

El riesgo: realidad virtual. Deslizamientos activados por amenaza sísmica volcánica del volcán Cerro Machín*

The risk: virtual reality.
landslides triggered by volcanic seismic hazard of the Cerro Machín volcano

Pilar A. Henao S.

Geógrafa, Universidad del Valle

pihensa@gmail.com

(Recibido: agosto de 2014; aceptado: noviembre de 2014)

Resumen: Los riesgos aluden a un particular estatuto de realidad, una “realidad virtual” (aquello que puede ser, pero que aún no es), situaciones (muchas de ellas latentes) aun no acontecidas, pero que pueden generar graves impactos sobre la población, actividades, y demás elementos expuestos; de ahí su relevancia como sistema de referencia público. Este artículo presenta una exploración y aplicación de herramientas para la visibilización de algunas de las complejas relaciones que configuran el riesgo en el municipio de Cajamarca (Tolima); en particular, la actividad sísmica volcánica como disparador de deslizamientos, y el impacto en estructuras del proyecto de minería de oro a cielo abierto por lixiviación con cianuro que se desarrolla en la región (en etapa de Exploración), y que se solapa con la cuenca hidrográfica del río Coello (que da soporte a actividades agrícolas y al abastecimiento de distintos acueductos), configurándose un riesgo de contaminación ambiental de grandes proporciones.

Palabras clave: riesgo, sociedad del riesgo, volcán Cerro Machín, amenaza sísmica volcánica, deslizamientos, minería de oro a cielo abierto.

Abstract: The risks allude to a particular statute of reality, a “virtual reality” (that one that can be, but that still is not), situations (many of latent them) even not happened, but that can generate serious impacts on the population, activities, and other exposed elements; of there his relevancy like public system of reference.

This paper presents an exploration and application of tools for the visibility of some of the complex relations that comprise the risk in the municipality of Cajamarca (Tolima), in particular, the volcanic seismic hazard as a trigger of landslides, and the impact in structures of open pit gold mining project by cyanide heap leaching that develops in the region (at the exploration stage), and that overlaps with the hydrographic basin of the Coello River (that gives support to agricultural activities and the supply of different aqueducts), assuming a risk of environmental contamination of large proportions.

Keywords: risks, risk society, Cerro Machín volcano, volcanic seismic hazard, landslides, open pit gold mining.

*Este artículo se deriva del trabajo de grado titulado: “EL RIESGO: REALIDAD VIRTUAL. Caracterización y Escenarios de Riesgo Asociados al Volcán Cerro Machín. Amenaza por Deslizamientos Producto de la Actividad Sísmica Volcánica y su Impacto en el Proyecto Minera La Colosa”, con el cual se obtuvo el título de Geógrafa de la Universidad del Valle en 2012.

Introducción

“Es importante que la gente tenga un conocimiento básico de la ciencia para tomar decisiones informadas en un mundo cada vez más científico y tecnológico.”.
Stephen Hawking

En nuestro planeta existen áreas expuestas a amenazas naturales y seres humanos que viven cerca o directamente en ellas, transformando el medio en territorio de riesgo. Jugando el ser humano, un papel fundamental como “hacedor” de riesgos debido a la puesta en marcha de actuaciones poco acordes con los rasgos del medio físico donde tienen lugar.

Sin embargo, generalmente, se acude a la imprevisibilidad de los fenómenos para explicar un desastre, lo que nos conduce a una característica importante en las sociedades del riesgo, planteada por Ulrich Beck: “Cuanto menos riesgos se reconozcan públicamente, más riesgos se producen” (Beck, 1992), por lo cual, la sociedad del riesgo debe ser una sociedad bien informada, pues, la ocultación de información sobre el riesgo genera más riesgo, es decir, más vulnerabilidad en los grupos sociales sometidos a una amenaza potencial. Y esto, en gran medida, es lo que explica hoy en día la magnitud de algunos desastres naturales y/o inducidos por el hombre, pues, si no se informa a la población del riesgo al que está sometido por ocupar un determinado territorio, los efectos de un episodio extremo siempre serán mayores.

La complejidad del análisis del riesgo y de las relaciones que lo producen, está en que se constituye de una cadena de eventos, generalmente de distinta naturaleza, que ocasiona que no se dimensione la situación desde una visión global sino fragmentada, y que de dicha forma el riesgo se mimetice y pase desapercibido. El análisis territorial de la amenaza natural y sus efectos en las sociedades humanas muestra que, en la superficie terrestre, es posible delimitar unidades espaciales que comparten una afección similar de algún evento natural. De este modo, el riesgo latente en un territorio se convierte en un elemento de significación geográfica importante en el análisis de dicho medio, para determinar y/o condicionar actuaciones de los seres humanos sobre el territorio orientadas a reducir o minimizar sus efectos.

Riesgo: realidad virtual

Al riesgo no escapa ningún territorio, ni ninguna sociedad. El sociólogo alemán Ulrich Beck indica que al riesgo no escapa ni el mundo de la carencia ni el de la abundancia: “La miseria es jerárquica, el smog es democrático” (Beck, 1992). Allí donde los sistemas de normas y las instituciones sociales fracasan a la hora de conseguir la seguridad prometida surge la sociedad del riesgo. Al respecto, señala Beck que la

falta de previsión por parte de las autoridades a la hora de establecer mecanismos de seguridad ante los riesgos (naturales y tecnológicos) puede encontrar una coartada en el carácter supuestamente imprevisible de los fenómenos: “En última instancia es siempre posible acudir a la imprevisibilidad de los fenómenos para explicar una catástrofe”.

