

SIMULACIÓN DE LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI EN SUS DRENAJES DEL LADO NORTE CON EL USO DEL PROGRAMA HEC-RAS

Lenin Rodrigo Carrillo Gallegos

Carrera de Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica del Ejército – Av. Progreso S/N, Sangolquí
Ecuador

RESUMEN

El volcán Cotopaxi con 5897 m.s.n.m., es uno de los volcanes activos más altos del mundo y debido a sus características geológicas, es además, uno de los más peligrosos.

El presente trabajo de investigación pretende demostrar el latente peligro en el cual se encuentran los moradores de las ciudades de San Rafael, Sangolquí y demás poblados ubicados a lo largo de la cuenca norte del volcán, debido principalmente, a los lahares producidos por el mismo al momento de generarse una erupción volcánica.

Es por eso que, mediante la utilización del software para análisis hidráulicos HEC-RAS, especializado en calcular alturas de inundación y desbordamiento, se determinará los potenciales sectores en riesgo, con la finalidad de influir en la conciencia de los ciudadanos y de los Gobiernos Autónomos Descentralizados que los representan.

De esta manera se podrán tomar medidas urgentes, mismas que permitirán mitigar la vulnerabilidad existente, de tal forma que, en caso de ocurrir un nuevo episodio eruptivo, exista la preparación suficiente para poder salvar la mayor cantidad de vidas humanas.

ABSTRACT:

The Cotopaxi volcano with 5897 meters, is one of the highest active volcanoes, and because of the geological characteristics, is also one of the most dangerous.

This research aims to demonstrate the latent danger in which they are the inhabitants of the cities of San Rafael, Sangolquí and other villages located along the northern basin of the volcano, due mainly to lahars produced at the moment when it generates a volcanic eruption.

That's why, through the use of software for hydraulic analysis HEC-RAS, specialized to calculate flood heights and overflowing, will determine the potential risk sectors, in order to influence the conscience of citizens and Autonomous Governments that represent them.

Thus it may take urgent measures, same as to permit us to mitigate existing vulnerability and in case of exist a new eruptive episode, save a lot human lives.

1. Antecedentes:

El volcán Cotopaxi es un estratovolcán de 5.897 m de elevación medida desde el nivel del mar, es uno de los volcanes activos más altos del mundo, lo superan volcanes como el nevado "Ojos del Salado", que posee una altura de 6.893 m.s.n.m. (Aguilera y Toulkeridis, 2005) y se encuentra sobre los límites entre Argentina y Chile.

Está ubicado a unos 50 km al sureste de la capital del Ecuador en las coordenadas geográficas 0° 40' 0" S; 78° 26' 0" W (centro del cráter), se eleva majestuosamente por encima de las montañas andinas. Posee un gran cono casi simétrico y truncado con un diámetro de 600 x 800 m y un cráter con profundidad de más de 300 m, ocupado por un cono piroclástico pequeño (Aguilera et al; 2004).

En vista que datos geológicos recientes demuestran que es un volcán bimodal, ha presentado erupciones de intensidad moderada (productos de composición geoquímicas andesítica, Índice de Explosividad Volcánica (VEI) entre 2-4), y erupciones riolíticas muy grandes, con una gran disposición de piroclastos (VEI comprendida entre 5-6). Se estima que la energía liberada en los episodios eruptivos oscila entre 10^{15} y 10^{19} Joules, lo cual es equivalente a un terremoto de entre 6.3 y 8.5 en la escala de magnitud Richter y mayor a una bomba nuclear de potencia mediana cuya energía es de 10^{14} Joules (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

En el volcán Cotopaxi se originan tres grandes drenajes: los ríos Tambo-Tamboyacu-Napo hacia el este, Pita-Guayllabamba-Esmeraldas al norte y Cutuchi-Pastaza al sur. Estas vertientes se convierten en vías por las que transitan los flujos de lodo o lahares que se forman por la erupción del volcán, los cuales cruzan por ciudades y poblados, como por ejemplo las ciudades de Latacunga y Salcedo que se encuentran cerca del Río Cutuchi, mientras que, Sangolquí, San Rafael y Tumbaco están asentados cerca de los ríos Pita, Santa Clara y San Pedro. Poblaciones que han experimentado en las últimas décadas un gran desarrollo y para el caso de la cuenca norte, Sangolquí y San Rafael se han convertido en zonas de expansión de la ciudad de Quito.

