

Evaluación integral del riesgo volcánico del Cerro Machín, Colombia

Recibido: 18 de abril de 2012. Aceptado en versión final: 25 de agosto de 2012.

Leonel Vega Mora*

Fernando Javier Díaz**

Resumen. El volcán Cerro Machín (VCM) se encuentra situado en la Cordillera Central de Colombia. Por la composición química, magnitud y extensión de sus erupciones pasadas, se reconoce como un volcán explosivo de gran potencial de daño, cuya actividad futura podría afectar intensamente durante mucho tiempo (meses hasta años) una región muy estratégica para la economía del país, que cubre áreas pertenecientes a los departamentos de Tolima, Quindío, Valle del Cauca y Cundinamarca, en las cuales habitan cerca de un millón de personas.

En este artículo se muestra la metodología y resultados del estudio de “Evaluación Integral del Riesgo del Cerro Machín – Colombia”, realizado durante 2009 por el Grupo PIGA de Investigación en Política, Información y Gestión Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, tomando como punto de partida el estudio de “Evaluación de la Amenaza Volcánica Potencial del Cerro Machín” adelantado en el 2002 por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

En consecuencia, se genera y ajusta una nueva ecuación para la determinación del riesgo, basada en la valoración de índices de amenaza intrínseca e índices de vulnerabilidad, los primeros en función del grado de intensidad, duración, extensión y acumulación de las amenazas, y los segundos, en función del grado de exposición espacial y temporal de los

elementos (sociales, económicos, institucionales y ecosistémicos) y de su capacidad de respuesta intrínseca y extrínseca ante las amenazas. Con estas ecuaciones y mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG), se realiza para cada escenario de análisis considerando la modelación geoespacial del riesgo a nivel de cada pixel cartográfico del área territorial de estudio. En esta modelación se integra toda la información territorial del área en estudio, lo que permite obtener, de acuerdo con el marco lógico de evaluación preestablecido, tanto el riesgo total sobre cada elemento expuesto, como el riesgo total generado por cada amenaza. Finalmente, se genera para cada escenario de análisis considerado, tanto los Mapas de Riesgo Total como los Mapas de Rutas de Escape y Zonas de posibles Albergues para la reubicación transitoria y/o definitiva de población y centros poblados.

La zona específica de estudio se ubica totalmente en el Departamento del Tolima. Involucra aproximadamente una población de 22 000 personas y un área de 80 000 hectáreas correspondientes al área rural y urbana del municipio de Cajamarca y los corregimientos de Toche, Tapias y Coello-Cocora, Gamboa, Laureles y La Florida del municipio de Ibagué (CORTOLIMA, 2006).

Palabras clave: Amenaza volcánica, vulnerabilidad, riesgo.

* Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Grupo PIGA de Investigación en Política, Información y Gestión Ambiental, Ciudad Universitaria, Edif. 406 (IEI), Oficina 239, Calle 39 A, No. 20-35, Bogotá, Colombia. E-mail: Lvegamora@unal.edu.co

** Consultor independiente, Cr 52, No. 22-30 T1, Bogotá, Colombia. E-mail: fjdiaz40@hotmail.com

Comprehensive volcanic risk assessment of Cerro Machín, Colombia

Abstract. The Cerro Machín Volcano (CMV) is located in the Central Cordillera of Colombia. Given the chemical composition, magnitude and extent of past eruptions, it is recognized as a explosive volcano with potential of great damage, which could affect future activity intensely for an extensive period (months to years) in a very strategic region for the country's economy, which covers areas belonging to the departments of Tolima, Quindío, Valle del Cauca and Cundinamarca, where about 1 million people live.

This paper presents the methodology and results of the "Integral Volcanic Risk Assessment of Cerro Machín - Colombia", made in 2009 by the Policy, Information and Management Research Group (PIGA) of the Engineering Faculty, National University of Colombia, taking as its starting point the study "Assessment of potential volcanic threat from Cerro Machín" presented earlier in 2002 by the Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Consequently, a new equation for risk assessment was generated, based on the assessment of intrinsic threat indices and indices of vulnerability; the first based on the degree of intensity, duration, extent and accumulating threats, and second, depending on the degree of exposure of the spatial

and temporal elements (social, economic, institutional and ecosystem) and their responsiveness to intrinsic and extrinsic threats (Vega, 2005). With these equations and using Geographic Information Systems (GIS), for each analysis scenario considered geospatial modeling level-risk mapping of each pixel of the territorial area of study was performed. This modeling integrates spatial information across the study area, which allows one to obtain, according to a predetermined logical evaluation framework, both the total risk exposure of each element, as well as the overall risk generated by each threat. Finally, for each stage of analysis both the Total Risk Maps as Escape Routes Maps, and potential areas for relocation hostels transient and/or permanent population and population centers are generated.

The specific area of study is located entirely in the Department of Tolima involving a population of approximately 22 000 people and an area of 80 000 hectares in the rural and urban area of the municipality of Cajamarca and the villages of Toche, Tapias and Coello-Cocora, Gamboa, Laureles and Florida of Ibagué (CORTOLIMA, 2006).

Key words: Volcanic threat, vulnerability, risk.

LAS AMENAZAS DEL VOLCÁN MACHÍN Y SU ÁREA DE INFLUENCIA

El volcán Cerro Machín presenta un cono volcánico conformado por un complejo de anillos piroclásticos, un cráter de 2.4 km de diámetro mayor taponado por domos con actividad fumarólica y su edificio volcánico está construido directamente sobre rocas metamórficas y su altura varía entre 100 y 300 m. Ha producido seis periodos eruptivos (cuatro plinianos y dos por colapso de domos) durante el Holoceno, el último hace 800 años; ha producido domos, columnas de erupción mayores de 20 km de altura sobre el cráter, flujos y oleadas piroclásticas y grandes volúmenes de depósitos de lahares (flujos de escombros e hiperconcentrados) que cubren un área un poco mayor a 1 000 km² hacia el este, en el valle del río Magdalena. Los productos del volcán Cerro Machín tienen composición dacítica (INGEOMINAS, 2002).