Beck señala que la diferencia entre amenaza y riesgo está, en cierta medida, en la voluntariedad. La amenaza tiene directamente que ver con la fatalidad, con aquello que ocurre exterior a nosotros y que no podemos evitar y el riesgo con la exposición voluntaria, deliberada y calculada a un daño, normalmente para obtener algo a cambio; sin embargo, existen riesgos normalmente imperceptibles, es decir, para los cuales necesitamos que la ciencia nos diga que existen (por ejemplo, la radiación atómica), pues no los notamos, aunque sí sus consecuencias, que no se pueden limitar temporal o localmente, y que suelen ser irreversibles, difícilmente cuantificables e indiscriminados; a pesar de todo ello siguen siendo riesgos en el sentido de que son voluntarios, debido a que aunque los sujetos no los perciban como tales y, por tanto, subjetivamente los conviertan en amenazas, estos son voluntarios porque la sociedad tiene decisión sobre ellos, por ejemplo, decidir permitir o no la explotación minera de oro a cielo abierto por lixiviación en pilas con cianuro.

Los riesgos no son daños acontecidos, ni equivalen a destrucción, sin embargo, amenazan con la destrucción. El discurso del riesgo empieza donde la confianza en nuestra seguridad termina, y deja de ser relevante cuando ocurre la potencial catástrofe. El concepto de riesgo delimita, por tanto, un peculiar estado intermedio entre seguridad y destrucción, donde la percepción de riesgos amenazantes determina pensamiento y acción. En la “sociedad del riesgo”, es la percepción cultural y la definición lo que constituye el riesgo. En síntesis: el “riesgo” y la “definición (pública) del riesgo” son uno mismo (Beck, 2000).

Plantea Beck que este peculiar estatuto de la realidad de “ya-no-más-pero-todavía-no” (ya no más confianza/seguridad, pero todavía no destrucción/desastre) es lo que expresa el concepto de riesgo y lo que lo hace un sistema de referencia público. La sociología del riesgo es una ciencia de potencialidades y valoraciones sobre probabilidades. Así pues, los riesgos son una forma de realidad virtual, virtualidad real. Los riesgos están tan sólo a un paso de lo que Joost van Loon (1998) denomina “riesgos virtuales en una era de reproducción cibernética”, y escribe: “Sólo si pensamos en el riesgo en términos de una realidad, mejor dicho, un haciéndose-real (una virtualidad), puede ser entendida la materialización social. Sólo si entendemos el riesgo en términos de una construcción, podremos entender su indefinible ‘esencia’”.

Los riesgos son híbridos hechos-por-humanos, que incluyen y combinan política, ética, matemáticas, medios de comunicación de masas, tecnología, definiciones y percepciones culturales: y -lo que es más importante- no se pueden separar estos aspectos y realidades si se quieren comprender las dinámicas culturales y políticas de la sociedad del riesgo. Así, una de las características más importantes de la teoría de la sociedad del riesgo, es plantear, las circunstancias aparentemente rígidas y ponerlas en movimiento.

Somete a la ciencia, a una profunda crítica, tanto externa como interna, por su rol en la causa y el origen de los riesgos de la Modernidad, pues, es la encargada de definir los riesgos, ya que sin su ayuda sería imposible construirlos socialmente, sin embargo, sucede que esta definición de los riesgos, muchas veces, es una pura falacia “científica”, donde intermedian los llamados “valores límites de tolerancia”, es decir, niveles de permisibilidad, en donde se desarrolla una “reglamentación” no para impedir el daño (por ejemplo, envenenamiento o contaminación), sino la medida permitida de daño. Pero a diferencia de la mayoría de las teorías de las sociedades modernas, la teoría de la sociedad del riesgo desarrolla una imagen que hace las circunstancias de la modernidad contingentes, ambivalentes e (involuntariamente) susceptibles de reajustes políticos.