Desafortunadamente este desarrollo ha afianzado una alarmante despreocupación sobre el tema por parte de los ciudadanos que habitan estos sectores y por las entidades públicas que las administran, más aún cuando las más de 18 grandes erupciones explosivas identificadas por la caída de lapilli, los flujos piroclásticos producidos, los lahares y su intervalo de recurrencia, la producción de tefra (fragmentos piroclásticos que salen volando hacia la atmósfera); determinan que la probabilidad de tener una nueva erupción como la de 1877 es de 0.57 y 0.82 (Aguilera et al; 2004); y logran establecer períodos de retorno de 117 ± 70 años aproximadamente (Barberi et al; 1995), entendiéndose así que, desde 1877 año de su última fase eruptiva hasta el 2012, han transcurrido 135 años, por lo que nos encontramos dentro de su período de retorno con una probabilidad de alrededor del 69% de erupción en este año en curso (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

2. Fenómeno Eruptivos del Volcán Cotopaxi:

En función de las erupciones pasadas del volcán Cotopaxi, incluyendo la de 1877, se han definido siete fenómenos eruptivos que caracterizan la actividad del volcán:

- Avalancha de escombros
- Lahares (flujos de lodo)
- Caída de piroclastos y ceniza
- Flujos piroclásticos

- Derrames (coladas/flujos) de lava
- Emisión de gases volcánicos, y
- Sismos volcánicos.

2.1. Flujos Piroclásticos:

Los flujos piroclásticos, también conocidos como nube ardiente o corriente de densidad piroclástica (Braney y Kokelaae, 2002), representan un fenómeno muy peligroso, tienen una temperatura de entre 900 y 1000°C y son los que funden los glaciares o capas de hielo del volcán para generar los flujos de lodo o lahares.

2.2. Flujos de Lodo o Lahares:

Por sus particulares características, este fenómeno representa un gran peligro para los poblados asentados a los principales cauces del volcán y sus zonas de desborde.

Con la última erupción del volcán Nevado del Ruiz (Colombia), se pudo observar la capacidad de los lahares en alcanzar zonas situadas a grandes distancias. El alcance de los lahares depende de la diferencia de nivel que existe entre el origen y el punto donde se agota su energía, para el caso del volcán Nevado del Ruiz, los lahares recorrieron una distancia de 60 km con un desnivel de alrededor de 5000 m; pero en el caso del volcán Cotopaxi el alcance es aún mayor, pues en la erupción de 1877 los flujos de lodo se desplazaron más de 300 km hasta llegar al Océano Pacífico, con una diferencia de nivel de hasta 5800 m (Aguilera y Toulkeridis, 2005).

Los lahares son flujos torrenciales de agua lodosa, generada por el rápido descongelamiento de los glaciares, cargados de material pétreo de diferentes tamaños, los mismos que se desplazan a grandes velocidades desde las laderas hacia los valles aledaños, controlados únicamente por la gravedad (Aguilera y Toulkeridis, 2005).



Figura 2.2.1. : Roca llamada Chilintrosa al norte de Mulaló, parte sur del volcán Cotopaxi transportada con flujos de lodo, Fuente: Foto Toulkeridis.

Es por esta razón, que se hace indispensable el periódico estudio de este fenómeno, a fin de poder delimitar las áreas de inundación de los diferentes drenajes de una manera cada vez más precisa, y así poder encontrar soluciones que permitan salvar la mayor cantidad de vidas humanas.

3. Programa computacional HEC-RAS 4.1.0:

El programa computacional HEC-RAS fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center (HEC)) que pertenece al Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers).

Existen varias versiones de este software para realizar el estudio de los diferentes aspectos hidráulicos, entre los que se menciona los siguientes:

- HEC-1: Para analizar la hidrología en cuencas.
- HEC-2: Para el estudio de la hidráulica fluvial.
- HEC-3: Para el análisis de yacimientos para la conservación.
- HEC-4: Para realizar el estudio de caudales.

