comunitaria y mujer de Régulo Paya, indígena paez, guardabosques del Parque Nacional Natural Nevado del Huila; ella se hallaba labrando la tierra, en las propias faldas del Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH), en compañía de sus suegros, dos de sus hijos y un sobrino, cerca a donde la quebrada Ansayó desemboca al río Páez, un poco aguas arriba de Irlanda, en la tarde de aquel día, cuando sintió una gran explosión hacia el Nevado; en seguida se dijo, "explotó el volcán" y comenzó a desarrollar su respuesta ante la eventualidad. Esneda sabía que, en caso de erupción, debía alejarse del río y protegerse en los cerros y eso fue lo que hizo, salvando, luego de esfuerzos suprahumanos, su vida, la de sus hijos y la de su sobrino, no así la de sus suegros. Así como Esneda, la gran mayoría de paezes miró con respeto al Nevado y, aún hoy, muchos están convencidos que aquel fue el culpable del Sismo.

El epicentro del Sismo de Páez del 6 de junio de 1994, se ubicó en las partes bajas de las faldas del CVNH (INGEOMINAS, 1994a), cerca a la localidad de Dublín; su hipocentro fue a 10 km de profundidad y su origen claramente tectónico. Un sismo de magnitud 6.4 en la Escala de Richter, superficial y bajo el edificio de un volcán activo, debe influir en el sistema volcánico mismo y fue así como el cono fue afectado por movimientos en masa, la actividad fumarólica se incrementó y en los equipos de vigilancia sismológica fueron registrados dos eventos inusuales de tremor el 7 de agosto y el 27 de septiembre de 1994; no se sabe con certeza si hubo otras anomalías de actividad sísmica de origen volcánico, debido a que los sensores fueron desacomodados por el Sismo, apareció mucho ruido instrumental y las réplicas no permitieron analizar completamente los registros.

Como consecuencia del Sismo de Páez, el sistema volcánico de este complejo pudo ser afectado lo necesario para inducir o adelantar una crisis volcánica; sin embargo, con el estado actual del conocimiento, en caso que ocurriera, es imposible saber cuándo..

Además, el mapa de amenaza elaborado en 1986 (Cepeda y otros, 1986), debe ser actualizado por las razones siguientes:

- Pertenece a la primera generación de mapas de amenaza volcánica elaborados en Colombia; fue el segundo, después de las primeras dos versiones para el Nevado del Ruiz, en el año 1985, del cual se han elaborado cuatro versiones (sólo tres oficiales).
- Fue elaborado en situación de emergencia, suscitada por el temor de las autoridades sobre su supuesta reactivación al tiempo con el Ruiz y la posibilidad que La Plata (Huila) pudiera sufrir

los mismos efectos que Armero, en caso de erupción del Huila (Cepeda y otros, 1986). Esto exigió que fuera un producto rápido para despejar las inquietudes de las autoridades.

- La primera versión clasifica al Complejo Volcánico Nevado del Huila como un volcán netamente efusivo, es decir, con erupciones sólo de lávicas. Se recomendaba un estudio completo de todo el edificio volcánico, para poder descartar con certeza su potencialidad de producir erupciones explosivas, es decir, que produzcan piroclastos. Del edificio volcánico, sólo se conocía partes de sus costados occidental y meridional.
- Una de las amenazas volcánicas del CVNH son los lahares o flujos de lodo de origen volcánico; tales flujos de lodo se originan por fusión del casquete glaciar y transitan por los cauces de los ríos Páez y Símbola (afluente del Páez). Como el Sismo de Páez indujo flujos de escombros ('avalanchas') que se canalizaron por los cauces de los ríos mencionados, éstos produjeron cambios en la forma del canal por el cual transitan los lahares, alterando el mapa de amenaza preexistente. Además, el río Páez en la búsqueda de reestablecer su nivel de base, ha cambiado continuamente la morfología de su cauce.
- Brindar una mejor herramienta de planificación y ordenamiento territorial a autoridades y pobladores de la zona de influencia volcánica.

## 1.2 LOCALIZACIÓN

El CVNH hace parte del Parque Nacional Natural Nevado del Huila y está localizado en el SW colombiano, en los límites de los departamentos de Cauca, Huila y Tolima, en las coordenadas 2° 55' de latitud Norte y 76° 03' de longitud Oeste de Greenwich (Figura 1). Su altura máxima, el Pico Central (5364 m), corresponde al punto más alto de la cordillera Central y de Los Andes en Colombia.

El río Páez, afluente del río Magdalena, es el encargado de drenar las aguas del CVNH y en su cuenca, cerca a los cauces, se encuentran poblaciones como Tálaga, Avirama, Belalcázar, Cohetando, Guadalejo, Puerto Valencia y Aranzazu.

Para poder llegar al Nevado del Huila se puede tomar dos caminos, uno desde el W y otro desde el E. El primero es una carretera, la cual sale de la carretera Panamericana en Santander de Quilichao, pasa por Caloto (de acá en adelante sin pavimentar), El Palo y Tacueyó, para llegar a un sitio llamado Verdún, en la desembocadura de la quebrada del mismo nombre al río Páez. El segundo es otra carretera que sale de la vía Neiva - Pitalito y pasa por La Plata, Belalcázar y Tálaga, para llegar a Tóez, desde donde se debe caminar por la orilla del río Páez, hasta Verdún (Figura 1). Desde Verdún se debe continuar, durante 6 - 8 horas, por un camino no apto para bestias de carga, hasta alcanzar el Campamento Colombiano, localizado en la mitad W, en la cota 4200 m, desde donde los montañistas atacan la cumbre nevada; este camino es muy exigente y para iniciarlo se recomienda contar con equipo de alta montaña y guías.



El INGEOMINAS, para atender las tareas de vigilancia volcánica, utiliza senderos trazados en las operaciones de establecimiento de las estaciones localizadas en la parte occidental del Nevado. Para las labores de geología de campo, base para el presente trabajo, fueron hechos senderos exploratorios en las partes oriental, sur y suroccidental para finalmente poder bajar al río Símbola, a la región de El Buco y completar la circunvalación por encima de la cota 4000 m (Guarnizo y Pulgarín, 1997).

### 1.3 TRABAJOS ANTERIORES

Los trabajos previos para la evaluación de la amenaza volcánica del Complejo Volcánico Nevado del Huila se limitan a la primera versión elaborada por el INGEOMINAS en 1986 (Cepeda y otros, 1986). Otros trabajos que han servido de soporte, son los efectuados por ICEL (1983), sobre factibilidad de proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Páez y los de INGEOMINAS, relacionados con el desastre causado por el Sismo de Páez del 06-06-94, la mayoría, enmarcados en el convenio INGEOMINAS - NASA KIWE (Ingeominas, 1994 y 1995a,b,c ; Correa y Cepeda, 1995; Cepeda y Correa, 1995 ; Pulgarín, 1995; Pulgarín y otros, en prensa; Pulgarín y Correa, en revisión ; Pulgarín y otros, en preparación).

### 1.4 METODOLOGÍA

Para la evaluación de la amenaza volcánica del CVNH, fueron seguidos los pasos siguientes:

- Análisis de la información geológica pre-existente.
- Exploración geológica del cono volcánico, especialmente sobre la cota 4000 m..
- Levantamiento topográfico de 52 secciones transversales al nuevo cauce del río Páez.
- Estudios estratigráficos y geomorfológicos a lo largo del valle del río Páez.
- Adquisición de información hidrometeorológica de la cuenca.
- Simulación de flujos de lodo de origen volcánico.
- Simulación de flujos piroclásticos.
- Análisis e interpretación de la información compilada.
- Elaboración de mapas e informes.

Para reforzar la vigilancia volcánica se consideraron los siguientes aspectos, no todos contemplados en el convenio INGEOMINAS - NASA KIWE:

- Diseño de red sismológica que permita localizar, en el espacio y en el tiempo, los sismos volcánicos.
- Selección de herramientas para el control de deformación de la superficie volcánica y diseño de red instrumental.
- Selección de herramientas para detección de flujos de lodo de origen volcánico y diseño de la red.
- Adquisición de equipos.
- Modernización y consolidación del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSP).
- Toma, procesamiento, análisis e interpretación de la información registrada en el OVSP.
- Mantenimiento de los equipos de la red para garantizar su funcionamiento continuo.
- Elaboración de informes

### 1.5 PARTICIPANTES

La elaboración del presente trabajo estuvo a cargo de los geólogos Héctor Cepeda, Director del OVSP (INGEOMINAS, Unidad Operativa Popayán) Bernardo Pulgarín y Adriana Agudelo (OVSP) y Ana María Correa (contratista). También, fue muy importante el trabajo del dibujante Guido Arcos. Grandes colaboradores, sin los cuales no hubiera sido posible realizar las labores de campo, fueron Teodardo Carrillo (Unidad Operativa Popayán), Manuel Castro (Unidad Operativa Medellín), Antonio Andrade, Régulo Paya (guardabosques del Parque Nacional Natural Nevado del Huila), Carlos E. Dorado (Unidad Operativa Popayán) y los acompañantes que duramente trabajaron en el transporte de los campamentos al rededor de esta montaña volcánica.

La modelación de lahares fue hecha por el ingeniero Gustavo Silva (contratista) y por Raigosa y Pulgarín (1996) y Raigosa and Pulgarín (1997).