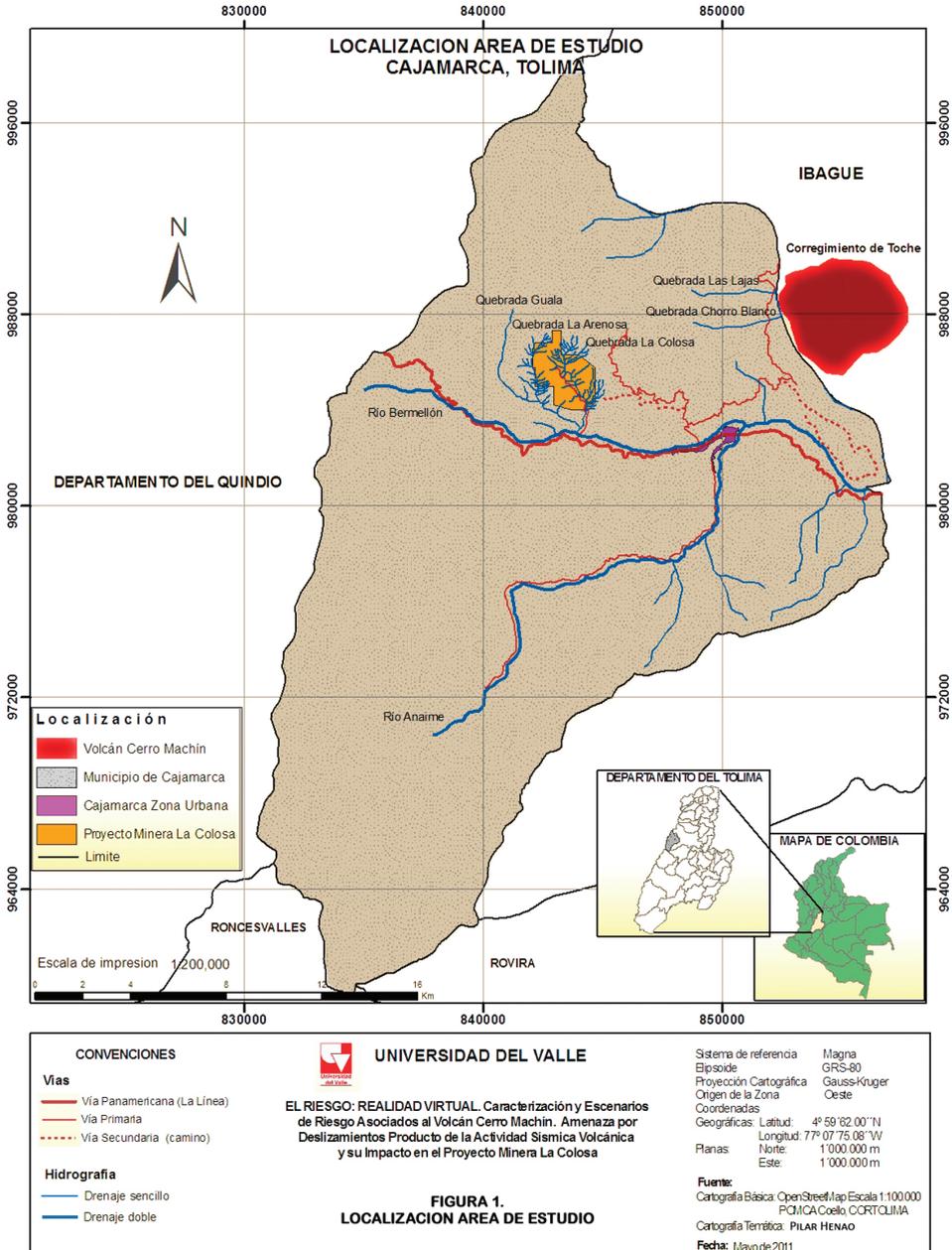
Localización

La zona de estudio (ver Figura 1) se circunscribe al Municipio de Cajamarca, situado en la Cordillera Central, centro-occidente del Departamento del Tolima - Colombia. Siendo:

Área de influencia de amenaza volcánica del Cerro Machín: el VCM (volcán Cerro Machín) se localiza a una distancia en línea recta de 7 Km al nororiente del municipio, y

Área de localización Proyecto Minera La Colosa: se encuentra en jurisdicción del municipio de Cajamarca (zona rural) y a una distancia en línea recta de 12 Km del VCM.

Figura 1. Localización área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Municipio de Cajamarca. Con una extensión de 516,2 Km² (0,54 Km² área urbana, y 515,69 Km² área rural) es considerado “Despensa agrícola de Colombia” y punto clave para el país, debido a su gran concentración poblacional y de infraestructura económica (Paso de la Línea, Vía Ibagué-Armenia, Corredor de Aeronavegación Bogotá-Ibagué-Cali, Túnel de La Línea -en proceso-). Se encuentra en la zona de vida constituida por el bosque muy húmedo montano (bmh-M); que en varios sitios de las Cordilleras Colombianas, corresponden comúnmente a los terrenos denominado “Paramos y Subparamos”, pero que en el municipio al presentarse un fenómeno de microclima y topográfico, hace que el bosque natural denso se presente hasta los 3.500 msnm. Según el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Coello -POMCA- (Cortolima, 2006), los principales usos del suelo y coberturas en Cajamarca, son: páramos, bosques, rastrojos, pastos, cultivos y tierras eriales. Además, el municipio se divide en tres (3) micro-cuencas hidrográficas, de las cuales se destacan por su influencia la del Río Anaime y la del río Bermellón, que abarcan aproximadamente el 80% de la extensión total del municipio. Según el Esquema de Ordenamiento Territorial de Cajamarca (EOT de Cajamarca, 2000) el río Anaime ocupa 27.300,67 hectáreas y el río Bermellón 14.739,14 hectáreas. Estas son tributarias de la cuenca mayor del río Coello que abarca 9.580,99 hectáreas del municipio.