El escenario futuro considerado para evaluar la amenaza volcánica tiene como referencia la historia eruptiva pasada del Machín, el estado y geomorfología actual del volcán y el escenario eruptivo del

volcán Pinatubo (Filipinas) en 1991. Se tomaron en cuenta las similitudes entre los dos volcanes, pero con el mismo peso sus diferencias. Los parámetros considerados fueron ambiente geotectónico, edad e historia eruptiva, composición y volumen de productos emitidos, eventos detonantes de erupciones, estilo eruptivo, tiempos de reposo entre erupciones, volúmenes emitidos, formas y procesos geomorfológicos y clima (*Ibid.*).

El escenario eruptivo potencial tiene en cuenta: *a)* un sistema volcánico con un magma rico en volátiles, taponado en superficie por domos, con zonas de debilidad alrededor del tapón, las cuales podrán ser aprovechadas para iniciar la limpieza del conducto, la producción de la(s) erupción(es) principal(es), la destrucción de los domos y el subsecuente destaponamiento del cráter; *b)* la presencia de la cuenca confinada del río Coello que encausará la gran mayoría de los flujos y las oleadas piroclásticas, por valles estrechos y profundos, con corrientes caudalosas que favorecerían la formación de lahares (*Ibid.*).

En orden de su potencialidad de causar daños, las zonas de amenaza volcánica del Cerro Machín

determinadas por el INGEOMINAS (2002) son zonas de amenaza por flujos piróclásticos, zonas de amenaza por flujos hiperconcentrados (avalanchas o flujos de lodo) y zonas de amenaza por caída de piroclastos, como se muestra en la Figura 1.

Teniendo en cuenta que el estudio de INGEOMINAS no evalúa las amenazas por sismicidad volcánica ni sus efectos colaterales por deslizamientos, los cuales pueden ocasionar daños importantes sobre la infraestructura y viviendas (Ochiai *et al.*, 1997; Pomonis *et al.*, 1999; Zobin *et al.*, 2009), se complementa el estudio con la evaluación de dichas amenazas para los escenarios de inicio de crisis y erupción.

UNA NUEVA ECUACIÓN DEL RIESGO

Tradicionalmente la definición de riesgo hace referencia a la probabilidad de que a un elemento determinado le ocurra algo nocivo o dañino. La expresión conceptual más sencilla para expresar el riesgo ha sido $R=A \cdot V$, donde A=Amenaza, entendida como condición latente derivada de la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno físico de origen natural, socio-natural o antrópico no intencional, que puede causar daño al elemento o grupo de elementos expuestos, y V: Vulnerabilidad, entendida como la susceptibilidad o característica del elemento o grupo de elementos de ser dañados total o parcialmente por el impacto de la amenaza (Cardona, 2001).

Para efectos de este estudio, la evaluación integral del riesgo constituye un proceso con enfoque holístico, sistémico y ambiental y por lo tanto, la definición del riesgo hace referencia a la probabilidad de que a un medio ambiente determinado o a un segmento o elemento del mismo (ecosistema, sector público, sector económico, sociedad civil), le ocurra algo nocivo o dañino. En este contexto, y luego de adelantar múltiples y sucesivos ensayos y aproximaciones conceptuales y metodológicas, se logró ajustar una nueva expresión para la determinación, a manera de índice, del Riesgo frente a amenazas volcánicas, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R = \dot{A}^a \cdot V^b \quad (1)$$

donde:

R: Índice de riesgo.

\dot{A} : Índice de amenaza intrínseca.

V: Índice de vulnerabilidad.

$$a = [b - c \cdot \ln(V)]$$

b y c: coeficientes de forma en el ajuste de la familia de curvas correspondiente a la ecuación de riesgo (1), como se muestra en la Figura 2

EL ÍNDICE DE AMENAZA INTRÍNSECA

La amenaza intrínseca es un índice que representará adimensionalmente y bajo una misma escala, las características intrínsecas de las diferentes amenazas volcánicas consideradas. Se fundamenta en la cuantificación de la energía de una amenaza que se aplica a un sitio de interés o unidad de análisis determinada en relación con su potencial de daño (Cardona, 2005). El índice de amenaza intrínseca se determina para cada amenaza j de cada escenario de análisis en función de su probabilidad de ocurrencia y de sus características intrínsecas de intensidad, duración, extensión y acumulación, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\dot{A}_j = P(0,6 \cdot I_j + 0,2 \cdot D_j + 0,1 \cdot E_j + 0,1 \cdot A_j) \quad (2)$$

La calificación de cada una de las características que determinan el índice de amenaza intrínseca se realiza con base en las categorías de valoración del Cuadro 1.

EL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

La vulnerabilidad estará asociada a la capacidad de un elemento o grupo de elementos de no ser dañado total o parcialmente por el impacto de una amenaza (Wilches, 1993). El índice de vulnerabilidad se determina para cada elemento expuesto i frente a cada amenaza j, en función del grado de exposición espacial y temporal, y de la capacidad de respuesta intrínseca y extrínseca de los