HEC ha pasado por una serie de ajustes organizativos, pero siempre ha mantenido el mismo principio y la misma ética hacia el avance de los estudios hidrológicos e hidráulicos. Es por esta razón que la familia HEC ha crecido a más de 20 programas, siendo uno de los últimos el soporte de archivos GIS para georeferenciación, aparte de la nueva familia de software conocidos como "NexGen".

De esta manera HEC se ha convertido en el software hidrológico más conocido en el mundo, y dado que para la presente investigación se necesita conocer las alturas de inundación y alcances de desbordamiento debido a los lahares generados por el volcán Cotopaxi al momento de una erupción volcánica, se utilizó el programa computacional HEC-RAS, cuya última versión es la 4.1.0.

Para el HEC-RAS, un proyecto representa la introducción de una serie de datos o archivos que contienen un sistema específico de ríos, en el que el software puede realizar cualquier tipo de análisis incluido en su paquete. Así, mediante la incorporación de datos geométricos, tipos de flujo, sedimentos y de diseño hidráulico, permite, a partir de su modelamiento, realizar diferentes tipos de planes para obras de prevención o la determinación del comportamiento de los flujos frente a las estructuras hidráulicas construidas por el hombre.

Para la simulación con el programa es necesario conocer los perfiles transversales de los ríos que se van a estudiar, las distancias entre cada sección transversal, los valores del coeficiente de Manning para cada porción de cada una de las secciones transversales, las condiciones de borde, y los caudales de diseño. Para las condiciones de borde se debe establecer si el cálculo se realiza para un flujo sub-crítico, supercrítico o la combinación de ambos, ya que para un flujo sub-crítico las condiciones de borde son aguas abajo, para un flujo supercrítico aguas arriba, y en caso de que fueran las dos; es decir, un flujo mixto, las condiciones de borde son tanto aguas arriba como aguas abajo (Kuriowa Julio, 2010).

Cada uno de los datos hidráulicos y condiciones de flujo y borde, fueron calculados e introducidos en el programa, tomando en consideración el posible comportamiento de los flujos de lodo, basándose principalmente en los antecedentes históricos de la última erupción de 1877 y tomando además información de anteriores simulaciones como la del SIM-LAHAR. (Aguilera, et al, 2004).

Para la introducción de los perfiles transversales, se utilizó la información otorgada por la Facultad de Ciencias de la Tierra y la Construcción perteneciente a la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE), y para el caso de la introducción del sistema fluvial de los ríos Pita y Santa Clara, se utilizaron los mapas digitales de las zonas de Sincholagua, Pintag y Sangolquí otorgados por la Carrera de Ingeniería Geográfica de la misma universidad. Además se utilizó la ayuda de dos programas adicionales, ARCGIS

y HEC-geoRAS, con la finalidad de georeferenciar todos los datos geométricos y poder realizar un análisis más exacto.

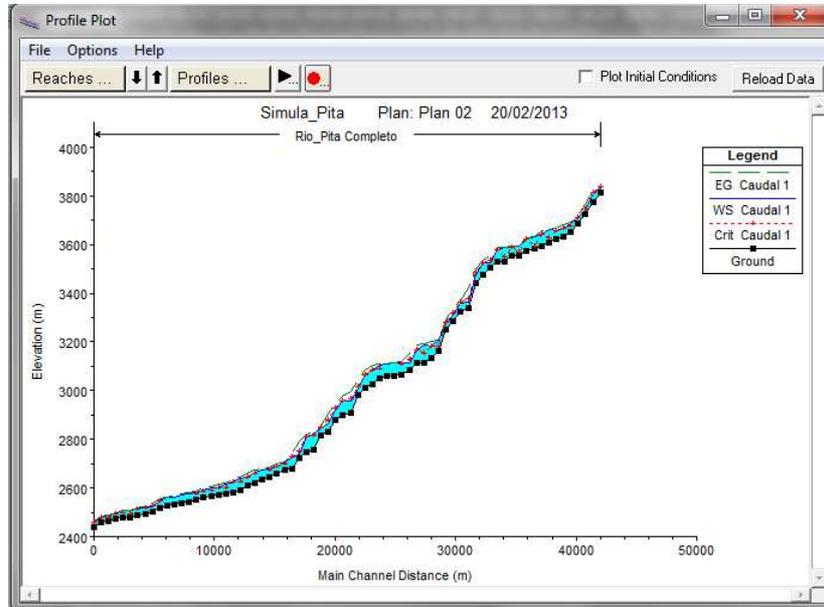


Figura 4.3.1: Ilustración del corte longitudinal del calibrado, donde se observa la pendiente del flujo de lodo en concordancia con la pendiente del río Pita como resultado de la simulación vista desde la ventana “Profile Plot” del programa HEC-RAS.