Geomorfológicamente, el área está conformada por una franja de terreno que hace parte de los plegamientos complejos y apretados sobre rocas del Grupo Cajamarca del Paleozoico que se encuentran entre las cotas 2400 y 3550 m.s.n.m., con laderas de pendiente suave a fuertemente inclinada, afectada por plegamientos y fallas regionales –particularmente, el sistema de fallas de Romeral-. En general, la morfología es escarpada en los taludes de rocas resistentes (esquistos, filitas y cuarcitas), moderadamente inclinada sobre laderas de rocas de esquistos cloríticos y depósitos recientes de origen coluvial y volcánico; y semiplana a plana en las zonas de terrazas aluviales principalmente de drenajes.

Volcán Cerro Machín -VCM-. Se localiza en jurisdicción del Corregimiento de Toche, Municipio de Ibagué-Tolima, 150 Km al suroccidente de Bogotá, capital de Colombia, a 7 Km al nororiente de Cajamarca-Tolima, y a 12 Km del Proyecto Minera La Colosa. Tiene una altura de 2.750 msnm y su cima está en las coordenadas geográficas 4° 29' N y 75° 22' W. Su forma hace que se confunda con la topografía de la región, pasando desapercibido para quienes no lo conocen, lo que ha contribuido al asentamiento de poblaciones tanto dentro del volcán, como en sus faldas y alrededores.

Las principales cuencas hidrográficas que se encuentran en la zona de influencia son las del río Cauca, al occidente, y la del río Magdalena, al oriente. De la primera hacen parte todos los drenajes que bajan del Alto de La Línea y que vierten sus aguas al río Quindío. De la segunda hacen parte el río Toche con afluentes como el río Tohecito y las quebradas San Juan y Azufra, y los ríos Anaime y Bermellón, los cuales, al entregar sus aguas al río Toche, conforman el río Coello que desemboca en el río Magdalena.

Fisiográficamente (ver Tabla 1), el VCM está localizado en la margen suroccidental del denominado Complejo Volcánico Machín - Cerro Bravo, costado oriental de la Cordillera Central. Construido directamente sobre rocas metamórficas, el VCM está conformado por un edificio volcánico de forma anular compleja, resultado de un conjunto de relictos de anillos piroclásticos enlazados entre sí; la altura del cono no es mayor de 150 m sobre su base, el cual se encuentra truncado y colapsado hacia el flanco WSW, posee un cráter de 2,4 km de diámetro, relleno por dos domos de 250 m y 150 m de altura. Los domos presentan fenómenos asociados de actividad termal expresados en campos fumarólicos en su parte alta, áreas hidrotermalizadas y zonas con emisiones de CO₂ en las partes bajas y sector interno de los anillos. Adicionalmente, localizadas en los alrededores del edificio volcánico se conocen cinco fuentes termales. Además, presenta sismicidad esporádica y un arreglo de fracturas aproximadamente radial, que permite definir cuatro zonas de debilidad en las cuales podrían ocurrir hacia el futuro las manifestaciones de la reactivación eruptiva del volcán.

Tabla 1. Geomorfología del volcán Cerro Machín

| Rasgos | Volcán Cerro Machín |
|--|---|
| Altura del edificio sobre el nivel del mar | 2.750 m. |
| Edificio volcánico | Actual: complejo de anillos piroclásticos destruidos lateralmente, de 100 m de altura, que rodea un cráter de 2,4 km de diámetro, relleno por dos domos de ~ 1,2 km de diámetro y altura máxima de 250 m. En su interior se forman planicies en forma de media luna, dando lugar a una laguna llamada Machín extinta hace diez años y convertida hoy en día en un pantano. La forma de los domos es redondeada con pendientes suaves y poca disección. |
| Confinamiento | Confinado dentro de una cuenca. |
| Drenaje | Subparalelo. |
| Cuencas | Dos al este (Bermellón - Anaime y Toche - Coello) |
| Forma de valles | En V profundos. |

Fuente: Cepeda, H., Cortes, G. P. & Méndez, R. A., 2002.

Al estar construido en una zona de convergencia destructiva en un borde continental activo, genera fundamentalmente magmas de composición calcoalcalina. La composición de las rocas y de los productos de su erupción, son predominante y constantemente dacítica (63 – 65 %, Cepeda et al., 1995). El estilo eruptivo es explosivo, con erupciones tipo plinianas y grandes depósitos de flujos y oleadas piroclásticas, de caída de piroclastos y de lahares, así como con el emplazamiento de domos (Cepeda

et al., 1995; Rueda, 2000; Méndez, 2001; Cortés, 2001). Ha producido seis períodos eruptivos (cuatro plinianos y dos por colapso de domos) durante el Holoceno, el último hace 800 años. Las investigaciones sobre su historia geológica indican que sus erupciones en repetidas oportunidades (las cuales han cubierto de materiales vastos territorios en los departamentos de Tolima, Quindío, Risaralda, Cundinamarca y Valle del Cauca), y en la actualidad fumarolas, fuentes termales y actividad sísmica, hacen que sea catalogado como un volcán activo (con potencialidad para producir erupciones en el futuro).

Los tipos de amenaza volcánica esta representadas por caída de piroclastos, flujos piroclásticos, oleadas piroclásticas, lahares, ondas de choque, sismos, y gases. Adicionalmente, aunque no son de origen volcánico, en el edificio del volcán se han presentado deslizamientos que inciden en la formación de alguno de los fenómenos que generan las amenazas mencionadas anteriormente.