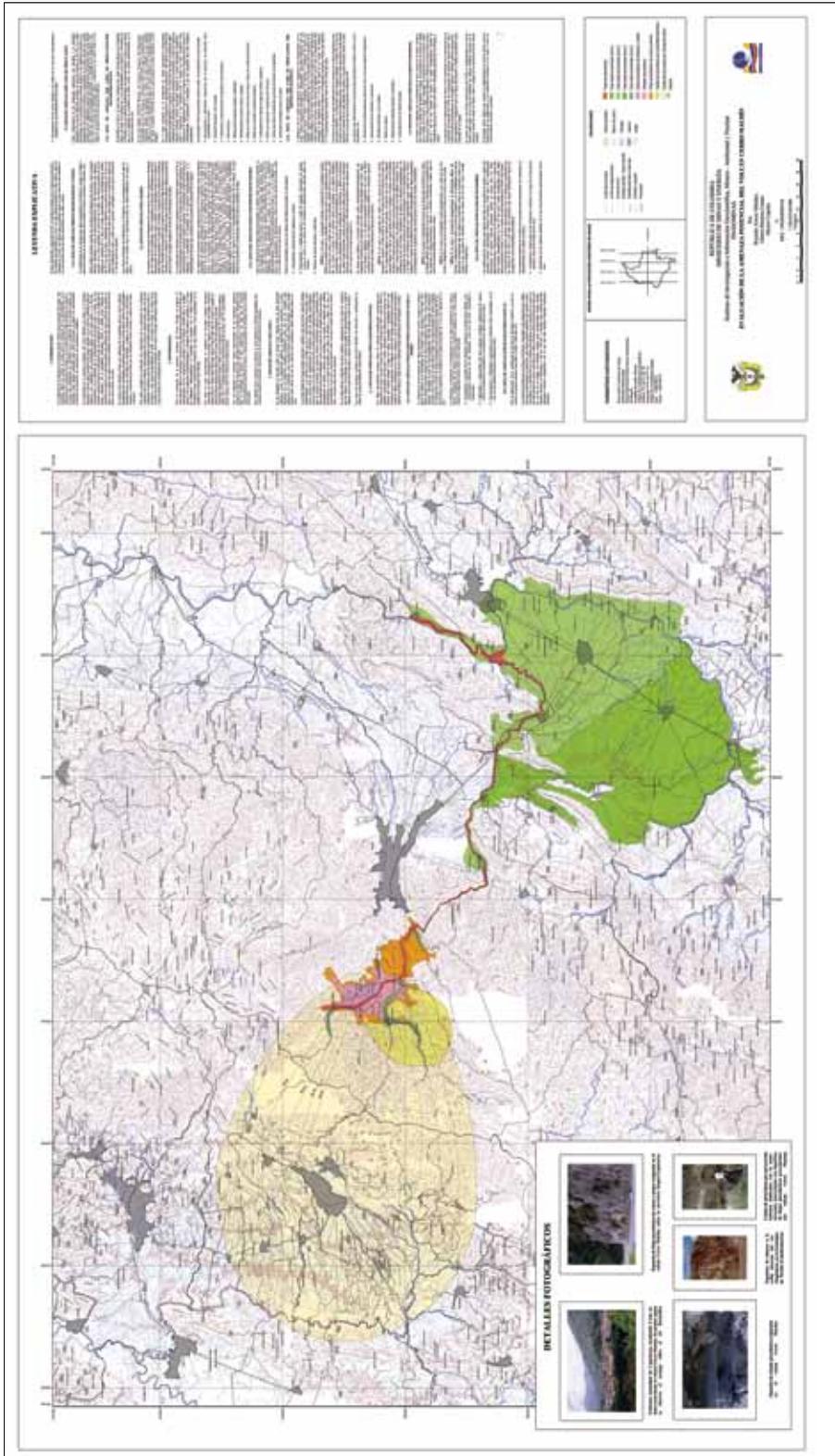


Figura 1. Evaluación de la amenaza potencial del volcán Cerro Machín.

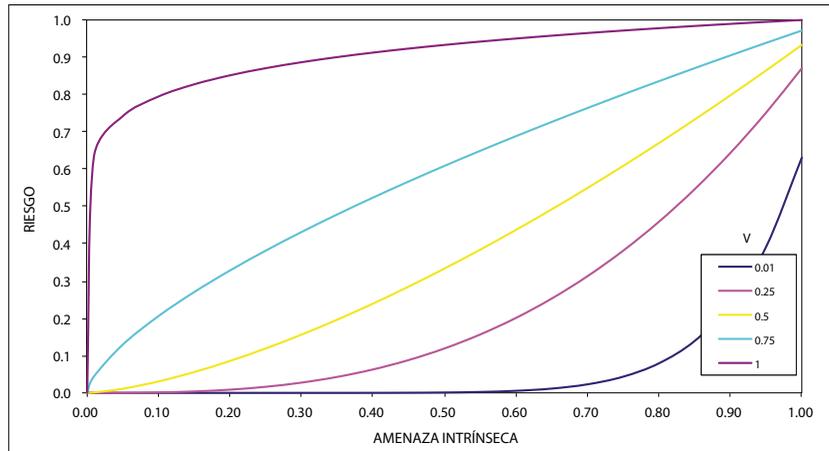


Figura 2. Familia de curvas en la ecuación de riesgo.

Cuadro 1. Valoración del Índice de Amenaza Intrínseca

A	AMENAZA INTRÍNSECA	Índice de amenaza calculado para cada amenaza j en las unidades de análisis. Depende de su probabilidad de ocurrencia y de sus características intrínsecas de intensidad, duración, extensión y acumulación.	Irrelevante	0 - 0.24
			Moderada	0.25 - 0.49
			Severa	0.50 - 0.74
			Crítica	0.75 - 1.00
P	PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	Probabilidad de ocurrencia de la amenaza.	Nula	0
			Total	1
I	INTENSIDAD	Cantidad de energía que se manifiesta, en la unidad de análisis, esta relacionada con el potencial destructivo de la amenaza.	Baja	0.001
			Media	0.01
			Alta	0.1
			Muy alta	1
D	DURACIÓN	Tiempo que dura la amenaza ocurriendo, en la unidad de análisis. Inmediato (menor a horas), medio plazo (horas a días), largo plazo (días a semanas).	Inmediato	0.01
			Medio Plazo	0.1
			Largo Plazo	1
E	EXTENSIÓN	Cubrimiento que tiene la amenaza en la unidad de análisis.	Nula	0
			Parcial	0.1-0.9
			Total	1
A	ACUMULACIÓN	Una amenaza es acumulativa si se manifiesta en la unidad de análisis varias veces y esto aumenta su potencial de daño.	Simple	0.1
			Acumulativa	1

elementos expuestos. Se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V = EE \cdot ET \cdot (1 - CRI)^{1 + \alpha \cdot CRE} \quad (3)$$

donde:

EE: Exposición Espacial.

ET: Exposición Temporal.

CRI: Capacidad de Respuesta Intrínseca.

CRE: Capacidad de Respuesta Extrínseca.

α : Coeficiente de forma utilizado en el ajuste de la familia de curvas correspondiente a la ecuación de vulnerabilidad (3), (Figura 3).

La calificación de cada una de las características que determinan el índice de vulnerabilidad se realiza con base en las categorías de valoración que se describen en el Cuadro 2.

LA CAPACIDAD DE RESPUESTA INTRÍNSECA

Ésta será entendida como un índice que representa adimensionalmente la capacidad de cada elemento expuesto (ecosistema, construido, población) de reaccionar y/o resistir físicamente al impacto de una amenaza y de recuperarse posteriormente por sí mismo de la afectación causada.

La CRI se fundamenta en el concepto de resiliencia, cuya definición del término proviene del campo de la física, refiriéndose “a la capacidad de un material de recobrar su forma original después de haber estado sometido a altas presiones” y que en su acepción más general se le describe como “elasticidad” (Cerisola, 2003). Posteriormente, por múltiples similitudes y analogías, el concepto de resiliencia se extendió al campo de los sistemas naturales y sociales, pero en todo caso, denotando siempre “el grado con el cual un sistema se recupera

o retorna a su estado anterior ante la acción de un estímulo externo” (Chamochumbi, 2005).