Es de destacar la colaboración y discusiones de los colegas Pablo Caro (Sede Central), María Patricia Torres y María Mónica Arcila, del OVSP, así como del ingeniero Guillermo Ávila (Sede Central). Para no alargar la lista, se extienden los agradecimientos a todos los que incidieron en la elaboración de este estudio. Todos fueron importantes.

## 2. ACTIVIDAD HISTÓRICA Y PREHISTÓRICA

Del Complejo Volcánico Nevado del Huila no se conoce registro de actividad histórica, es decir, en los últimos 500 años no ha ocurrido erupción; sólo se habla de resplandores en su parte alta pero, si éstos fueran reflejo de erupción, se habrían generado flujos de lodo por derretimiento del casquete glaciario al caer material caliente sobre su superficie de lo cual no existe registro simultáneo. Tampoco, se conoce leyendas o mitos que puedan ser interpretados como actividad prehistórica.

Relacionado con la actividad del CVNH, siempre han sido reportadas fumarolas en su cima, p.e.: Stuebel (1906); también, existen fuentes de aguas termales asociadas a su edificio. A lo anterior se suma la actividad sísmológica, registrada instrumentalmente durante los últimos 10 años, lo cual confirma que el CVNH es un sistema volcánico activo, así no haya registrado erupciones históricas.

### 3. AMENAZA VOLCÁNICA POTENCIAL DEL CVNH

#### 3.1 GENERALIDADES

La evaluación de la amenaza volcánica se debe convertir en herramienta para la prevención de desastres, en particular y para el ordenamiento territorial, en general. Los mapas de amenaza volcánica son instrumentos de planificación a largo plazo y, por tanto, deben tenerse en cuenta en las decisiones sobre los planes de desarrollo. Además, junto a los pronósticos e información que produce la vigilancia volcánica, son valiosos para la elaboración de los escenarios que sirven de base para la ejecución de planes de contingencia durante las crisis volcánicas.

Para el caso específico del CVNH, luego del desastre producido por el Sismo de Páez, será utilizado, en especial, para la rehabilitación de la cuenca, enfatizando en la no reconstrucción de viviendas, especialmente en zonas ribereñas del río Páez, las cuales están en zona de amenaza por lahares.

#### 3.2 GEOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN

El CVNH es un complejo volcánico activo, alineado en dirección NS, por lo cual, Correa y Cepeda (1995), lo denominan Complejo Volcánico Nevado del Huila (CVNH); está conformado, al menos, por seis centros eruptivos alineados: El Pico Norte, La Cresta, el Pico Central, el Pico Sur y los domos Morro Negro y El Cerrillo (Figura 2).

El CVNH se construye sobre la cima de la cordillera Central y sus productos, predominantemente andesitas de dos piroxenos, indican que hace parte del vulcanismo de borde continental activo presente en Los Andes de Colombia.

La cadena de conos volcánicos que conforman el CVNH construyen un edificio elongado, en dirección NS, cerca de 16 km, por unos 11 km de ancho, cubriendo un área cercana a 170 km<sup>2</sup>, con desniveles entre las cotas 2000 m, en el extremo S y 5364 m en el Pico Central, dando la oportunidad a la presencia de varios pisos climáticos (subandino a gélido o nival).

La actividad fumarólica se concentra en los picos Norte y Central, los conos más sobresalientes del Complejo. La Cresta, al parecer, es un cono destruido y afilado por la acción glaciar; el Pico Sur presenta un fuerte alteración hidrotermal en superficie, la cual está también desgastada por acción glaciar. Morro Negro y El Cerrillo, son dos domos sobresalientes en la cima del Pico Sur y actualmente no están cubiertos por hielo, pero fueron labrados por éste, siendo menos intenso en el primero.

Para la evaluación de amenaza, se tuvo en cuenta los puntos siguientes:

- Los centros de emisión posibles son los picos Norte, Central, Sur, La Cresta, Morro Negro y El Cerrillo.

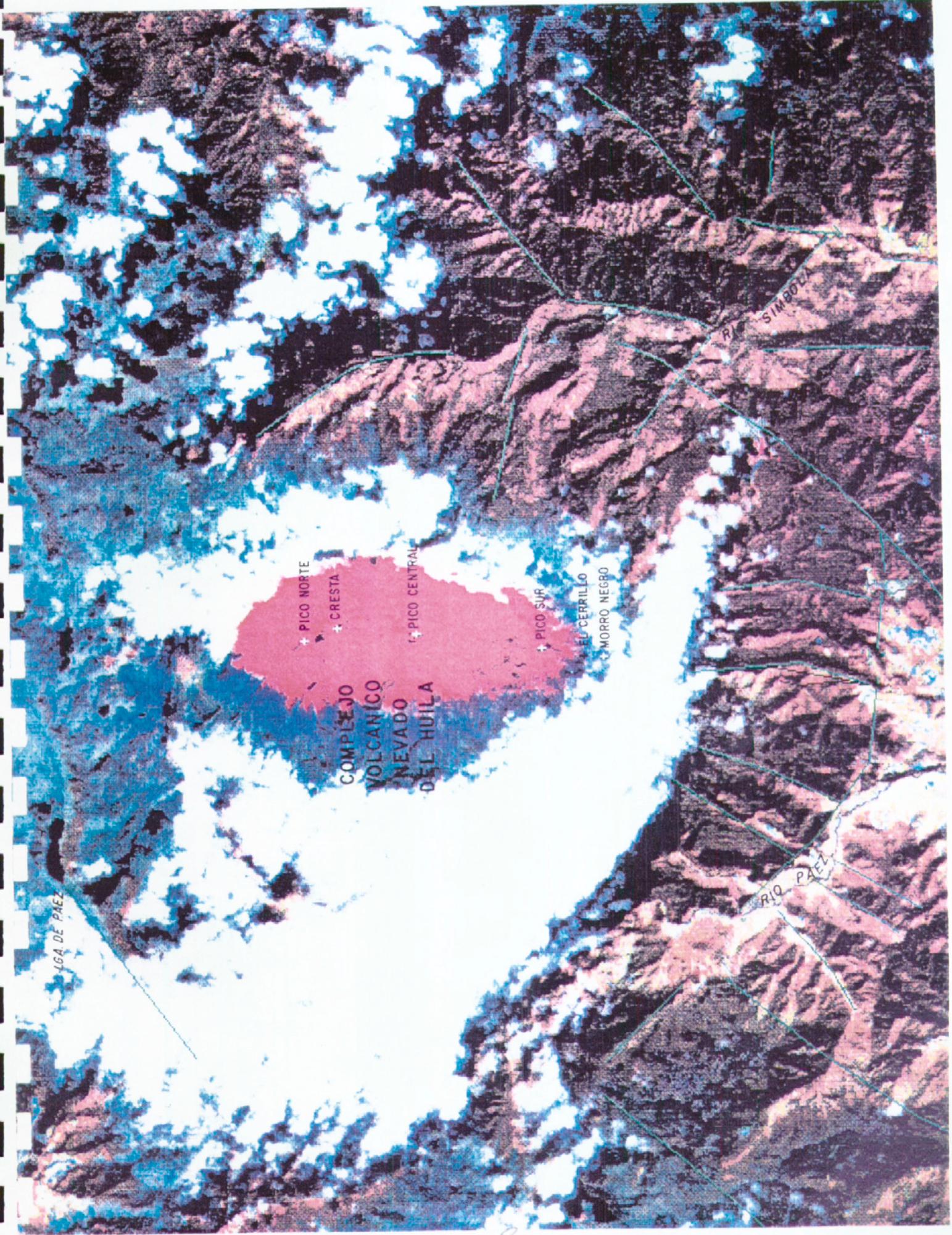
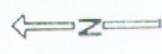


FIGURA 2 Complejo Volcánico Nevado del Huila : Focos de Emisión

- La historia geológica del CVNH indica evolución general en sentido SN, por lo cual, se asume una mayor probabilidad que ocurra una erupción hacia su mitad N, tal como también lo indican la presencia de las lavas más nuevas, la actividad fumarólica y la actividad sísmológica .
- La actividad predominante del CVNH es efusiva, por lo cual, se considera mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones lávicas que explosivas.
- Los registros de actividad explosiva, conocidos hasta el momento, en la parte proximal del CVNH son escasos y se localizan al SE del Pico Central (depósitos de flujos piroclásticos de ceniza y bloques, que pueden indicar colapso o explosión de domos) y otro, localizado en la parte E del Pico La Cresta (flujo piroclástico de ceniza y pómez, aunque éste no se vió in situ). Fragmentos escasos y pequeños de pómez, se encuentran también en las partes proximales del flanco W del Pico Central, que posiblemente llegaron allí por el mecanismo de caída, aunque no logran conformar un depósito propiamente dicho o éste fue destruido.
- El CVNH se halla coronado por un casquete glaciar de 13.39 km<sup>2</sup> (Pulgarín, 1995; Pulgarín y otros, en prensa) con espesor promedio estimado de 55 m y volumen aproximado de 823 millones de m<sup>3</sup> (Pulgarín, y otros, en prensa).
- Cualquier erupción generará flujos de lodo por fusión del hielo glaciar y engorde con roductos sólidos que conforman depósitos superficiales (Pulgarín y Correa, en revisión) , los cuales pueden ser involucrados en el tránsito por la cuenca del río Páez.
- Flujos de lava, flujos piroclásticos y flujos de lodo se encausarán sólo por los valles de los ríos Símbola (afluente del Páez) y Páez (aguas abajo de la quebrada Verdún).
- Como sólo se conoce una estratigrafía generalizada de los depósitos del CVNH, para la evaluación de la amenaza, la probabilidad que se usa no es determinística, sino relativa.