Proyecto de exploración minera La Colosa. La información es extraída del “Estudio Ambiental para la Solicitud de Sustracción de un Área de la Reserva Central, Municipio de Cajamarca, Departamento del Tolima, Proyecto de Exploración Minera” (Soluciones Ambientales AP&A & Geoingeniería, 2008), la cual fue presentada al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), durante el proceso de solicitud de extracción del área. Actualmente (2014), el proyecto continua en etapa de exploración.

La Colosa, proyecto de explotación minera de la compañía AngloGold Ashanti se localiza en el sistema montañoso de la Cordillera Central en el Departamento del Tolima, en jurisdicción del municipio de Cajamarca, a 10 Km de la vía (La Línea) que del casco urbano de Cajamarca conduce hacia el Departamento del Quindío. Es un polígono de 515,75 ha (pertenecientes a la Reserva Forestal Central), dentro del cual se encuentran las 6,39 ha que fueron objeto de sustracción por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) mediante las Resoluciones 814, 1567 y 2014 de 2009 y en donde se han realizado los trabajos de exploración minera. El método de extracción que proyecta es el de minería de superficie a cielo abierto, específicamente, explotación minera de oro a cielo abierto por lixiviación en pilas (para lo cual se usa soluciones de cianuro para separar el oro de la roca), en un área de cuenca hidrográfica.

El proyecto está ubicado dentro de las microcuencas de la quebrada la Arenosa y La Colosa. Estas quebradas hacen parte de la subcuenca de la quebrada La Guala, la que se clasifica según el criterio de Horton, como de orden 3, con una forma cercana a la circular como lo indica el Coeficiente de compacidad (K_c), por su proximidad a 1. A su vez, estas quebradas, pertenecen a la cuenca del Río Bermellón. Es una zona extremadamente húmeda, lo cual se corrobora con los valores de déficit hídrico anual, equivalentes a 0, es decir, no existe déficit de agua en el año.

El polígono, está conformado por rocas paleozoicas de tipo metamórfico del Complejo Cajamarca, intruídas por plutones intermedios. Estas rocas, se encuentran

parcialmente cubiertas por depósitos cuaternarios, de tipo aluvial, coluvial, y volcánico (cenizas piroclásticas, producto del pasado volcanismo activo del VCM hacia el norte del área del proyecto). Estas rocas han sido afectadas por fallamiento, fracturamiento y plegamiento. El área del proyecto es impactada por dos sistemas de fallas regionales: el Sistema de Fallas de Romeral de 700Km de largo, se localiza al oeste de la zona de proyecto; y el Sistema de Fallas de Palestina, se encuentra localizado al este. De acuerdo a Ingeominas, la aceleración sísmica promedio en el área del proyecto está alrededor de 0.2g a 0.3g, lo cual corresponde a un riesgo sísmico moderado a alto.

El ciclo geomorfológico está determinado por la acción de procesos agradacionales y degradacionales, los cuales, a su vez, están controlados por factores fisiográficos (relieve), factores bióticos (vegetación), factores geológicos (tectónica, vulcanismo, orogénesis) y factores antrópicos. Las unidades geomorfológicas, en el polígono, son: ladera de roca fuertemente inclinada (LCE), ladera Coluvial (LC), ladera Moderadamente Inclinada (LMI), ladera de pendiente fuertemente afectada por procesos de remoción en masa (LPR) y zona de terrazas aluviales y aluviones activos (ZTA).

La zona se encuentra afectada por movimientos superficiales de carácter traslacional, rotacional y flujos de suelos, los cuales involucran materiales de relleno heterogéneo, cenizas volcánicas y un espesor de material residual, producto de la alteración de los esquistos, dioritas y depósitos piroclásticos. La tasa de los movimientos es variable, ya que se observan movimientos cuya velocidad de desplazamiento ha sido muy rápida hasta procesos de reptación con velocidad aparente muy lenta. Además, la disposición continua de materiales de relleno antrópico producto de la excavación para la conformación de las plataformas de perforación, en el sector occidental de la Quebrada La Colosa, incrementa las fuerzas inestabilizantes en esta zona y permite la infiltración de agua lluvia y de escorrentía, deteriorando las condiciones del subsuelo, por ejemplo, para la adecuación de la vía de acceso a la zona de interés, los materiales en la pata del talud fueron retirados quedando sin soporte los materiales del talud superior constituyéndose en elemento detonante de los primeros movimientos de la ladera.

En el documento “Estudio General de Riesgos Integrales del Proyecto de Exploración y Explotación Minera La Colosa, Colombia” (Martínez Rivillas, 2009), se plantea que el agua cianurada a aplicar a la roca triturada por día tendría una concentración de 198 mg de cianuro por litro de agua, lo que supone los siguientes escenarios (situaciones hipotéticas) de impacto hídrico:

- Descarga de cianuro de sodio por un accidente de transporte cerca a cualquier tributario del río Bermellón.
- Descarga del agua cianurada a cualquier tributario del río Bermellón, por colapso de piscinas de cianuración por actividad sísmica y/o deslizamientos asociados.
- Derrame de la mezcla de agua cianurada con la roca triturada (lodos y aguas cianuradas residuales) con descarga a cualquier tributario del río Bermellón, por acciones deliberadas o accidentales.