En consecuencia, la CRI dependerá de cada tipo de amenaza en particular y será calculada de manera independiente para cada elemento expuesto en función de una valoración ponderada de atributos, según la siguiente ecuación genérica.

$$CRI = \frac{\sum P_n \cdot W_n}{P_n \text{ máx}} \quad (4)$$

donde:

P_n : Valoración de atributos según características de cada elemento expuesto.

W_n : Factor de ponderación.

La capacidad de respuesta intrínseca de ecosistemas (CRIe) es definida como la capacidad de un ecosistema de reaccionar y resistir físicamente al impacto de una amenaza y de recuperarse posteriormente por sí mismo de la afectación causada. Depende de cada tipo de amenaza en particular y puede ser calculada independientemente para cada elemento expuesto del ecosistema (ríos; páramos, bosques y rastrojos; pastos y cultivos) en función de una valoración ponderada de descriptores y atributos relacionados con el estado ambiental de los ecosistemas en términos de la cantidad, calidad

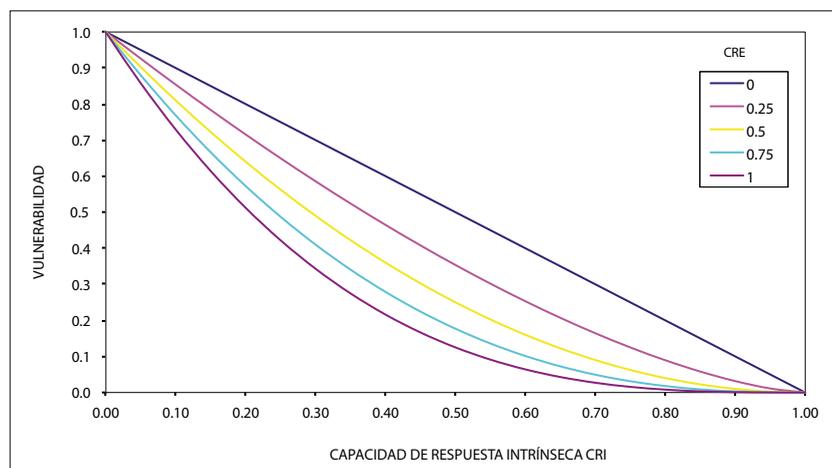


Figura 3. Familia de curvas en la ecuación de vulnerabilidad.

Cuadro 2. Valoración del Índice de Vulnerabilidad

V	VULNERABILIDAD	Índice de Vulnerabilidad, calculado para cada elemento expuesto i del medio ambiente frente a cada amenaza j. Está en función del grado de exposición espacial y temporal y de la capacidad de respuesta intrínseca y extrínseca de los elementos expuestos.	Irrelevante	0 - 0.24
			Moderada	0.25 - 0.49
			Severa	0.50 - 0.74
			Crítica	0.75 - 1.00
EE	EXPOSICIÓN ESPACIAL	Grado de exposición espacial del elemento a la amenaza. Se califica de acuerdo con el espacio o área expuesta a la amenaza clasificada en porcentaje, para ello se emplea el SIG.	Ninguna	0.00
			Baja	0.25
			Media	0.50
			Alta	0.75
			Total	1.00
ET	EXPOSICIÓN TEMPORAL	Generalmente la exposición temporal corresponde con la vida útil del elemento. Para escenarios determinísticos, corresponde con el tiempo que dura el elemento expuesto cuando la amenaza ocurre.	Ninguna	0.00
			Horas a días	0.25
			Días a semanas	0.50
			Semanas a meses	0.75
			Permanente	1.00
CRI	CAPACIDAD DE RESPUESTA INTRÍNSECA	Capacidad del elemento expuesto (ecosistema, construido, población) de reaccionar y resistir físicamente al impacto de una amenaza y de recuperarse posteriormente por sí mismo de la afectación causada.	Ninguna	0.00
			Baja	0.25
			Media	0.50
			Alta	0.75
			Muy Alta	1.00
CRE	CAPACIDAD DE RESPUESTA EXTRÍNSECA	Capacidad institucional de gestionar integralmente el riesgo en cumplimiento de las funciones sistémicas básicas de planificación, manejo y evaluación.	Ninguna	0.00
			Baja	0.25
			Media	0.50
			Alta	0.75
			Muy Alta	1.00

y disponibilidad ecológica de bienes y servicios ambientales; el grado de intervención o presión antrópica, en términos del uso y del deterioro ocasionado sobre dichos bienes y servicios ambientales.

La capacidad de respuesta intrínseca de elementos construidos (CRI_c) es definida como la capacidad de un elemento construido de resistir físicamente el impacto de una amenaza y de mantener su funcionalidad luego de la afectación recibida. Depende de cada tipo de amenaza en particular y puede ser calculada para cada elemento construido expuesto (edificaciones, vías terrestres, infraestructuras) en función de la valoración ponderada de descriptores y atributos relacionados con sus

características físico-químicas tales como material constructivo (de la estructura, elementos, base, subbase), la estructura (tipo, entresijos, anclajes), la cubierta (tipo de cubierta), el recubrimiento (tipo de recubrimiento), la rodadura (capa de rodadura), el terreno (suelo, pendiente), los drenajes (cantidad y estado de las obras de drenaje) y el estado general (edad, conservación, daños).

La capacidad de respuesta intrínseca de la población (CRI_p) es definida como la capacidad de una población determinada de reaccionar y resistir físicamente al impacto de una amenaza y de recuperarse posteriormente por sí misma de la afectación causada. Puede ser calculada para un

grupo poblacional expuesto en función de una valoración ponderada de descriptores y atributos relacionados con la planificación (percepción del riesgo, nivel de escolaridad, necesidades básicas insatisfechas, participación en simulacros, participación en comités de emergencia, conocimiento rutas de evacuación y albergues), la operación (distancia óptima de evacuación, tipo y calidad de ruta, población a movilizarse, recurso humano activo y pasivo, limitaciones físicas y/o psicológicas) y la logística (medios de transporte y equipos de comunicación).