### 3.3 AMENAZA POR FLUJOS DE LAVA

Las lavas son material fundido a temperaturas muy altas; dicho material es emitido de manera pasiva por cráteres o fisuras existentes en el edificio volcánico y avanza por las depresiones o valles de quebradas y ríos hacia partes bajas. En el momento de una erupción, se pueden formar fuentes de lava de hasta varias decenas de metros de altura sobre el cráter o centro de emisión.

En la historia del CVNH, han sido emitidas lavas viscosas que pueden salir a temperaturas entre 750° y 850°C y avanzar a velocidades bajas, < 40 km/h, distancias hasta de unos 13 km, contados desde el centro eruptivo más cercano (Pico Sur). Las lavas que fueron emitidas en el CVNH, en el pasado, se enfriaron lentamente produciendo varias estructuras y alcanzando espesores hasta de 40 m. Se encuentra flujos de lava macrocordados, columnares, laminares, masivos y líneas de flujo, contorsionadas resultantes del modo de fluir y del enfriamiento de las lavas.

Las lavas, al hacer contacto con el hielo del casquete glaciar del CVNH, sobre o bajo éste, producen fusión y dan origen a lahares o flujos de lodo de origen volcánico, que involucran gran cantidad de los sedimentos y otros materiales sueltos o disponibles en la superficie del edificio volcánico.

Las lavas, en su avance, causan arrasamiento total e incendios dejando los suelos no aptos para su aprovechamiento por mucho tiempo; sin embargo, no se consideran peligrosas para la vida del hombre pues, por ser lento su viaje, se puede huir de ellas y protegerse en partes altas o en zonas distintas al canal por donde avanzan. También, se puede desviar o frenar el avance de algunas lavas, así como enfriarlas con agua, para proteger infraestructura; para esto se utiliza maquinaria pesada, agua y bombardeos.

Como en el CVNH no se dispone de dataciones de lavas, éstos flujos fueron separados, para cada pico, de acuerdo a su edad relativa, en lavas nuevas y lavas antiguas, las cuales están descansando sobre otros depósitos lávicos, todavía más antiguos (lavas pre-Huila) que pertenecen al primer edificio del CVNH.

### 3.3.1 Flujos de Lava Nuevos

En el CVNH, las lavas más modernas que han sido producidas, están localizadas hacia su mitad N; son lavas macrocordadas, muy viscosas, que han avanzado distancias menores que 5 km, desde el Pico Norte o desde el Pico Central, cubriendo áreas menores que 4.0 km<sup>2</sup> y alcanzando volúmenes máximos de 160 millones de m<sup>3</sup>. Estas lavas no han sufrido acción erosiva por los glaciares o ella ha sido muy leve. Se espera que, en caso de erupción efusiva en el CVNH, la mayor probabilidad es que sea emitido este tipo de lava, con origen en los picos Central o Norte.

### 3.3.2 Flujos de Lava Antiguos

Estas lavas han sido emitidas, desde todos los picos del CVNH y han avanzado distancias hasta del orden de 8 km, contados a partir de los centros de emisión; son lavas con estructura masiva indicando que son menos viscosas que las nuevas. Los afloramientos más distantes pueden ser observados en las partes medias y medias-bajas del edificio volcánico y presentan un labrado glaciar marcado y cañones profundos. Erupciones que generen lavas que alcancen estas distancias, pueden ser emitidas por los diferentes picos, pero tienen una probabilidad media de ocurrencia.

### 3.3.3 Flujos de Lava Pre-Huila

Son lavas más antiguas que las anteriores y han alcanzado distancias hasta de 15 km, espesores del orden de 50 m por cada flujo y estructura columnar. Están mejor expuestas cerca a la desembocadura de la quebrada Quindao, hacia la parte baja S del edificio volcánico y también en la parte alta y media del cañón de la quebrada Verdún (preservadas debido a que han sido levantadas por fallas geológicas). Estas lavas han sufrido la más fuerte acción glaciar y sobre ellas se localizan la mayoría de las desembocaduras de las corrientes que nacen en el edificio volcánico a los ríos Páez y Símbola. La probabilidad de ocurrencia de éste tipo de lava, en caso de erupción efusiva, sería mucho menor que para el caso de los dos tipos de lavas antes descritos.

### 3.3.4 Domos

La posibilidad de generación de domos está sustentada en varios factores:

- Presencia en el registro geológico, de depósitos de flujos piroclásticos originados por colapso de domos.
- La existencia de Morro Negro y El Cerrillo, domos considerados como parte del registro geológico más recientes del CVNH.
- La gradación que presenta el CVNH, en el tiempo, hacia la producción de lavas más viscosas.

Su ocurrencia, podría generar lahares y flujos piroclásticos, si se presentara colapso. Su probabilidad de ocurrencia se considera baja, si se tiene en cuenta que, Morro Negro y El Cerrillo, junto con depósitos de flujos de ceniza y bloques, son algunos ejemplos de generación de domos en el registro geológico nuevo del CVNH.

### 3.4 AMENAZA POR ACTIVIDAD PIROCLÁSTICA

La actividad piroclástica de un volcán ocurre cuando las erupciones son violentas, como producto de gran contenido de gases en el magma (material fundido a temperaturas altas), el cual, además, se halla en el interior del sistema volcánico a presiones bastante mayores que la presión atmosférica; entonces, cuando la presión a la cual está el magma, por cualquier razón, es liberada, ocurre la despresurización o explosión violenta. Este tipo de erupción produce una columna o chorro vertical que lleva fragmentos de material fundido o magma y de rocas pre-existentes en las paredes del conducto por donde ocurre la erupción, así como gases calientes; todos estos materiales, en su proceso de enfriamiento, se mezclan con el aire que es calentado por contacto. La explosión puede lanzar verticalmente los fragmentos más finos, hasta alturas de varias decenas de kilómetros y los más pesados hasta unos mil metros de altura.

Cuando la columna de erupción es generada, toma la forma de un hongo por efectos convectivos y, cuando no puede ser sustentada más, los fragmentos comienzan a caer de tres formas diferentes:

- Los fragmentos más finos, polvo, ceniza y lapilli volcánicos, son llevados por el viento, en la dirección hacia la cual sopla, hasta distancias que dependen de la fuerza que lleve y la cantidad de material que deba transportar. Las partículas más gruesas, lapilli y ceniza, se depositan sobre el cono y las más finas fuera del cono volcánico hasta miles de kilómetros de distancia. El tamaño de estos fragmentos es menor de 64 mm y puede ser tan fino como para formar aerosoles que(pueden dar varias vueltas al planeta.

Los mayores efectos negativos, causados por piroclastos transportados por el viento son: Enterramiento, colapsamiento de estructuras por acumulación sobre ellas, problemas respiratorios, quemaduras, contaminación de aguas y pastos, oscurecimiento, daños a maquinaria, obstáculos para tráfico vehicular, problemas a la aeronavegación. La mejor manera de evitar algunos daños es

eludiendo las áreas de mayor acumulación de partículas, limpiando techos para que no colapsen, usar máscaras y pañuelos húmedos para no respirar las partículas que se encuentran en el aire, dar forraje limpio al ganado, cubrir la maquinaria para impedir la entrada de partículas a su interior, no usar rutas aéreas cercanas a volcanes en erupción y conocer la dirección en que el viento lleva los piroclastos, no consumir agua contaminada.

- Los fragmentos muy gruesos, llamados bloques y bombas, son proyectados balísticamente y, casi todos, caen sobre el cono volcánico, contribuyendo a su crecimiento. Las distancias máximas conocidas a que han sido enviado este tipo de proyectil balístico es de 15 km; sin embargo, casi la totalidad de los volcanes no superan los 11 km de distancia. El tamaño de los proyectiles balísticos comienza en los 64 mm y puede alcanzar varios metros de diámetro. Los daños que pueden causar los proyectiles balísticos son el impacto y las quemaduras. El impacto puede ser mortal o incluso, dañar infraestructura sólida (varias toneladas sobre una estructura, por sólida que sea, causarán daños). Las quemaduras pueden ser graves pues, los fragmentos pueden caer en estado de incandescencia. Lógicamente, la combinación de impacto y quemadura será más grave.
- Cuando los fragmentos son muy gruesos o el poder de la explosión no es demasiado violento, no se forman columnas muy altas y prácticamente todo el material piroclástico cae sobre la cima del cono volcánico para, luego, viajar altas velocidades por sus flancos hacia las partes bajas del volcán; también, se puede formar una columna de erupción muy alta y colapsar su parte más baja y pesada, cayendo sobre el cono volcánico y esparciéndose sobre sus flancos a altas velocidades. Estos procesos generan lo que se denomina flujos piroclásticos, los cuales son masas de aire caliente que hace de fluido a los piroclastos y viaja arrasando todo a su paso. La velocidad de un flujo piroclástico puede oscilar entre 30 y 350 km/h, dependiendo de su volumen y temperatura. Un flujo piroclástico puede generar desde volúmenes pequeños, hasta decenas de kilómetros cúbicos (gran parte de las rocas que forman el Altiplano de Popayán se formaron por flujos piroclásticos).