3. Programa computacional HEC-RAS 4.1.0:

Luego del proceso de cálculo, introducción, calibración y verificación de los datos ingresados, se establece un sistema de simulación sobre el comportamiento de los lahares, debido a la fusión de los flujos piroclásticos y el glaciar del volcán Cotopaxi al momento de la erupción y durante todo su trayecto, con tal precisión que, podemos afirmar que en caso de producirse nuevamente este fenómeno natural, las ciudades de Sangolquí, San Rafael y demás poblados ubicados a lo largo del drenaje norte, se verán seriamente afectados, perdiéndose las vidas de miles de seres humanos.

La científicidad del estudio ha sido posible gracias a la utilización del programa HEC-RAS, cuyos resultados establecen que, de manera inmediata se realice un profundo análisis por parte de por parte de las entidades públicas, privadas y sobre todo, por las autoridades que tienen la obligación de velar por la seguridad, el bienestar y el buen vivir de los ciudadanos y ciudadanas que se encuentran ubicados en las actuales zonas en riesgo.

Tabla 3.1: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Pita.

ZONA	ÁREA	VOLUMEN (10 ⁶ m ³)	CAUDAL (m ³ /s)	Coef. Manning	MÁX. ALTURA (m)	OBSERVACIÓN	AFECTACIÓN
Sincholagua	Jatunloma	44,1	49000	0,09	4	-	Parcialmente Inundado
Sincholagua	Tabla Loma	44,1	49000	0,09	1	-	Parcialmente Inundado
Píntag	La Virgen	44,1	49000	0,09	1	Se toma en consideración el rango de 5 m de error, debido a que el modelo matemático no es exacto.	Parcialmente Inundada
Píntag	Tanipamba	44,1	49000	0,09	7	La afectación de debe al poblado colina abajo del área de Tanipamba.	Inundado
Píntag	La Caldera	44,1	49000	0,09	4	Se genera un remanso, el cual desborda el flujo en dirección hacia el Río Santa Clara.	Inundado
Sangolquí	Santa Anita	44,1	49000	0,09	32	Ubicación de la institución educativa Liceo del Valle.	Sumergido
Sangolquí	El Rancho	44,1	49000	0,09	2	-	Parcialmente Inundado
Sangolquí	La Colina	44,1	49000	0,09	6	-	Inundado
Sangolquí	ESPE	44,1	49000	0,09	3	La afectación se da para las urbanizaciones frente a la universidad.	Parcialmente Inundado
Sangolquí	El Progreso	44,1	49000	0,09	6	Los flujos tienen una extensión de 500 y 300 m a cada lado del río.	Inundado
Sangolquí	Playa Chica	44,1	49000	0,09	3,33	Los flujos tienen una extensión de 322 y 300 m.	Parcialmente Inundado
Sangolquí	El Triángulo	44,1	49000	0,09	6	Los flujos tienen una extensión de 1200 y 1000 m.	Inundado
Sangolquí	San Pedro	44,1	49000	0,09	5	El flujo tiene una extensión de 300 m a cada lado del río.	Parcialmente Inundado

Tabla 3.2: Resumen de afectación de los lahares por el cauce del Río Santa Clara.