Según el POMCA del río Coello, se calcula que 12.595 usuarios se encuentran suscritos a distintos acueductos abastecidos por aguas concesionadas de este río, lo que implicaría un riesgo potencial de grandes magnitudes en el evento de una contaminación por cianuro.

Evaluación de la amenaza sísmica volcánica

Se identifican primordialmente dos metodologías para la evaluación de la amenaza sísmica:

Análisis determinístico de amenaza sísmica (*Deterministic Seismic Hazard Analysis –DSHA–*). Durante muchos años fue la herramienta primordial de la ingeniería sísmica para la evaluación de la amenaza en una zona determinada. El uso del DSHA implica la definición de un escenario particular, en el cual se basa la estimación del movimiento del terreno y los efectos secundarios relacionados. El escenario se define como un sismo de magnitud conocida, el cual sucede en un sitio determinado. Los pasos a seguir, para llevar a cabo un DSHA, son:

- Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis. Se requiere definir cada fuente en términos de su geometría y sismicidad.
- Selección de la distancia de la fuente al sitio. Generalmente se toma la menor distancia existente entre la fuente y el lugar de análisis.
- Selección del sismo de análisis, el cual representa de la mejor manera el potencial sísmico de la fuente en consideración, en términos de la intensidad en el sitio bajo estudio.
- Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, o cualquier otro parámetro.

El DSHA indica el peor caso posible del efecto sísmico en el sitio de análisis. Cuando se emplea para la evaluación de la amenaza en estructuras primordiales, puede estimarse la mayor intensidad que puede afectar dichas estructuras. Sin embargo, no se toma en cuenta cuál es la probabilidad de ocurrencia de ese evento, si es probable o no que ocurra en el sitio escogido, qué tan probable es que suceda a lo largo de un período determinado, ni cuál es el grado de incertidumbre asociado a las variables involucradas en el problema. En general, el análisis determinístico no se emplea ni se recomienda como herramienta única del análisis de la amenaza sísmica. Puede ser usado principalmente como herramienta de calibración de modelos más refinados,

siempre y cuando se cuente con información histórica suficiente, o para el análisis retrospectivo de eventos históricos específicos.

Análisis probabilístico de amenaza sísmica (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis –PSHA-*). Enfoque desarrollado en las últimas décadas con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, etc., son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilístico de amenaza sísmica. Los pasos a seguir para llevarlo a cabo, son:

- Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de puntos de inicio de la ruptura en el área de falla definida.
- Selección de las funciones de atenuación que permitan caracterizar completamente la amenaza en el sitio. Según el alcance del análisis se requerirán funciones de atenuación de aceleración, velocidad, desplazamiento, componentes espectrales de los anteriores parámetros, duración, etc. Debe involucrarse la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros, generalmente indicada en cada modelo de atenuación.
- Finalmente se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtiene una curva de amenaza, la cual indica la probabilidad que una intensidad específica sea igualada o excedida en un periodo de tiempo determinado.

El PSHA es comúnmente más usado para la elaboración de mapas de movimientos de terreno y como referencia para la construcción de edificios que deberían ser capaces de resistir un terremoto, al estar basado en el parámetro de la aceleración pico de terreno (PGA).

Amenaza sísmica volcánica del volcán Cerro Machín

Ante las ventajas del análisis probabilístico frente al determinista, al tomar en cuenta las condiciones locales (geología, características geotectónicas), parámetros como la aceleración pico de terreno (PGA), la profundidad del hipocentro y la distancia al epicentro, este es el usado en la determinación de la amenaza sísmica del VCM.

Primero se definieron tres (3) escenarios sísmicos asociados al VCM. El primer escenario se definió a partir de la actividad sísmica histórica del volcán Cerro Machín registrada por el Observatorio Sismológico de Manizales para el periodo enero de 2006 a marzo de 2011, generando una base de datos/día que incluía: Numero de sismos, Nivel de actividad, Tipo de sismo: VT (volcano tectónico o de alta frecuencia) o LP (largo

periodo o baja frecuencia), Enjambres, Incremento de actividad, Magnitud máxima registrada (escala de Richter), Profundidad máxima registrada (Km), y Observaciones.

Luego, se calculó el valor promedio para: Magnitud máxima registrada y Profundidad máxima registrada, obteniéndose el Escenario 1, con una Magnitud de 2.0 (escala Richter) y Profundidad 5 Km.

El segundo Escenario corresponde a la máxima magnitud sísmica registrada en el VCM, la cual corresponde a un sismo de Magnitud 4.3 y Profundidad de 5 Km, presentado en noviembre de 2008, y durante el cual Ingeominas reportó agrietamiento de algunas viviendas y deslizamientos.