Los flujos piroclásticos son los productos volcánicos más peligrosos, por eso, la mejor manera de evitar sus efectos negativos es eludiendo sus dominios, es decir, no construyendo allí asentamientos humanos, ni industria e infraestructura básicas.

#### 3.4.1 Caída de Piroclastos

La presencia de fragmentos de pómez de hasta 10 cm en su mayor diámetro sobre la superficie del CVNH, así como la ocurrencia de depósitos piroclásticos con pómez, confirman que se ha presentado actividad piroclástica. Es necesario explicar que así los fragmentos de pómez no hayan sido encontrados *in situ*, éstos pertenecen a la actividad del CVNH pues, tales tamaños no podrían llegar por ningún medio natural distinto hasta la superficie del edificio volcánico.

Lo anterior lleva a plantear un escenario hipotético consistente en caída de piroclastos a partir de una columna de erupción que no permitió una dispersión amplia; así, los piroclastos transportados por el viento o por proyección balística no llegaría a distancias mayores a las incluidas en círculos de 8.0 km alrededor de cada uno de los posibles centros de emisión. La probabilidad de ocurrencia

debe ser baja, si se tiene en cuenta la escasez de depósitos pues, si fueran abundantes, habrían sido descubiertos sin dificultad, tanto en las zonas distales, como en las proximales.

### 3.4.2 Flujos Piroclásticos

Los flujos piroclásticos pueden originarse por los mecanismos descritos en 3.4 o por colapso de domos o lavas. Este último proceso consiste en la caída, falda abajo, de lavas o domos calientes, por efectos de la gravedad. Al ser emitido un flujo de lava o un domo y quedar en estado de reposo metaestable se facilita la acción de la gravedad, se pueden desprender en estado incandescente y fluir a grandes velocidades por los flancos del volcán, causando daños como los descritos en 3.4.

Los fragmentos de pómez, encontrados sobre el flanco W del CVNH, presentan formas redondeadas, lo cual es un indicio de transporte subaéreo, es decir que, pudieron ser integrantes de flujos piroclásticos generados por colapso de columna de erupción; como se hallaron sueltos sobre el edificio volcánico, es muy probable que pertenezcan a erupciones de las más nuevas del CVNH. Asumiendo todo lo anterior y en vista que, hasta el momento, no han sido encontrados, en áreas alejadas, depósitos de ceniza y pómez, a los cuales podría pertenecer los fragmentos de pómez, se puede deducir que los flujos piroclásticos que los generaron debieron ser pequeños (avance de muy pocos kilómetros desde el centro de emisión).

El escenario hipotético para los flujos piroclásticos por colapso de columna de erupción, sería similar al presentado el 13 de noviembre de 1985 en la erupción catástrofica del volcán Nevado del Ruiz. Su probabilidad de ocurrencia sería baja, por las mismas razones planteadas para el caso de los piroclastos de caída.

Otro escenario posible de generación de flujos piroclásticos, por colapso de domos o lavas, haría que sus productos se distribuyeran por las faldas del volcán, de manera similar a las lavas antiguas; igualmente, su probabilidad de ocurrencia sería baja pues, depósitos de este tipo aparecen preferencialmente hacia el comienzo de la historia del volcán; sin olvidar que la evolución conocida de los productos del volcán es hacia facies muy viscosas, lo cual favorecería la formación de domos, potenciales generadores de este tipo de flujo piroclástico.

Para la amenaza por flujos piroclásticos se hizo simulación de ellos siguiendo la metodología de Sheridan (1996), tanto para la modelación en 2d, como en 3d, obteniéndose los resultados siguientes:

- Distancia alcanzada por los flujos: 3.1 - 8.5 km.
- Tiempo de viaje de los flujos: 3.0 - 8.5 min.
- Velocidades máximas alcanzadas por los flujos: 80 - 140 m/s.

### 3.5 AMENAZA POR LAHARES

Quizás, la mayor peligrosidad del CVNH esté dada por la presencia de un casquete glaciar en su cima, el cual, ante cualquier tipo de erupción, podría fundirse parcialmente y, así, generar lahares

(flujos de lodo) que transitarían, exclusivamente, por los valles de las corrientes que nacen en el mismo casquete glaciar, es decir, gran parte de la microcuenca del río Símbola y la del río Páez, a partir de la desembocadura de la quebrada Verdún. El río Símbola drena el 48% del casquete glaciar, mientras el río Páez el 52 %.

Hasta el momento, se conoce de la presencia de depósitos de flujos de lodo y de escombros, así como de avalanchas de escombros en las zonas proximales y distal del CVNH; sin embargo, no han diferenciados los depósitos de origen volcánico de aquellos producidos como efectos secundarios de sismos.

Con los escenarios propuestos para la generación de lahares (flujos de lava y flujos y caída de piroclastos), se hizo modelación cuyos resultados no se consideran satisfactorios, tanto por las limitaciones de los modelos, como por la falta de información suficiente para alimentarlos.

### 3.5.1 El Casquete Glaciar

Según Pulgarín y otros (en prensa), el área cubierta por el casquete glaciar del CVNH es de 13.39 km<sup>2</sup> y el retroceso del Glaciar Mayor, desde 1961, hasta enero de 1995, fue 364.08 m en la horizontal y de 110.3 m en la vertical, indicando un retroceso promedio de 10.7 m/año (89 cm/mes) en la horizontal y de 3.24 m/año (27 cm/mes) en la vertical. Esto nos indica que la peligrosidad del CVNH, por generación de flujos de lodo de origen volcánico está disminuyendo pues, su casquete glaciar se está haciendo menor.

Si a la anterior información se le adiciona un estimativo de espesor promedio de 55 m, basado en las observaciones de campo, se obtiene un volumen estimado de hielo de 0.82 km<sup>3</sup> (820 millones de metros cúbicos) (Pulgarín y otros, en preparación).

### 3.5.2 Escenario por Flujos de Lava

Del conocimiento actual del CVNH, se puede decir que las erupciones de lava son los escenarios más probables de generación de lahares. Para la modelación, fuera del volumen y del área del casquete glaciar, se tuvo en cuenta los siguientes datos, para la obtención de hidrogramas, elaborados por el ingeniero Gustavo Silva (comunicación escrita):

- Temperatura de emisión de las lavas: 750° - 850°C.
- Las áreas glaciares máximas, cubiertas por flujos de lava, de las denominadas nuevas, serían del orden de 0.88 km<sup>2</sup>.
- Los volúmenes máximos de lava serían del orden de 0.144 km<sup>3</sup>.
- Tasas de emisión de lavas andesíticas: 10 m<sup>3</sup>/s.
- Si la erupción fuera continua y el caudal estable, duraría 24 horas.

- Las lavas serían emitidas por un sólo punto, en la cima volcánica y sería dispersada, tanto por el W, como por el E.
- La fusión del hielo comenzaría al iniciarse la erupción.
- Los caudales máximos esperados serían del orden de  $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Engorde por captura de material sólido: 100%.

Los tiempos máximos de arribo de la primera ola del lahar, a los sitios más importantes, sería el siguiente:

- Tálaga: 132 min
- Belalcázar: 161 min
- Cohetando: 191 min
- Guadualejo: 195 min

### 3.5.3 Escenario por Actividad Piroclástica

Como se explicó en 3.4.2, los flujos piroclásticos por colapso de columna de erupción podrían ser pequeños y generar lahares de manera similar a los del Nevado del Ruiz, de noviembre 13 de 1985; éste ofrece un escenario con las características siguientes, base para la obtención de hidrogramas del flujo (Silva, comunicación escrita, 1996):

- El deshielo podría iniciarse 5 minutos después del comienzo de la erupción.
- La erupción estaría compuesta por varios pulsos y duraría un máximo de 45 minutos.
- Sería fundido  $0.0169 \text{ km}^3$  de hielo (16.9 millones de metros cúbicos), equivalente a una disminución de 1.3 m de espesor del hielo.
- Los caudales máximos esperados serían del orden de  $27.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Los tiempos de arribo de la primera ola del lahar, a los sitios más importantes, serían los siguientes:

- Tálaga: 53 min
- Belalcázar: 71 min
- Cohetando: 88 min
- Guadualejo: 92 min
- Ricaurte: 99 min

Para los dos escenarios propuestos, se considera canales que no sufrirían represamiento y el modelo ha sido diseñado para crecientes y flujos originados por lluvias y aumentos de caudales producidos por fuentes diferentes a la fusión de una capa de hielo al ser sometida al paso de o cubrimiento por materiales volcánicos calientes. Por estas razones y las dificultades de todos los

modelos ideados para simular flujos de lodo o de escombros por fusión de hielo causada por erupciones volcánicas (Scott, comunicación oral, 1996), los resultados de las simulaciones sólo deben tenerse en cuenta como órdenes de magnitud que permitan elaborar planes de contingencia y de desarrollo urbano en líneas gruesas, tratando de ser mas bien conservadores.