LA CAPACIDAD DE RESPUESTA EXTRÍNSECA

Será entendida como un índice que representa adimensionalmente la capacidad institucional de las entidades encargadas de la gestión integral del riesgo de responder ordenada y eficientemente frente a situaciones de emergencia que genere una o varias amenazas determinadas. No depende de las amenazas y por lo tanto se calcula para cada grupo poblacional expuesto (país, departamento, municipio, corregimiento, vereda) de acuerdo con la siguiente ecuación genérica.

$$CRE = \frac{\sum P_n \cdot W_n}{P_n \text{ máx}} \quad (5)$$

donde:

P_n: Valoración de atributos de capacidad institucional.

W_n: Factor de ponderación.

En concordancia con las funciones generales de un Sistema de Comando de Incidentes (SCI), (USAID, 2005), se plantean los siguientes descriptores y atributos para la CRE: planificación (identificación y caracterización de riesgos; planes de emergencia; disponibilidad de rutas de evacuación y albergues; programación y coordinación de simulacros; conformación y coordinación de comités de emergencia). Operación (distancia óptima de asistencia; tipo y calidad de ruta; población a ser

asistida; asistencia social; asistencia médica; asistencia técnica en búsqueda y rescate). Logística (disponibilidad y manejo de suministros; sistema de comunicaciones y alerta temprana; medios de transporte; instalaciones y equipos).

ENFOQUE METODOLÓGICO

El enfoque metodológico utilizado en este estudio es concordante con el marco conceptual previamente descrito. El manejo alfanumérico y geoespacial de la información se realizó a través del uso de herramientas tecnológicas como el Arc Gis y el ArcInfo (IGAC, 2004), con las cuales fue posible la conformación de un SIG específico para el desarrollo del estudio, tal como se esquematiza en la Figura 4.

Lo que sigue en este proceso (luego de la línea roja punteada en la Figura 4), será la evaluación del riesgo para la toma de decisiones en concordancia con la retención y transferencia del riesgo financiero y con el análisis de costo-beneficio (Cardona, 2006), que permita definir lineamientos de política claros, precisos y consensuados de ordenamiento territorial, así como los correspondientes planes de emergencia y de contingencia.

Lo anterior será fundamental en la formulación y/o revisión y ajuste del Plan de Emergencias para el volcán Machín, que deberá sustentarse en los resultados y productos generados en este estudio y que deberá considerar e involucrar en sus análisis, ajustes en los procesos y planes de ordenamiento territorial, así como la revisión y el análisis de los procesos de retención y transferencia del riesgo financiero y, por supuesto, la revisión y el análisis de costo – beneficio en los componentes de prevención y mitigación del riesgo.

EL MARCO LÓGICO DE EVALUACIÓN INTEGRAL DEL RIESGO

Los mapas de riesgo se obtienen siguiendo el marco lógico planteado en los Cuadros 3 y 4 para los escenarios de análisis inicio de crisis y erupción respectivamente.

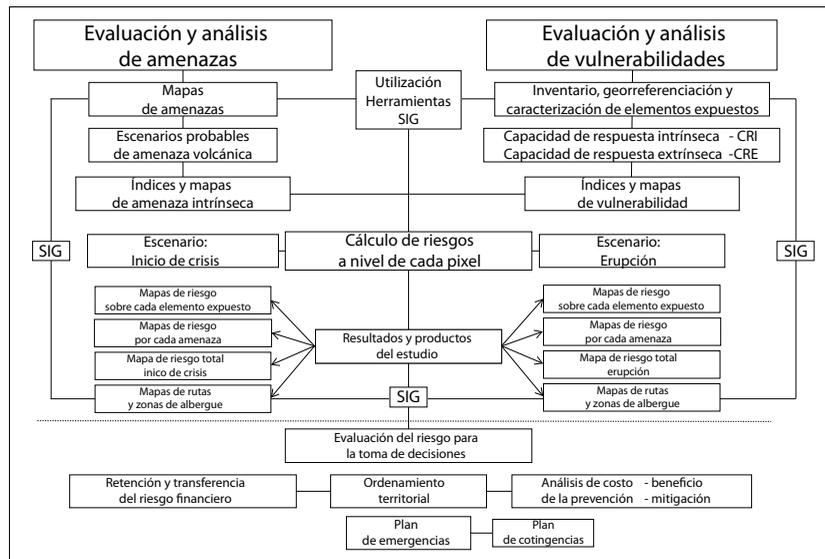


Figura 4. Diagrama metodológico para la evaluación integral del riesgo.

LOS RESULTADOS DEL ESTUDIO

Como consecuencia del marco conceptual y metodológico desarrollado y en aplicación del marco lógico de evaluación integral del riesgo (Cuadros 3 y 4), se obtienen para los dos escenarios de análisis considerados, por un lado, los mapas de riesgo total sobre cada elemento expuesto y los mapas de riesgo total debidos a cada una de las amenazas consideradas, y por otro lado, los mapas donde se definen las rutas de escape y zonas de posible albergues para reubicación transitoria y/o definitiva de población y centros poblados.

MAPAS DE RIESGO TOTAL

De acuerdo con el marco lógico de evaluación de riesgos para cada escenario de análisis considerado, los mapas de riesgo total se obtienen mediante la suma ponderada de los riesgos totales sobre cada elemento expuesto, tal como se muestra en la Figura 5.

De acuerdo con la Figura 5, se puede apreciar de manera general que para el escenario de inicio de crisis, los índices de riesgo total más altos se localizan en las zonas cercanas al edificio volcánico y en los valles y laderas de los ríos Toche y Bermalón. Para el escenario de erupción, los índices de riesgo alto se localizan en las zonas expuestas a los

flujos y deslizamientos. Los índices de riesgo medio a alto se localizan en las zonas expuestas a las caídas, caracterizadas por la presencia de cultivos y viviendas rurales aisladas.

MAPAS DE RUTAS DE ESCAPE Y ZONAS DE POSIBLES ALBERGUES

Pensar en rutas de escape y zonas de posible albergues para reubicación transitoria y/o definitiva de población y centros poblados, implica resolver preguntas relacionadas con ¿cuándo deben producirse las evacuaciones?, ¿a quiénes se debe evacuar?, ¿por dónde y hacia dónde deben ser evacuados?, etc. La respuesta a estos interrogantes constituye un proceso complejo de toma de decisiones que permita definir lineamientos de política precisos, claros y consensuados, que orienten, dinamicen y articulen una gestión integral del riesgo que involucre adecuadamente tanto los procesos de evaluación integral del riesgo, como los de formulación de planes de emergencia, contingencia y mitigación, que garanticen un manejo eficaz y eficiente del riesgo.