ZONA	ÁREA	VOLUMEN (10 ⁶ m ³)	CAUDAL (10 ³ m ³ /s)		Coef. Manning	MÁXIMA ALTURA (m)		OBSERVACIÓN	AFECTACIÓN
			30%	40%		30%	40%		
<i>Píntag</i>	Barrio Carlos Gavilanes	44,1	14,7	19,6	0.09	20	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Club Los Chillos	44,1	14,7	19,6	0.09	22	25	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	Selva Alegre	44,1	14,7	19,6	0.09	8	10	-	Inundado
<i>Píntag</i>	Colegio Juan de Salinas	44,1	14,7	19,6	0.09	14	17	-	Sumergido
<i>Píntag</i>	El Choclo	44,1	14,7	19,6	0.09	6	8	-	Inundado
<i>Sangolquí</i>	Emp. Eléctrica Quito	44,1	14,7	19,6	0.09	4	5	Los flujos tienen una extensión de 300 y 260 m a cada lado del río.	Inundado
<i>Sangolquí</i>	River Mall	44,1	14,7	19,6	0.09	3,24	3,60	Los flujos tienen una extensión de 300 m a cada lado del río.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	Club de Oficiales	44,1	14,7	19,6	0.09	1,46	2	Los flujos tienen una extensión de 300 y 200 m.	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	ESPE	44,1	14,7	19,6	0.09	4	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Luis Shopping	44,1	14,7	19,6	0.09	2	4	-	Parcialmente Inundado
<i>Sangolquí</i>	San Rafael	44,1	14,7	19,6	0.09	5	6	Los flujos tienen una extensión de 300 y 86 m.	Inundado

4. Conclusiones:

- El volcán Cotopaxi tiene una historia eruptiva que demuestra un comportamiento bimodal con erupciones estrombolianas y plinianas, por lo que es uno de los más peligrosos del Ecuador. Además, por ser el origen de tres grandes redes de drenajes que se distribuyen para las zonas norte, este y sur; se incrementa la peligrosidad de los flujos de lodo (lahares), que se generan por fusión de los glaciares, cada vez que ocurre una reactivación volcánica, con la formación de flujos piroclásticos.

Con base en la frecuencia eruptiva estadísticamente determinada, se ha establecido una alta probabilidad de que en el presente, aparezca una reactivación volcánica.

- El programa computacional HEC-RAS (Versión 4.1.0), creado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (US. Army Corps of Engineers), permitió elaborar un modelo hidráulico sobre el comportamiento de los flujos de lodo o lahares generados por el volcán Cotopaxi en una próxima erupción, que para el caso de la cuenca norte, se movilizan por los ríos Pita y Santa Clara. Adicionalmente, gracias a su interfaz gráfica se puede observar de manera clara, la posible extensión de los flujos.
- Para la elaboración del modelo se consideró una reducción de alrededor del 50% en la extensión del casquete glaciar que cubre la parte más alta del cono volcánico. No obstante, se demuestra que tal reducción no significa, necesariamente, una reducción del volumen de los lahares y, peor aún, del riesgo volcánico. La concientización, la preparación y medidas de mitigación dadas por el hombre para el hombre, pueden ser los únicos factores que pueden inferir en una reducción del riesgo.

El modelo del tránsito de los lahares del Cotopaxi elaborado con el programa SIM-LAHAR, toma como referencia volúmenes de 60 y 70 millones de metros cúbicos para el hidrograma inicial, que en comparación con los 54 millones de metros cúbicos calculados para el presente proyecto, dan como resultado valores prácticamente iguales en algunas zonas y mayores en otras.

- En base a los resultados obtenidos con el modelo elaborado en el programa HEC-RAS, se concluye que el recorrido de los flujos descritos en el “Capítulo III” de este documento, tiene mucha coherencia con el comportamiento conocido de los lahares que se movilizan hacia la cuenca norte, especialmente en el sector conocido como “La Caldera”, en el que se produce un remanso hasta alcanzar una altura superior a los 30 m, que produce el desbordamiento de una parte del flujo, que se dirige hacia el cauce del Río Santa Clara, incrementando el riesgo para el Valle de Los Chillos.
- La utilización adicional de los programas ArcGis (Versión 10) y HEC-geoRAS (Versión 10), permitieron georeferenciar la red de drenaje. Así se pudo determinar, algunos poblados cercanos a los diferentes cauces, que serían afectados al momento de una erupción y que no han sido tomados en cuenta en anteriores investigaciones.
- Los resultados obtenidos en el presente proyecto demuestran el importante peligro que se deriva de una posible erupción del volcán Cotopaxi. Más aún, cuando las diferentes ciudades aledañas a las diferentes vertientes, han crecido exponencialmente y de manera desordenada. Esto demuestra una vez más el desinterés de los ahora llamados Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs), que han permitido en las últimas décadas una concentración

poblacional sin ninguna planificación que considere los riesgos de una posible erupción del Cotopaxi y que sólo han visto al volcán como la portada de una revista de turismo.