Los represamientos traen como consecuencias principales la superación de las cotas de inundación, en algunos sitios, el retardo en la llegada de algunas ondas, la disminución temporal del caudal, mientras ocurre el represamiento y el aumento de los caudales luego de eliminada la presa. Los mayores problemas tendrían que ver con daños en áreas localizadas fuera de la zona de amenaza.

Las alturas máximas de inundación o paso de la superficie del flujo, sobre el fondo del cauce, serían las siguientes:

- Tóez: 27 m.
- Tálaga: 32 m.
- Avirama: 23 m.
- Belalcázar: 22 m.
- Cohetando: 28 m.
- Guadualejo: 18 m.
- Ricaurte 23 m.

#### 3.5.4 Escenarios con el Modelo Mud Flow

Este modelo fue traducido, adaptado y aplicado por Raigosa y Pulgarín (1996 y 1997) para el caso del CVNH, obteniéndose los resultados siguientes:

- Caudal máximo de 13,000 m<sup>3</sup>/s.
- Velocidad promedio de flujo: 20 km/h.
- Volumen del flujo piroclástico: 7,600,000 m<sup>3</sup>
- Volumen de material erodado: 1,000,000 m<sup>3</sup>.
- Máxima altura de inundación: 40 m en Belalcázar. Aprox. 20 m. en Cohetando y Guadualejo. En Ricaurte: máx. 40 m . En Arnazazu: máx. 20 m.

Este modelo, a pesar de estar diseñado para fusión de hielo y nieve por ocurrencia de flujos piroclásticos (Mizuyama and Miyamoto, 1992; Yamashita and Miyamoto, 1992), presenta las siguientes limitaciones para su aplicación en el Complejo Volcánico Nevado del Huila:

- La simulación del flujo inicia en la confluencia de los ríos Páez y Símbola.
- El sector simulado es de pendiente muy baja, lo cual disminuye las velocidades del flujo.
- El modelo topográfico digital a escala 1:25.000 no da el detalle requerido y fueron utilizadas bases topográficas anteriores al Sismo de Páez..
- Las celdas de la malla de simulación no utiliza la mejor configuración geométrica, limitando en algunos sitios el avance del flujo.

- La conversión por medios digitales de los datos de altura en cada celda induce a errores al aproximar a 50 m (precisión del mapa base), cada uno de los puntos de altura.

### 3.5.5 Limitaciones y Consideraciones sobre la Zonificación por Lahares

A las limitaciones expuestas para las simulaciones de lahares, podemos sumar la relacionada con los cambios continuos que ocurren en el cauce de los ríos Páez y Símbola, en la búsqueda del nivel de base perdido como consecuencia del Sismo de Páez; esto se manifiesta en cambios en la profundidad y forma del cauce, ya sea por efectos erosivos o por depositación de materiales; estos cambios alcanzan el orden métrico. Ésto lleva a perder los esfuerzos que pueden llegar a hacerse en aras de la precisión cuando son levantados perfiles topográficos detallados que son utilizados en los modelos de simulación.

Lo inmediatamente anterior, sumado a lo expresado como limitaciones de los modelos de simulación, lleva a tomar decisiones sobre criterios para la zonificación por flujos de lodo, las cuales se pueden resumir en lo siguiente:

- Los resultados presentados deben ser considerados solamente como referencia de los correspondientes órdenes de magnitud y no como datos precisos.
- Para la elaboración del mapa se tiene en cuenta el escenario máximo resultante de cualquiera de las simulaciones.
- De la altura de Aranzazu, aguas abajo, se toma los datos de Cepeda y otros (1986), debido a que las simulaciones no cobijaron estas áreas y los cambios en el cauce del río no fueron sustanciales.

### 3.5.6 Zonificación por Lahares en Belalcázar: Consideraciones

Teniendo en cuenta la zonificación y las recomendaciones del INGEOMINAS (1995a), la población ribereña del río Páez que debe tratarse con especial cuidado es Belalcázar; fuera de ser el centro poblado más importante. Irlanda, Tóez, Wila y Cohetandiyó se encontraban en zonas donde se recomienda no construir viviendas y dichas zonas no ameritaron estudios detallados.

La situación de Belalcázar, en el trayecto desde la desembocadura del río Símbola hasta la salida de la población en dirección a La Plata (a la altura del Matadero Viejo), respecto de la posibilidad de ser afectada por un flujo de lodo o lahar proveniente de una erupción en el Complejo Volcánico Nevado del Huila, se analizó teniendo en cuenta los aspectos siguientes:

- Las dos (2) simulaciones digitales que fueron corridas muestran similitudes en lo referente a alturas de flujo en su paso por Belalcázar. El análisis fue hecho con perfiles en escalas entre 1:2000 y 1:25.000, especialmente 1:4000 en la horizontal y 1:2000 en la vertical, así como los resultados e interpolaciones en planta. Se trabajó con seis (6) perfiles localizados así:

1. Entre Avirama y la desembocadura del río Símbola.

2. A la altura del hospital viejo.
3. A la altura del helipuerto utilizado durante la emergencia.
4. A la altura de la manzana inmediatamente el SW del parque principal.
5. A la altura del río El Salado.
6. A la salida hacia La Plata.

- La presencia de terrazas a diferentes niveles. Estas terrazas representan actividad fluvial y de flujos a lo largo de la historia geológica del valle del río Páez; desde muy antiguas y altas, causadas por avalanchas de escombros, hasta muy bajas, algunas de origen fluvial; lógicamente, la mayoría de tales terrazas representan flujos de lodo y de escombros.
- La morfología del cauce del río, la cual es gobernada por la presencia de las antecitadas terrazas, marcando dos sectores diferentes. El primero estrecho y confinado hasta la zona de desembocadura del río El Salado y el segundo, amplio y poco confinado, hasta la salida hacia La Plata.
- La zona afectada por el flujo de escombros causado por el Sismo de Páez de 1994.

Los resultados de los análisis llevaron a obtener las conclusiones siguientes:

- Como el cauce (canal) del río Páez está gobernado por los diferentes niveles de terrazas, los flujos de lodo que avancen por allí estarán controlados por los taludes de tales terrazas.
  - La altura de las terrazas inmediatamente aledañas al cauce permite considerar los dos sectores, a lo largo del cauce y tomar como zona de amenaza la suma de las dos (2) áreas siguientes, tomando como referencia los bordes externos de la marca del flujo de escombros (“:avalancha”) del Sismo de Páez de 1994:
1. Sector primero: Área comprendida bajo la línea resultante de medir 5.0 m verticales sobre los bordes de la “avalancha” de 1994.
  2. Sector segundo: Área comprendida bajo la línea resultante de medir 2.0 m verticales sobre los bordes de la “:avalancha”.

Esta zonificación significa que el escenario esperado resultaría de la acción de un incremento del 25% en volumen del flujo, en relación con el flujo de escombros de junio de 1994. Lo ideal sería que las líneas límite de esta zona de amenaza fueran materializadas con árboles, mojones u otros medios.

### 3.6 OTRAS AMENAZAS

#### 3.6.1 Sismos Volcánicos

Los sismos de origen volcánico, en su gran mayoría, son sólo detectados instrumentalmente y unos pocos pueden ser sentidos por humanos. De la experiencia que se tiene en los volcanes del planeta, se espera que si causan daños directos, éstos ocurran sólo sobre el edificio volcánico; las magnitudes máximas esperadas pueden ser del orden de 5.5 grados en la Escala de Richter (igual magnitud que el terremoto de Popayán de 1983) pero, normalmente no superan los 4.0 grados.

Para el caso del CVNH, los límites del edificio volcánico están enmarcados por la quebrada Verdún, hasta su desembocadura en el río Páez y por el río Páez, hasta la desembocadura de la quebrada Quindao; por la quebrada Quindao, hasta su desembocadura en el río Páez y; por los afluentes derechos del río Símbola, hasta la cota 2300 m (Figura 3).

#### 3.6.2 Gases Volcánicos

Los gases de origen volcánico pueden causar problemas de salud a las personas y animales que entren en contacto con éstos, especialmente por daños en el sistema respiratorio. Los gases se dispersan sobre las faldas volcánicas, especialmente en las depresiones.

Otro problema que causan los gases volcánicos es la corrosión de metales por contacto directo o por lluvias que atraviesan las estelas de gas y los llevan a la superficie terrestre; esto puede ocurrir también lejos del edificio volcánico. Los aviones y helicópteros pueden sufrir problemas de corrosión en sus equipos, cuando atraviesan la estela gaseosa.

### 3.7 ZONIFICACIÓN

Lo ideal para producir un mapa de amenaza volcánica es tener el conocimiento más completo posible sobre su geología, geomorfología, estilo eruptivo, estratigrafía y evolución magmática, sumado a la información entregada en los procesos de vigilancia e investigación que permitan conocer características y comportamiento interno y externo del sistema volcánico. Esto lleva al conocimiento de la evolución pasada del volcán y cómo es su comportamiento actual, para poder prever cómo puede ser en el futuro. Es muy difícil llegar a ese estado del conocimiento y entre más larga sea la historia de un volcán, más complejo será obtenerlo y así poder evaluar la amenaza potencial. En volcanes considerados peligrosos, no se puede pretender llegar al conocimiento exhaustivo, antes de obtener la evaluación de la amenaza volcánica, herramienta para la prevención de desastres. Por esto, ningún volcán tendrá un mapa de amenaza definitivo y tales mapas deben mejorarse, a medida que se conozca más sobre la historia geológica y el comportamiento actual del volcán.