Este proceso de toma de decisiones políticas, económicas, administrativas-logísticas, sociales, ambientales y técnicas, puede ser más fácilmente llevado a cabo de manera corporativa y/o democrática si se cuenta con las herramientas y la infor-

Cuadro 3. Marco lógico de evaluación integral del riesgo-escenario inicio de crisis

Elementos Expuestos	P [0-1]	CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS Y VULNERABILIDADES				Riesgo total sobre cada elemento expuesto
		Sismos		Deslizamientos		
Ecosistema	P _e	\dot{A}_s	$R_{es} = f(\dot{A}_s, V_{es})$	\dot{A}_d	$R_{ed} = f(\dot{A}_d, V_{ed})$	$R_e = \sum R_{ej} / \sum R_{(ej)m\acute{a}x}$
		V _{es}		V _{ed}		
Construidos	P _c	\dot{A}_s	$R_{cs} = f(\dot{A}_s, V_{cs})$	\dot{A}_d	$R_{cd} = f(\dot{A}_d, V_{cd})$	$R_c = \sum R_{cj} / \sum R_{(cj)m\acute{a}x}$
		V _{cs}		V _{cd}		
Población	P _p	\dot{A}_s	$R_{ps} = f(\dot{A}_s, V_p)$	\dot{A}_d	$R_{pd} = f(\dot{A}_d, V_p)$	$R_p = \sum R_{pj} / \sum R_{(pj)m\acute{a}x}$
		V _p		V _p		
Riesgo total por cada amenaza		$R_s = \sum (R_{is} \cdot P_i)$		$R_d = \sum (R_{id} \cdot P_i)$		$R_t = \sum (R_i \cdot P_i)$

Cuadro 4. Marco lógico de evaluación integral del riesgo-escenario erupción

Elementos Expuestos	P [0-1]	CARACTERIZACIÓN DE AMENAZAS Y VULNERABILIDADES								Riesgo total sobre cada elemento expuesto
		Caídas		Flujos		Sismos		Deslizamientos		
Ecosistema	P _e	$\frac{\dot{A}_k}{V_{ek}}$	$R_{ck} = f(\dot{A}_k, V_{ck})$	$\frac{\dot{A}_f}{V_{ef}}$	$R_{cf} = f(\dot{A}_f, V_{cf})$	$\frac{\dot{A}_s}{V_{es}}$	$R_{cs} = f(\dot{A}_s, V_{cs})$	$\frac{\dot{A}_d}{V_{ed}}$	$R_{cd} = f(\dot{A}_d, V_{ed})$	$R_e = \sum R_{ej} / \sum R_{(ej)m\acute{a}x}$
Construidos	P _c	$\frac{\dot{A}_k}{V_{ek}}$	$R_{ck} = f(\dot{A}_k, V_{ck})$	$\frac{\dot{A}_f}{V_{ef}}$	$R_{cf} = f(\dot{A}_f, V_{cf})$	$\frac{\dot{A}_s}{V_{cs}}$	$R_{cs} = f(\dot{A}_s, V_{cs})$	$\frac{\dot{A}_d}{V_{ed}}$	$R_{cd} = f(\dot{A}_d, V_{ed})$	$R_c = \sum R_{cj} / \sum R_{(cj)m\acute{a}x}$
Población	P _p	$\frac{\dot{A}_k}{V_p}$	$R_{pk} = f(\dot{A}_k, V_p)$	$\frac{\dot{A}_f}{V_p}$	$R_{pf} = f(\dot{A}_f, V_p)$	$\frac{\dot{A}_s}{V_p}$	$R_{ps} = f(\dot{A}_s, V_p)$	$\frac{\dot{A}_d}{V_p}$	$R_{pd} = f(\dot{A}_d, V_p)$	$R_p = \sum R_{pj} / \sum R_{(pj)m\acute{a}x}$
Riesgo total por cada amenaza		$R_k = \sum (R_{ik} \cdot P_i)$		$R_f = \sum (R_{if} \cdot P_i)$		$R_s = \sum (R_{is} \cdot P_i)$		$R_d = \sum (R_{id} \cdot P_i)$		$R_t = \sum (R_i \cdot P_i)$

mación adecuadas, y deberá considerar e involucrar complementariamente en los análisis, ajustes en los procesos y planes de ordenamiento territorial, en los procesos de retención y transferencia del riesgo financiero, y por supuesto, en los análisis de costo-beneficio de los componentes de prevención y mitigación del riesgo.

Tomando en consideración los mapas de riesgo total para los dos escenarios de análisis considerados (Figura 5), se generan los mapas donde se definen

las rutas de escape y zonas de posible albergues para reubicación transitoria y/o definitiva de población y centros poblados, tal como se presentan de manera dúplex en la Figura 6.

De acuerdo con lo anterior, a continuación se describen algunos aspectos preliminares a considerar en el proceso de evacuación progresiva de las zonas de riesgo.

Escenario de precrisis: de acuerdo con el INGEOMINAS (2002) este escenario corresponde