El tercer escenario corresponde al evento sísmico volcánico máximo registrado por un volcán con características similares al Cerro Machín. Para lo cual se toma los datos registrados por el volcán Monte Pinatubo, el cual presenta características similares al Cerro Machín y fue tomado por Ingeominas como referencia para la elaboración de la amenaza volcánica del Cerro Machín (Cepeda et al., 2002). El Escenario 3 equivale a una Magnitud de 5.7 y Profundidad de 10 Km ocurrida en junio de 1991¹

Para cada uno de los escenarios se calculó el PGA, aplicando la ecuación de Joyner y Boore (1981) que es un método equivalente al método analítico usado por Richter en los años 50 para trazar las curvas de atenuación en California que le permitieron definir M_L . Básicamente se trata de un método de regresión lineal múltiple por mínimos cuadrados en dos etapas: en la primera se determinan los parámetros que controlan la dependencia con d (distancia) y una serie de factores de amplitud a_i (uno por evento analizado). En la segunda etapa se obtienen los parámetros que gobiernan la dependencia con M (magnitud) maximizando, a su vez, la función de verosimilitud (el Principio de Máxima Verosimilitud establece que la mejor estimación de los coeficientes es aquel conjunto de valores para el cual es máxima la probabilidad de encontrar la muestra de datos) del conjunto de factores de amplitud.

La función de Joyner y Boore (1981), consiste en:

$$\begin{aligned} \text{Aceleración máxima } PGA &= 10^{(0,29+m - \text{Log } D - 0.0025D - 1,02)} \\ \text{Distancia hipocentral } D &= (E^{(2 + 7,3^2)})^{0,5} \end{aligned}$$

El cálculo se realizó para 36 kilómetros, cubriendo así toda el área de estudio. Luego, los valores de PGA fueron convertidos a la escala Modificada de Mercalli (MMI) para obtener la amplificación topográfica, mediante la función general de Trifunac & Brady (1975):

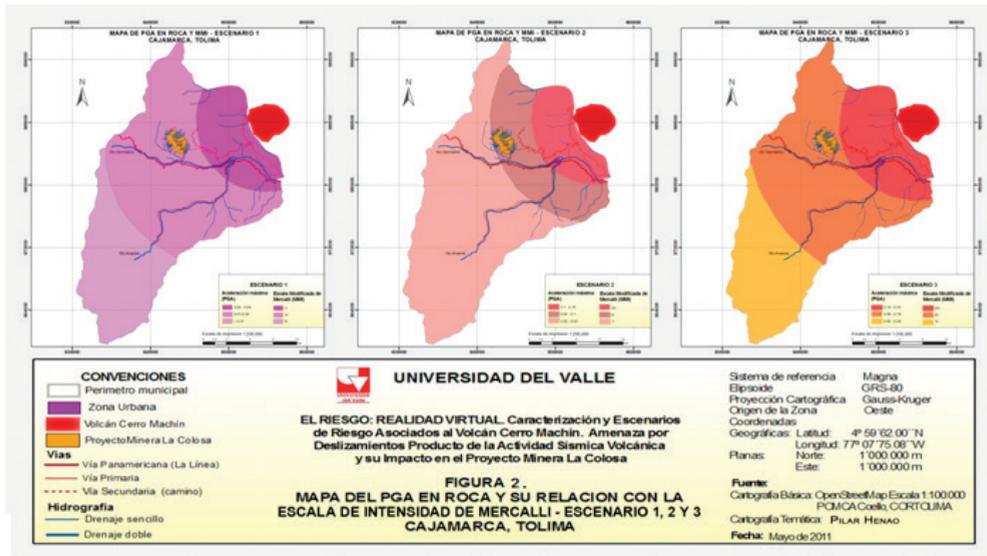
$$MMI = 1/0.3 * (\log_{10}(PGA * 980) - 0.014)$$

El primer mapa de la Figura 2, correspondiente al PGA para el Escenario sísmico volcánico 1, presenta para el área del Proyecto Minera La Colosa aceleraciones entre

¹ Fuente: http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/significant/sig_1991.php

0.01 y 0.02, que aunque se consideren que produce una sacudida baja, como la de un vehículo pesado que golpea un edificio, esta puede balancear apreciablemente los automóviles estacionados, es decir, su sacudida es visualmente apreciable, y si se considera que este tipo de escenario presenta una tasa de ocurrencia mayor que la de los otros escenarios, se podría traducir a largo tiempo en fracturas en las estructuras de la zona debido a la acumulación y constancia de este tipo de esfuerzo.

Figura 2. Mapa del PGA en roca y su relación con la escala de intensidad de Mercalli – Escenario 1, 2 y 3



Fuente: Elaboración propia.

Para el Escenario 2 (ver segundo mapa en la Figura 2), la sacudida en la zona del Proyecto Minera La Colosa es percibida como fuerte, con aceleraciones entre 0.05 y 0.1, que pueden producir volcamientos de objetos, fisuras en estructuras, y en general daños leves.

Del tercer mapa de la figura 2, perteneciente al Escenario 3, se nota que en general toda la región noroeste del municipio (incluido el casco urbano de Cajamarca) presentaría aceleraciones máximas entre 0.19 y 0.33 g, que significa que la sacudida sísmica sería percibida a partir de niveles considerados como severos. Además, en este escenario, el área donde se localiza el Proyecto Minera La Colosa presentaría niveles de sacudida considerados como muy fuertes, que corresponden a una intensidad (MMI) de VII, con aceleraciones entre 0.09 y 0.19 que implica daños y colapso en estructuras de construcción deficiente o mal diseñadas (mampostería tipo D), algunas grietas en estructuras ordinarias de buena construcción (mampostería tipo C), algunas grietas en edificios con buen diseño y construcción (mampostería tipo B), ondas en embalses y

depósitos de agua. Es decir, esta intensidad podría ocasionar fallas estructurales en la Mina La Colosa y/o producir derramamiento del contenido de mezcla de cianuro de su dique de colas y piscinas de cianuración.