Para el caso del CVNH, luego de los estudios hechos para elaborar la Segunda Versión de mapa de amenaza, se obtuvo un gran avance en el conocimiento del Complejo pero, al tiempo, se abrieron

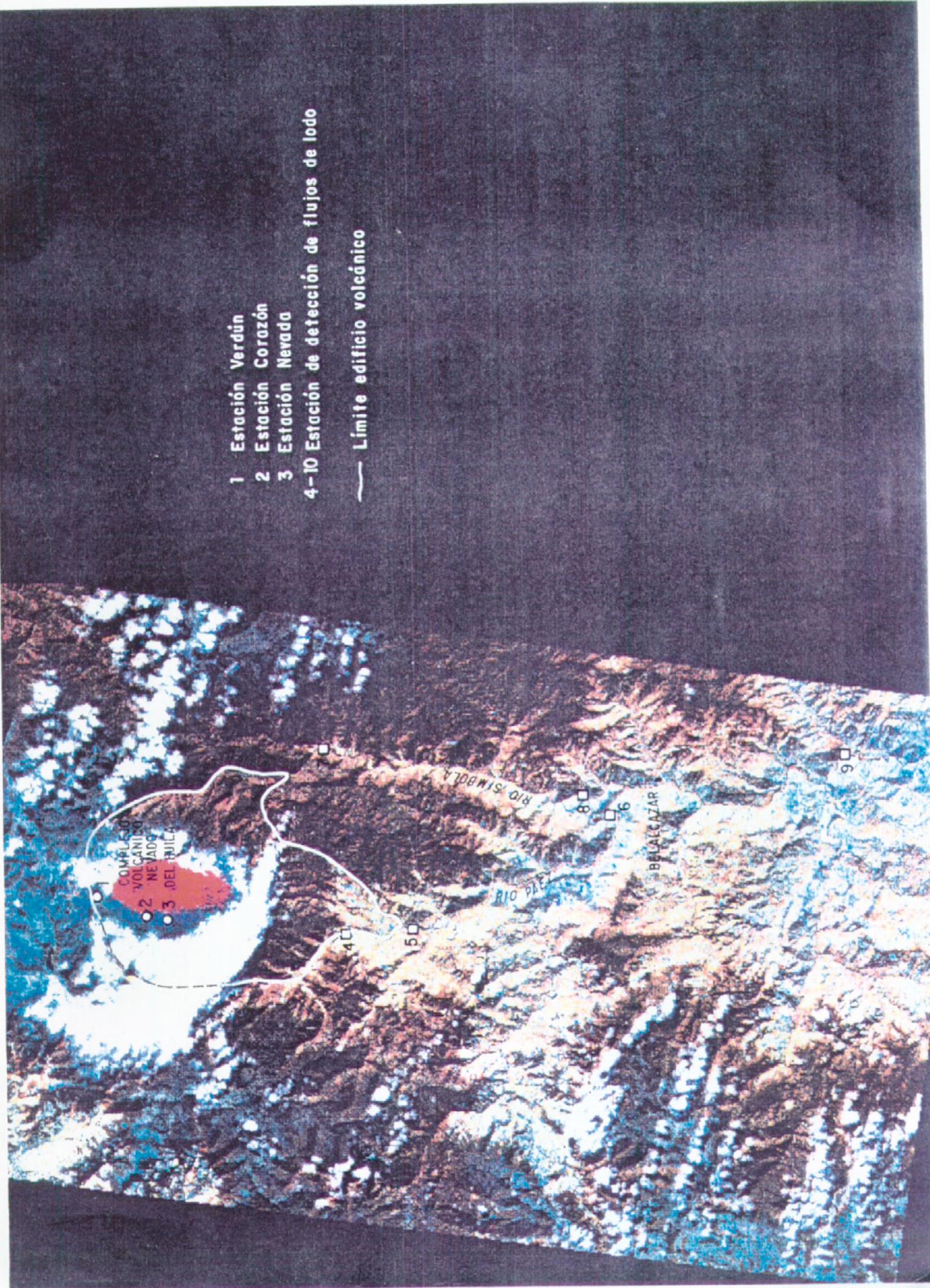


FIGURA 3. Complejo Volcánico Nevado del Huila: redes de vigilancia y límites del edificio volcánico.

nuevos interrogantes sobre su complejidad, identificando problemas que deben ser resueltos en el futuro, para poder llenar los vacíos de conocimiento que aún subsisten.

Luego de coleccionar, evaluar, analizar e interpretar la información disponible sobre el Complejo Volcánico Nevado del Huila, se elaboró un mapa de amenaza volcánica, segunda versión (ver Anexo). Para la selección de las diferentes zonas, se tuvo en cuenta los puntos enumerados en 3.2 y las consideraciones siguientes:

### 3.7.1 Zona de Amenaza Alta

Para incluir un área en la zona alta, debe corresponder a uno o más de los items siguientes:

- Zonas de amenaza por las lavas nuevas originadas en los picos Norte y Central. Estas zonas fueron calculadas teniendo en cuenta que pueden avanzar por cauces y depresiones topográficas, hasta cerca de 5.0 km, a partir del foco de emisión, con un espesor de 40 m. Son el tipo de erupción con mayor probabilidad de ocurrencia.
- Zonas de amenaza por lahares pues, fuera de sus efectos arrasantes, son el tipo de producto con mayor probabilidad de ocurrencia, ya que cualquier erupción los puede generar (Anexo)..
- Zona comprendida en los primeros 5 km, a partir de los centros de emisión. En esta área, por su extremada cercanía a los centros eruptivos, existe una probabilidad alta de ser afectada, fuera de los flujos de lava, por flujos y caídas piroclásticas, por sismos y por gases volcánicos.

### 3.7.2 Zona de Amenaza Media

Para incluir un área en la zona media, debe llenar uno o más de los items siguientes:

- Zonas de amenaza por lavas nuevas originadas en el Pico Sur, con recorridos máximos de 5 km.
- Zonas de amenaza por lavas antiguas originadas en todos los picos.
- Zona de amenaza por flujos y caídas de piroclastos (entre 5 y 8 km, contados a partir de los centros de emisión).

Cada uno de los tipos de erupción considerados acá, posee una probabilidad de ocurrencia baja. Sin embargo, se considera que sus áreas de influencia son zonas de amenaza media debido a que varias pueden ocurrir simultáneamente y que están localizadas sobre el edificio volcánico, a distancias relativamente cortas de los posibles centros de emisión; además, pueden sufrir los rigores de sismos y emisiones gaseosas.

### 3.7.3 Zona de Amenaza Baja

Comprende zonas del edificio volcánico no incluidas en amenaza alta y media, las cuales pueden ser afectadas por:

- Lavas pre-Huila, más allá de lo contemplado en 3.7.2 .
- Flujos piroclásticos originados a partir del colapso de domos o lavas.
- Piroclastos de caída.
- Avalanchas de escombros

#### 4. REDES DE VIGILANCIA VOLCANICA

Las redes de vigilancia tienen como fin principal hacer seguimiento de la actividad volcánica, como mecanismo proveedor de información adquirida a partir de técnicas diferentes (sismología, deformación, geoquímica), permitiendo conocer el comportamiento del sistema volcánico. Este conocimiento es utilizado para detectar anomalías que permitan dar alertas tempranas y oportunas sobre crisis volcánicas, en general, y sobre erupciones volcánicas, en particular; al mismo tiempo, sirven para ayudar a construir escenarios para los planes de contingencia ante emergencias volcánicas. Dada su importancia, las redes de vigilancia volcánica deben ser confiables, de tecnologías adecuadas, de funcionamiento continuo y operadas por personal de alta calificación.

La vigilancia instrumental del Complejo Volcánico Nevado del Huila se inició a finales de 1986, cuando fue instalado temporalmente un sismógrafo en cercanías de Verdún. En el momento, se hace vigilancia continua, desde un centro especializado, el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSP, INGEOMINAS Unidad Operativa Popayán), desde donde, además, se vigila a la Cadena Volcánica de Los Coconucos y al Complejo Volcánico Sotará, con tecnologías modernas y adecuadas, a cargo de un grupo de expertos en el tema.

##### 4.1 SISMOLOGIA

En la actualidad, en el OVSP, por medios telemétricos, se recibe las señales de tres sensores localizados en los flancos W y N del CVNH (Figura 3):

##### ESTACIONES SISMOLOGICAS EN EL CVNH

NOMBRE ESTACION	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE	ALTURA (m.s.n.m.)	DISTANCIA AL PICO CENTRAL
Corazón	02°56'57"	76°03'19"	4000	2.2 km
Nevada	02°55'55"	76°03'17"	4345	1.8 km
Verdún	02°57'47"	76°01'44"	4415	3.8 km

El Sismo de Páez impulsó la modernización y consolidación del OVSP pues, fue durante la emergencia cuando se adquirió e instaló el Sistema de Adquisición de Datos en Tiempo Real (SADTR), el cual permite, fuera de la recepción y análisis de los registros por medios analógicos, que se haga por medios digitales.