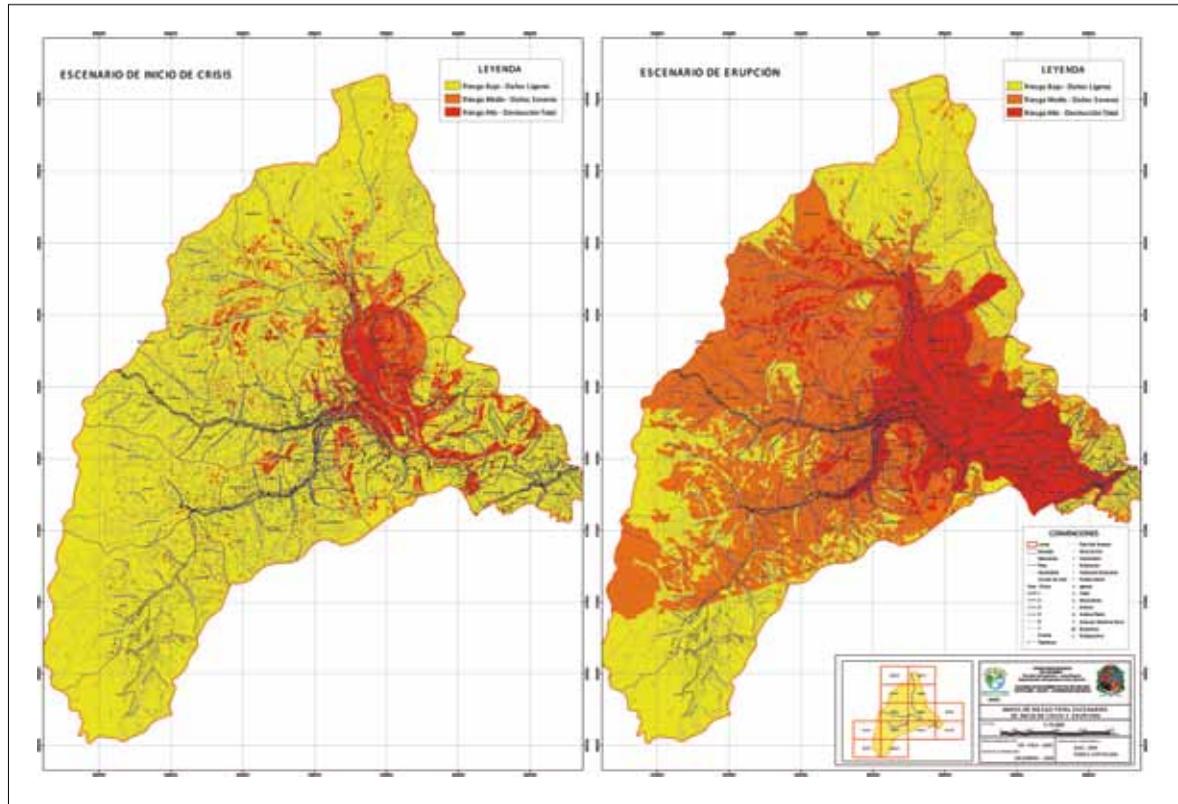


Figura 5. Mapa dúplex de riesgo total-escenarios inicio de crisis y de erupción.

a la situación actual del volcán y puede llegar a tener una duración de varios a cientos de años, en los cuales las amenazas no se materializan. Es caracterizado por fuertes emanaciones de gases y por la eventual sismicidad del edificio volcánico que puede ocasionar algunos deslizamientos importantes en las zonas más susceptibles y llegar a afectar a los pobladores más cercanos y a algunas vías de comunicación. Por las características de este escenario y a la luz del estudio de riesgos realizado, se debería pensar desde ahora en una estrategia de reubicación definitiva de la población asentada en el área de riesgo alto (Figura 5 derecha) y empezar inmediatamente con la participación activa de la comunidad, las tareas de revisión, validación y prueba de los planes de emergencia.

El escenario de inicio de crisis, de acuerdo con el INGEOMINAS (2002), puede tener una duración de horas a semanas previos a una inminente erupción y se caracteriza por el aumento de la sismicidad,

emanaciones de gases y el posible colapso del costado SW del edificio volcánico, ocasionando el represamiento del río Toche y deslizamientos en las zonas cercanas al volcán. Según el mapa total de riesgos en escenario de inicio de crisis (Figura 5 izquierda) los terrenos que comprenden el edificio volcánico y aproximadamente cinco kilómetros a la redonda del cono volcánico se encuentran en riesgo alto. En consecuencia, en este escenario aún se podrían implementar de manera segura todos los esfuerzos y planes de contingencia para la evacuación de personas y para salvar el mayor número de vidas.

El escenario de erupción, de acuerdo con el INGEOMINAS (2002), puede durar de días a semanas y comprende las fases de erupciones menores, tipo blast y principal, y en él se materializan todas las amenazas y el área de afectación es considerable. Según el mapa total de riesgos en escenario de erupción (Figura 5 derecha), una gran parte del área

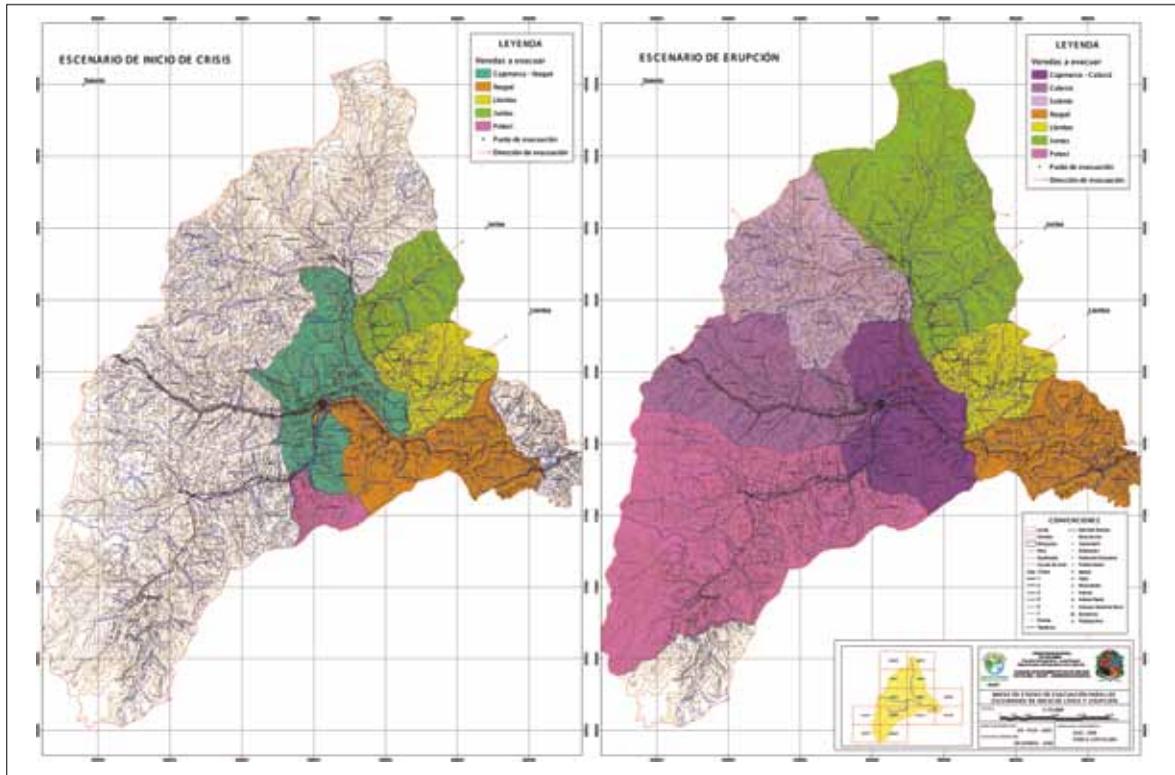


Figura 6. Mapa dúplex de rutas de escape y zonas de posibles albergues. Escenarios de inicio de crisis y de erupción.