- Existen muchos documentos, tesis e investigaciones desarrolladas por diferentes profesionales nacionales y extranjeros, en los que se habla del gran peligro que corren las y los ecuatorianos en caso de existir una reactivación volcánica del Cotopaxi” y que, además, permitieron orientar el correcto desarrollo del presente proyecto, con el que se confirma que los flujos de lodo o lahares, pueden afectar a un importante porcentaje de la población ubicada en el flanco norte del volcán, sin considerar acciones concretas de prevención y mitigación.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS:

- Aguilera, E. y Toulkeridis, T.: 2005, El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, Sotavento Ed, Quito, Ecuador. pp 1- 29.
- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., y Zanchetta, G.: 2004, , Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador), Natural Hazards n. 33. pp 165.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., y Yepes, H.: 2005, Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional n. 3. pp 17- 54.
- Barberi, F., Cotelli, M., Frullani, A., Rosi, M., y Almeida, E.: 1995, Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term euptive forecasting, Journal of Volcanology and Geothermal Research n. 69. pp 218-221.
- Galárraga, R., y Coello-Rubio, X.: 2009, Modelación matemática de los flujos de lodo y escombros de origen volcánico secundarios en las quebradas Vascún, Ulba, y Lligua: Volcán Tungurahua, Ecuador. pp 14-15.
- Guerra, V.: 1998, Sistema de Análisis Ríos, US Army Corps of Engineers. pp 1-23.
- Kuriowa, J.: 2010, Introducción al uso del HEC-RAS, Universidad Nacional de Ingeniería. pp 1-2.
- Mothes, P., Hall, M., y Janda, R.: 1998, The enormous chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 59. pp 234.
- Nanía, L., y Molero, E.: 2007, Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-geoRAS 3.1.1, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva, Granada. pp 1-18.
- Pedregal, B.: 2009, Introducción a ArcGIs. pp 1-11.
- Samaniego, P., Ordoñez J., Schilling, S., y Mothes P.: 2011, , Los Posibles Escenarios Eruptivos del Cotopaxi y la Delimitación de Zonas Inundadas por Lahares, IG, USGS, IRD. pp 1-10.
- US Army Corps of Engineers.: 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. pp 1-22.
- Venkatesh, M.: 2010, Tutorial on using HEC-geoRAS with ArcGis 9.3, School of Civil Engineering, Purdue University. pp 1-21.
- [http://riesgosycatastrofes_1a.wikispaces.com/2.-ANÁLISIS+Y+PLANIFICACIÓN++DE+LOS++RIESGOS.](http://riesgosycatastrofes_1a.wikispaces.com/2.-ANÁLISIS+Y+PLANIFICACIÓN++DE+LOS++RIESGOS)
- http://es.wikipedia.org/wiki/Ceniza_volc%C3%A1nica
- <http://es.wikipedia.org/wiki/ArcGIS>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Lahar>
- <http://help.arcgis.com>
- <http://publiespe.espe.edu.ec/articulos/vulcanismo/flujo-de-lodos/infocoto.htm>
- <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do;jsessionid=AB389CF3CE40E6629283082C290000BB?sectionCode=1009>

- <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=1007>
- <http://www.hec.usace.army.mil>
- http://www.volcanesdecanarias.com/interna/Educacion/edu_riesgo.htm