Para poder obtener una red que permita localizar correctamente los sismos volcánicos del CVNH, en el espacio y en el tiempo, se requiere localizar una cuarta estación hacia la mitad del flanco E. Dicha estación será instalada en 1998, luego de hacer las pruebas de sitio y adecuaciones requeridas para un buen mantenimiento y funcionamiento continuo. Con las tres (3) estaciones existentes se está localizando las fuentes sismogénicas de origen volcánico para, posteriormente, hacer su caracterización.

En la actualidad, como las ondas de radio que portan las señales sismológicas no pueden llegar directamente al OVSP, se repiten en el sitio llamado La Meseta, ubicado en la cordillera Occidental, al N de Los Farallones de Cali.

#### 4.2 DEFORMACION

Otra de las tecnologías de vigilancia volcánica consiste en detectar cambios en la superficie de los edificios volcánicos; para esto, se hace diseño de redes y técnicas apropiadas para cada volcán. Para el caso del CVNH, dadas las condiciones climáticas y acceso muy difíciles, limitantes para la y aplicación de la mayoría de técnicas y para la entrada de equipos de medición, sólo se piensa utilizar la inclinometría electrónica.

La red, inicialmente, constará de dos estaciones, localizadas en las partes altas de los flancos E y W, en los mismos sitios de las estaciones sismológicas Corazón y la que falta por instalar al E. La información será recibida teleméricamente en el OVSP, donde será registrada y procesada digital y analógicamente.

#### 4.3 DETECCION DE FLUJOS DE LODO

Los volcanes que tienen en sus cimas lagos cratéricos o casquetes glaciares, poseen una peligrosidad adicional, debida a su potencialidad para generar flujos de lodo como consecuencia de la fusión del casquete o de la evacuación del agua de los lagos, durante las erupciones.

El Complejo Volcánico Nevado del Huila es uno de tales casos y uno de los mecanismos más efectivos para dar alertas tempranas y oportunas sobre la formación de lahares y sobre su tránsito a largo de los valles de los ríos y quebradas que nacen en tales cúspides volcánicas, es una red de detectores de flujos de lodo.

El CVNH requiere el diseño y materialización de una red que permita alertar oportunamente a los pobladores vecinos de las riveras de los ríos. Para el caso del volcán Nevado del Ruiz, se materializó una red de detectores que transmitía la información al Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Manizales o algunos lugares poblados en peligro; la tecnología de los equipos es japonesa y los equipos mismos muy costosos; su mantenimiento ha sufrido muchos inconvenientes porque los proveedores salieron del mercado. Debido a lo anterior, para solucionar el caso del CVNH, se exploró en observatorios vulcanológicos que utilizaran detectores de flujos de lodo, para conocer características de equipos que se pudieran adaptar a las condiciones del Complejo. También, se explora la posibilidad de crear tecnología propia para subsanar la debilidad que significa depender.

De las tecnologías actualmente usadas, una de las más sencillas y baratas, es la utilizada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), denominada AFM (Acoustic Flow Monitor). Se trata de un sensor (geófono) y un microprocesador que pueden detectar flujos de lodo y crecientes, sobre la base de la composición de frecuencias, amplitud y duración de la señal que produce la

vibración del flujo de lodo o agua; la detección del flujo la puede hacer hasta 1.0 km antes que este pase por la estación y puede estimar los volúmenes de agua o lodos que están pasando; con arreglos adecuados en cada estación, también se puede saber la velocidad a la cual pasa el flujo y permite saber la velocidad entre estaciones, pudiendo calcularse los tiempos de arribo de la onda a sitios conocidos. Las estaciones transmiten los mensajes de alerta a la(s) base(s) pre- establecida(s).

Entre 1996 - 1997 se instaló y operó una de estas estaciones en el río Palo, como fase experimental previa de prueba para cuando se vaya a materializar la red en el CVNH.

Una red de detectores de lahares por erupciones del CVNH deberá contar, al menos, con estaciones que transmitan la alerta a Belalcázar, principal centro poblado en las márgenes del río Páez; desde allí, se debe transmitir rápidamente la alerta a otros sitios en peligro, tales como Tálaga, Avirama, Cohetando, Puerto Valencia y a la Central Hidroeléctrica de Betania (CHB). La alerta también debe llegar al OVSP para, desde allí, alertar al Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (SNPAD).

La red debe contar, al menos, con siete (7) estaciones, localizadas:

- Un kilómetro aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Ansayó, la cual dona sus aguas al río Páez un poco más de 2.0 km aguas arriba de Irlanda. Sirve para detectar los flujos originados en toda la mitad W del CVNH y se encuentra a distancia prudente de Belalcázar para que llegue la alerta oportunamente.
- Unos 500 m aguas abajo de la desembocadura de la quebrada Quindao al río Páez; es relativamente cercana de la anterior y serviría para el cálculo de velocidad del flujo que viene por el Páez y para detectar flujos que se hayan originado en el SSE del CVNH.
- Sobre el río Páez, unos 2.0 km antes de la desembocadura del río Símbola. Permitirá confirmar el estimado de tiempo de arribo de la primera onda a Belalcázar, así como calcular la velocidad del flujo.
- Sobre el río Símbola, en la cota 2200 m; permitirá detectar los flujos originados en casi toda la mitad E del CVNH y alertar a los pobladores vecinos del valle del río Símbola o descartar el tránsito de los flujos por dicho río.
- Sobre el río Símbola, unos 4.0 km antes de su desembocadura al río Páez; permitirá conocer la velocidad del flujo y calcular su arribo a sitios de interés, especialmente al río Páez y a Belalcázar.
- Sobre el río Páez, unos 3.0 km aguas abajo de confluir el Ríonegro. Permitirá conocer velocidad del flujo y calcular tiempos de arribo al río Magdalena y a la CHB.
- Sobre el río Páez, unos 2.0 km aguas abajo de la confluencia del río La Plata; permitirá corregir velocidades del flujo y calcular tiempos de arribo al río Magdalena y a la CHB.

Las primeras estaciones, permitirán transmitir alertas oportunas a la CHB para que se disparen los planes de contingencia previstos para éstos casos. Fuera de las alertas, la red puede suministrar información sobre posibles represamientos e inundaciones y sobre volúmenes del flujo que pueden llegar a la CHB, facilitando el ajuste de las medidas de los planes de contingencia.

La localización precisa de las estaciones sólo se sabrá al momento de su materialización, luego de haber superado las etapas de prueba de sitios y de transmisión - recepción de señales.

La efectividad de la red estará dada por la calidad de las comunicaciones entre las estaciones y las bases de recepción, entre éstas, y de éstas últimas con las redes de alerta. Si las comunicaciones fallan, todo el objetivo de la red se perderá y los costos en pérdidas pueden ser muy altos. En esto se debe ser muy cuidadoso pues, la cuenca del río Páez es muy problemática para las comunicaciones terrestres, debido a lo encañonado de los valles y las dificultades aumentarán, si se tiene en cuenta que las estaciones AFM estarán localizadas en el cañón.

En 1996 se tuvo el entrenamiento de tecnólogos del OVSP para que puedan ensamblar e instalar los AFM y se adquirió lo fundamental de las estaciones necesarias para materializar la red, todo con la colaboración del Cascades Volcano Observatory (USGS).

La materialización de la red de detectores de flujos de lodo debe ser sincrónica y armónica con la red o sistema de alerta, en la cual debe involucrarse administraciones municipales (Páez, Inzá, La Plata, ...), corporaciones regionales y la Central Hidroeléctrica de Betania (CHB).

#### 4.4 OTROS

Otras herramientas de vigilancia son utilizadas en los volcanes activos del planeta. Para el caso del Complejo Volcánico Nevado del Huila, se lista algunas aplicables:

- Observación visual directa, hecha en sobrevuelos con helicópteros, desde vuelos comerciales y desde tierra en las misiones de campo para mantenimiento de estaciones y durante las tareas de los guardabosques del Parque Nacional Natural Nevado del Huila.
- Estudios sobre el casquete glaciar para saber áreas, volúmenes, retroceso. Pulgarín y otros (en prensa) realizaron un trabajo basado en técnicas de fotogrametría analítica para el casquete glaciar del CVNH entre 1961 y 1995; encontraron un área glaciar de 18.86 km<sup>2</sup> para 1961 y de 13.39 km<sup>2</sup> para 1995, lo que indica una pérdida de 5.47 km<sup>2</sup> en ese período, es decir el 29% de su área; bajo algunas condiciones, extrapolaron los datos de pérdidas de área glaciar, obteniendo que ésta podría desaparecer hacia el año 2056 o antes.

La pérdida de volumen glaciar en el período 1961 - 1995 fue 273.8 millones de m<sup>3</sup> y la pérdida media de altura de la superficie glaciar fue de 14.5 m. Pulgarín y otros (en preparación) han realizado cálculos del volumen glaciar con base en los datos areales de 1995 y estimativos de espesor tomados directamente en el campo alrededor del casquete glaciar del CVNH; el resultado

fue de 823 millones de  $m^3$ , el cual, luego de restarle el volumen por porosidad y grietas, da un volumen neto en agua líquida del orden de 650 millones de  $m^3$ .