en estudio que involucra entre otros elementos, los centros poblados de Cajamarca, Anaime, Toche, Tapias y Coello-Cocora, así como la carretera panamericana en el tramo entre Ibagué y Cajamarca, se encuentran en riesgo alto. En consecuencia, se esperaría que a la ocurrencia de este escenario, se garantice que las poblaciones ubicadas en las zonas de riesgo alto ya hayan sido evacuadas y reubicadas previamente de acuerdo con las rutas y zonas identificadas en el mapa de rutas de escape y zonas de posibles albergues provisionales y/o definitivos y que las poblaciones ubicadas en zonas de riesgo medio a bajo ya hayan sido preparadas para iniciar los procesos de evacuación a los sitios recomendados (Figura 6 derecha).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el estudio se establecen las bases de un nuevo marco conceptual y metodológico para la evaluación integral del riesgo, que además de orientar el desarrollo del estudio permite la generación de herramientas de procesamiento y análisis de información que lo hacen posible.

Según los mapas totales de riesgos para cada escenario de análisis, se evidencia que en el evento de una erupción del volcán Machín, los centros poblados de Cajamarca, Anaime, Toche, Tapias y Coello-Cocora, así como la carretera panamericana en el tramo entre Ibagué y Cajamarca quedarían seriamente afectados.

Según el mapa de rutas de escape y zonas de posibles albergues, se ratifica como sitio adecuado para reubicar las poblaciones de Cajamarca y Anaime el sector de Potosí, siempre y cuando se complemente con el trazado, diseño y construcción

de una nueva vía que comunique desde Ibagué a Potosí y de allí al Quindío, para no dejar aisladas estas poblaciones.

De acuerdo con el mapa de riesgos totales y en cumplimiento del principio de precaución, se recomienda continuar con los procesos de educación y preparación de la población para la emergencia, indicándoles sus rutas de escape y sitios de albergue provisional y/o definitivo. Se considera pertinente empezar desde ya (inmediatamente) el diseño de una estrategia amplia de prevención, que por un lado oriente los procesos de reubicación de los centros poblados mencionados y por otro inicie el diseño, trazado y construcción de una nueva ruta o vía alterna que le dé redundancia operativa a la ruta panamericana actual.

Se recomienda pensar desde ya en declarar y convertir toda la zona circundante al volcán Machín en un Parque Nacional Natural o en su defecto en un Parque Departamental o en un gran Parque de Diversiones, que de manera similar al Parque del Cañón del Chicamocha en Santander, se comunique por un sistema de teleférico entre Cajamarca, el Cerro de San Lorenzo y el Cráter del Machín, y aproveche la riqueza paisajística y las posibilidades geotérmicas del volcán, permitiendo otro tipo de ordenamiento territorial más adecuado a los riesgos que entraña y a su gran potencial ecoturístico, y de paso, la reorientación de recursos para el mantenimiento de las vías de acceso a la zona y el fortalecimiento de la capacidad de gestión del riesgo.

Se llama la atención para que la evaluación integral del riesgo se constituya en el factor determinante en los procesos de ordenamiento territorial y por lo tanto se sugiere la revisión y ajuste de todos los planes de ordenamiento territorial que a la fecha no hayan involucrado dicho factor, especial y prioritariamente en aquellas cuencas, municipios y centros poblados con amenazas naturales evidentes por vulcanismo, remoción en masa, avenidas torrenciales, avalanchas, inundaciones, incendios forestales, etcétera.

Finalmente, se sugiere probar y calibrar el modelo desarrollado en la evaluación del riesgo de otros volcanes del país.

REFERENCIAS

- Cardona, O. (2001), *Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos*, tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- Cardona, O. (2005), *Midiendo lo inmedible. Indicadores de vulnerabilidad y riesgo* [<http://www.desenredando.org/public/omar.html>].
- Cardona, O. (2006), *Evaluación del riesgo de desastre con fines de estimación de pasivos contingentes y déficit fiscal* [<http://www.desenredando.org/public/omar.html>].
- Cerisola, C. (2003), *Resiliencia y Programas Preventivos*, Facultad de Psicología, Universidad del Salvador.
- Chamocho, W. (2005), *La resiliencia en el desarrollo sostenible*, Ecoportal, Net.
- CORTOLIMA (2006), *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Coello*, Acuerdo CORTOLIMA No. 032 de noviembre 9 de 2006.
- IGAC (2004), *Tutorial sobre fundamentos de sistemas de información geográfica* [www.igac.gov.co].
- INGEOMINAS (2002), *Evaluación de la amenaza volcánica potencial del Cerro Machín* (Departamento del Tolima, Colombia), Manizales.
- Ochaia, H., H. Yanase, S. Marsu-ura and Y. Takeuchi (1997), "Landslide initiation mechanism of Bandai Volcano effect of earthquake motion", *Science and Technology Agency, Bandai Volcano, Japan*, pp. 273-283.
- Pomonis, A., R. Spencer and P. Baxter (1999), "Risk assesment of residencial buildings for an eruption of Furnas Volcano, Sao Miguel, the Azores", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, no. 92, pp. 107-131.
- USAID (2005), *Curso Básico de Sistema de Comando de Incidentes*, Manual de participantes, Oficina de Asistencia para Desastres (OFDA), Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID), del Gobierno de los Estados Unidos de América.
- Vega, M. L. (2005), *Hacia la sostenibilidad ambiental del desarrollo: el enfoque sistémico en la formulación, seguimiento y evaluación de las políticas públicas. El caso de la Política Ambiental*, Instituto de Estudios Ambientales – IDEA. ECOE Editores, Universidad Nacional de Colombia.
- Wilches, C. L. (1993), *Disasters and the Environment*, DMT, UNDPUNDRO.
- Zobin, V. M., I. Plascencia, G. Reyes and C. Navarro (2009), "The characteristics of seismic signals produced by lahars and pyroclastic flows: Volcán de Colima, Mexico", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 179, pp. 157-167.