6. BIBLIOGRAFÍA:

- Aguilera, E. y Toulkeridis, T.: 2005, El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha, Sotavento Ed, Quito, Ecuador.
- Aguilera, E., Pareschi, M.T., Rosi, M., y Zanchetta, G.: 2004, Risk from lahars in the northern valleys of Cotopaxi volcano (Ecuador), *Natural Hazards* n. 33.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J., Samaniego, P., Egred, J., Ramón, P., Rivero, D., y Yepes, H.: 2005, Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi, Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional n. 3.
- Barberi, F., Cotelli, M., Frullani, A., Rosi, M., y Almeida, E.: 1995, Chronology and dispersal characteristics of recently (last 5000 years) erupted tephra of Cotopaxi (Ecuador): implications for long-term euptive forecasting, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* n. 69.
- Braney, M., y Kokelaar, P.: 2002, Pyroclastic Density Currents and the Sedimentation of Ignimbrites, *Geological Society London Memoir* n. 27.
- Cas, R., y Wright, J.: 1987, *Volcanic Succesions Modern and Ancient*.
- Castro, M., Mothes, P., Hidalgo, H., y Sánchez, A.: 1992, Uso del Modelo HEC-1 para el estudio de los lahares del volcán Cotopaxi, *Politécnica Revista de Información Técnico - Científica* n. 3.
- Cea, L., y Bladé, E.: 2007, Modelización matemática en el lecho fijo del flujo en ríos. Modelos 1D y 2D en régimen permanente y variable, Grupo GIAMA.
- Galárraga, R., y Coello-Rubio, X.: 2009, Modelación matemática de los flujos de lodo y escombros de origen volcánico secundarios en las quebradas Vascún, Ulba, y Lligua: Volcán Tungurahua, Ecuador.
- Guerra, V.: 1998, *Sistema de Análisis Ríos*, US Army Corps of Engineers.
- Hall, M., y Mothes, P.: 2007, The rhyolitic-andesitic eruptive history of Cotopaxi volcano, Ecuador, *Bull Volcanol* n. 10.
- Jérémy, R., D'Ercole, R., Pigeon, P., y Serrano T.: 2009, Complejidad, incertidumbre y vulnerabilidad: el riesgo asociado al volcán Cotopaxi en el Valle de Los Chillos (Quito-Ecuador), *l'Institut Français d'Études Andines* n. 3.
- Kuriowa, J.: 2010, *Introducción al uso del HEC-RAS*, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Lockwood, J., y Hazlet, R.: 2010, *Volcanoes: Global Perspectives*.
- Mothes, P., Hall, M., y Janda, R.: 1998, The enormous chillos valley lahar: an ash-flow-generated debris flow from Cotopaxi volcano, Ecuador, *Bull Volcanol* n. 59.
- Nanía, L., y Molero, E.: 2007, Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-geoRAS 3.1.1, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva, Granada.
- Padilla, O., y Bosque, J.: 2012, Cálculo, análisis y representación de tiempos de evacuación en el Valle de Los Chillos frente a una eventual erupción del volcán Cotopaxi, Universidad de Alcalá, Escuela Politécnica del Ejército (ESPE).
- Pedregal, B.: 2009, *Introducción a ArcGIs*.
- Pierson, T., Janda, R., Thouret, J., y Borrero, C.: 1990, Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* n. 41.
- Pistolesi, M., Cioni R., Rosi, M., Cashman, K., Rossotti, A., y Aguilera, E.: 2013, Evidence

for lahar-triggering mechanisms in complex stratigraphic sequences: the post-twelfth century eruptive activity of Cotopaxi Volcano, Ecuador, Bull Volcanol n. 75.

- Ramos, C.L.: 2005, HEC-RAS 3.1 Manual de entrenamiento, UNALM-FIA-DRAT.
- Samaniego, P., Ordoñez J., Schilling, S., y Mothes P.: 2011, , Los Posibles Escenarios Eruptivos del Cotopaxi y la Delimitación de Zonas Inundadas por Lahares, IG, USGS, IRD.
- Sánchez, J.: 2007, Manual introductorio a HEC-RAS, Dpto. Geología Universidad de Salamanca.
- Sodirol, L.: 1877, Relacion sobre la erucion del Cotopaxi acaecida el dia 26 de junio de 1877, Imprenta Nacional, Quito, Ecuador.
- US Army Corps of Engineers.: 2008, HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual.
- US Army Corps of Engineers.: 2011, HEC-geoRAS GIS Tools for support of HEC-RAS using ArcGis, River Analysis System, User´s Manual.
- Venkatesh, M.: 2010, Tutorial on using HEC-geoRAS with ArcGis 9.3, School of Civil Engineering, Purdue University.
- Wolf, T.: 1878, Memoria sobre el Cotopaxi y su ultima eruption acaecida el 26 de junio de 1877, Imprenta del Comercio, Guayaquil, Ecuador.