- Estudios geoquímicos de aguas de fuentes termales fueron iniciados en 1996 y para los gases volcánicos se iniciará en 1998.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como resultado del presente estudio, podemos concluir lo siguiente:

- El Complejo Volcánico Nevado del Huila es poseedor de una historia geológica larga y compleja, consignada en registros geológicos mayores de 3.7 millones de años.
- A pesar que no se conoce registros de erupciones históricas en el CVNH, si se conoce su actividad fumarólica, fuentes de aguas termales, registros instrumentales de actividad sísmológica, así como presencia de lavas no afectadas por acción glaciaria, lo cual permite definir al Complejo como un sistema volcánico activo, predominantemente efusivo.
- El carácter del complejo lo da la existencia concatenada de varios edificios volcánicos y una posible estructura caldérica previa. Hasta el momento, han sido identificados seis (6) focos eruptivos: Pico Norte, La Cresta, Pico Central, Pico Sur, Morro Negro y El Cerrillo.
- De manera amplia, se observa un desarrollo evolutivo del CVNH, siguiendo un sentido SN. Las lavas más nuevas han sido emitidas desde los picos Central y Norte; son andesitas de dos piroxenos y viscosas..
- La ocurrencia del Sismo de Páez señaló la necesidad de actualizar la versión del mapa de amenaza elaborada en 1986 por el INGEOMINAS y de estrechar y modernizar la vigilancia volcánica, tareas del Observatorio Vulcanológico y Sísmológico de Popayán.
- Para la evaluación de la amenaza volcánica, basados en la historia evolutiva del Complejo, se considera que, en caso de producirse una erupción, la mayor probabilidad es que sea para flujos de lava nuevos, en la mitad N del edificio volcánico, desde los picos Central o Norte.
- Como el CVNH se halla cubierto por un casquete glaciario de 13.39 km<sup>2</sup>, en caso que ocurra cualquier erupción, el contacto de sus productos calientes con el hielo lo fundirá e inducirá la generación de lahares. Tales lahares transitarán por la parte de la cuenca del río Páez, cuyas corrientes nacen en el casquete glaciario.
- Según los resultados de las simulaciones, la primera ola de los lahares que viajen por el cauce del río Páez, arribará a Tálaga en 53 minutos, a Belalcázar en 71 minutos, a Cohetando en 88 minutos, a Guadualejo en 92 minutos y a Ricaurte en 99 minutos, en caso de que el hielo haya sido fundido por un flujo piroclástico similar al ocurrido en el Nevado del Ruiz el 13 de noviembre de 1985.
- Como producto final de la evaluación de amenaza, se obtuvo un mapa, escala 1:100.000 el cual presenta tres zonas: Amenaza Alta, Amenaza Media, Amenaza Baja.

- Se presenta un mapa de amenaza por lahares (amenaza alta), escala 1:25.000, entre Irlanda y Aranzazu.
- Se establece para Belalcázar una zona de amenaza por lahares conformada por dos sectores; un sector primero comprendido entre las desembocaduras del río Símbola y el río El Salado, y uno segundo entre el río El Salado y la salida hacia La Plata (a la altura del Matadero Viejo).
- Para el sector primero la zona comprende lo afectado por la “avalancha” del año 1994 y 5.0 m adicionales en la vertical. Para el segundo sector, lo afectado por la “avalancha” del 94 y 2.0 m adicionales en la vertical.
- En el OVSP se hace la vigilancia volcánica, registrando, procesando e interpretando la información con tecnologías modernas, tanto por medios analógicos, como digitales.
- En la actualidad, se cuenta con tres estaciones sismológicas localizadas en la parte alta de las faldas del Complejo. En 1998 se completará la red con una cuarta estación localizada al E.
- También, en 1998 se materializará una red de vigilancia de cambios en la superficie volcánica; serán dos inclinómetros electrónicos que, al igual que las estaciones sismológicas, enviarán sus señales al OVSP por medios telemétricos.
- Se diseñó una red de detectores de flujos de lodo, compuesta por siete (7) estaciones que darán alerta oportuna sobre la ocurrencia de lahares o crecientes.

Para hacer actualización del mapa de amenaza, se recomienda lo siguiente:

- Continuar con los estudios geológicos que permitan resolver a detalle la estratigrafía del Complejo Volcánico Nevado del Huila, así como precisar el conocimiento acerca de actividad piroclástica moderna y la evolución magmática.
- Efectuar estudios glaciológicos para conocer al detalle lo relacionado con dinámica y cuencas glaciares y los volúmenes de hielo.
- Ejecutar estudios sobre depósitos superficiales, fuente sólida potencial para conformar los lahares.
- Para que la red de detección de flujos de lodo surta los mejores efectos como herramienta de prevención de desastres, se recomienda garantizar de manera eficiente el funcionamiento continuo para la transmisión de datos, desde las estaciones, hasta las bases de recepción en Belalcázar y Popayán (OVSP) y de estas últimas con los sitios en peligro, especialmente Tálaga, Avirama, Cohetando, Guadalejo, Ricaurte, Puerto Valencia y la CHB.
- La red de detectores de flujos de lodo debe ir conectada a una red de alarmas en la cual deben estar interesados administraciones municipales, corporaciones regionales y la CHB.

- Por último y como medida más importante, se requiere hacer socialización del conocimiento contenido en el presente informe, entre autoridades y habitantes de la cuenca del río Páez.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- CEPEDA, H., MÉNDEZ, R., MURCIA, L. A. y VERGARA, H., 1986. Mapa Preliminar de Riesgos Volcánicos Potenciales del Nevado del Huila. INGEOMINAS, Informe 1981.
- CEPEDA, H. y CORREA, A., 1995. Evaluación de Amenaza y Vigilancia Volcánica del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Convenio Ingeominas - Corporación Nasa Kiwe. Ingeominas, Unidad Operativa Popayán. 30 p.
- CORREA, A. y CEPEDA, H., 1995. Informe Preliminar sobre la Geología del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Informe interno, Ingeominas, Unidad Operativa Popayán, 74 p.
- GUARNIZO, F. y PULGARIN, B., 1997. Volcán Nevado del Huila: Primera Travesía Alrededor de su Casquete glaciar. Informe interno, Ingeominas, Unidades Operativas Manizales y Popayán. 19 p.
- ICEL, 1983. Estudio de Prefactibilidad Técnica de los Aprovechamientos Hidroeléctricos Ríos Páez y La Plata : Volumen IV, Geología y Sismología. Contrato No. 4257. Bogotá.
- INGEOMINAS, 1994. El Sismo de Páez, Cauca., del 6 de Junio de 1994, Evaluación de Emergencia. Informe presentado al SNPAD de Colombia. Santafé de Bogotá. 73 p.
- INGEOMINAS, 1994a. El Sismo de Páez (Cauca) del 6 de Junio de 1994. Boletín Mensual de Sismos, Volumen 2, No. 6. Santafé de Bogotá. pp. 13.
- INGEOMINAS, 1995a. Zonificación para Usos del Suelo en la Cuenca Alta del Río Páez. Convenio Ingeominas - Corporación Nasa Kiwe. Popayán. 61 p.
- INGEOMINAS, 1995b. Geología y Geomorfología de la Parte Central del Valle del Río Páez entre Irlanda y su Confluencia con el Eío Magdalena. Informe interno de avance. Ingeominas, Santafé de Bogotá. 79 p.
- INGEOMINAS, 1995c. Procesamiento e Interpretación Geológica de Imagen de Satélite Landsat TM de la Cuenca del Río Páez. Informe interno, Ingeominas, unidad operativa Popayán. 44 p.
- MIZUYAMA, T and MIYAMOTO, K., 1992. Method of Predicting Regions Prone to Sediment Disasters on Volcanoes. In Volcanic SABO Engineering Course Textbook. JICA, Japan.
- YAMASHITA, S. and MIYAMOTO, K., 1992. Numerical Simulation Method of Debris Movement with a Volcanic Eruption. Japan - U. S. workshop on snow avalanche, landslide, debris flow prediction and control. In Volcanic SABO Engineering Course Textbook. JICA, Japan.

- PULGARIN, B. 1995. Estudio Fotogramétrico del Glaciar del Nevado del Huila. Informe interno, Ingeominas, Unidad Operativa Popayán. 46 p.
- PULGARIN, B., JORDAN, E. y LINDER, W. (En prensa). Nevado del Huila (Colombia): Cambio Glaciar entre 1961 y 1995. Memorias VII Congreso Colombiano de Geología. Ingeominas. Santafé de Bogotá
- PULGARÍN, B., CEPEDA, H. y CORREA, A. (En preparación). Geología del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Ingeominas, unidad Operativa Popayán.
- PULGARÍN, B y CORREA, A. (En revisión). Depósitos Fragmentarios no Consolidados sobre el Edificio del Complejo Volcánico Nevado del Huila. Ingeominas, unidad Operativa Popayán.
- RAIGOSA, J. y PULGARIN, B., 1996. Simulación Preliminar de un Flujo de Lodo del Nevado del Huila, sobre el río Páez, desde su Confluencia con el río Símbola. Memorias del Taller de amenaza volcánica y simulación de flujos piroclásticos. Ingeominas, Unidad Operativa Popayán.
- RAIGOSA, J. and PULGARIN, B., 1997. Primary Lahar Simulation through the Paez River. (Poster). 1997 International Meeting of Colima Volcano. Abstracts. Mexico.
- SCOTT, K. (Comunicación oral, 1996).
- SILVA, G. (Comunicación escrita, 1996). Informe de la Simulación. Ingeominas, Unidad Operativa Popayán.
- STUEBEL, A., 1906. Die Volkanverge Von Colombia. Dresden.