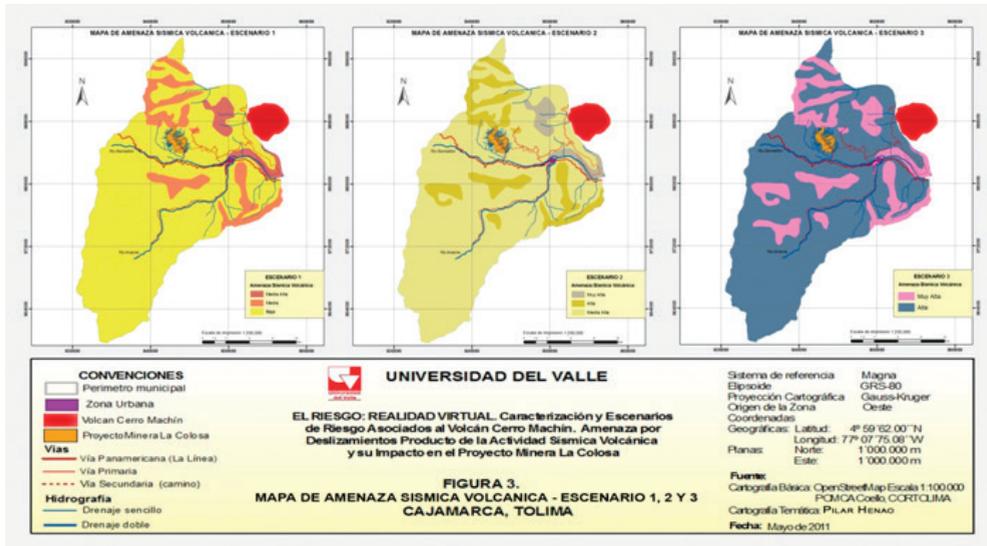
Seguidamente, a partir del Mapa Geológico de Colombia-MGC (Gómez et al., 2007), a escala 1:1'000.000 y de la Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento del Tolima (Núñez Tello, 2001), se establecieron las unidades de suelo y, de acuerdo al tipo, se les aplicó un factor de amplificación o efecto de sitio, que es una modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, amplificando dicha señal en varios órdenes de magnitud. En el presente trabajo únicamente se estudia el efecto de sitio en lo que se refiere a la amplificación de la señal sísmica debido a las características geológicas y la composición litológica de las formaciones superficiales, así, a los depósitos de cenizas y lapilli de composición andesítica (Q-p), flujos vulcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica y dacítica (Q2-vc) y a los flujos vulcanoclásticos constituidos por piroclastos y epiclastos de composición andesítica (hipoabisales) (Q-vc), les fue asignado una amplificación de 2.0 y a los esquistos grafiticos, cuarzomoscovíticos, cloríticos y anfibólicos; filitas, cuarcitas, mármoles y serpentinitas (NP?CA?-Mev2), una amplificación de 1. Estos valores se usaron para hallar la amenaza sísmica relativa para cada de los tres escenarios sísmico volcánico, multiplicando para cada unidad geológica el PGA por la amplificación del suelo. El valor que se obtuvo fue convertido a la escala Mercalli Modificada (MMI), para posteriormente ser clasificado de acuerdo al grado de amenaza sísmica (Tabla 2).

Tabla 2. Amenaza Sísmica Relativa

| Grado de Amenaza Sísmica Volcánica | MMI |
|------------------------------------|----------|
| Muy Alta | IX |
| Alta | VII-VIII |
| Media Alta | VI |
| Media | V |
| Baja | IV |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Mapa de amenaza sísmica volcánica. Escenario 1, 2 y 3.



Fuente: Elaboración propia.

La amenaza sísmica es baja para el escenario 1 (ver Figura 3, primer mapa) en la zona de localización del Proyecto Minera La Colosa, presentándose una intensidad de IV en la escala Modificada de Mercalli (MMI), que aunque se siente como la vibración producida por el paso de un vehículo pesado, puede hacer oscilar objetos suspendidos, bambolear vehículos estacionados, crujir paredes en madera, lo que indica que puede causar oscilaciones suaves en depósitos de líquidos como las piscinas de cianuración. En el escenario 2 (ver Figura 3, segundo mapa), la amenaza sísmica es media alta, con una intensidad de MMI de VI que hace que se tenga dificultad para caminar con estabilidad, muebles pesados son desplazados o volcados, el contenido líquido de recipientes y tanques es perturbado y se pueden derramar, y estructuras de baja calidad y mampostería tipo D se fisuran. Para el escenario 3 (ver Figura 3, tercer mapa), la amenaza sísmica es alta en La Colosa, con intensidades entre VII Y VIII de MMI, lo que puede producir daños y colapso en estructuras de construcción deficiente o mal diseñadas (mampostería tipo D), algunas grietas o colapso parcial en estructuras ordinarias de buena construcción (mampostería tipo C), algunas grietas en edificios con buen diseño y construcción (mampostería tipo B), caída de chimeneas de fábricas, monumentos y tanques elevados, cambio en el flujo o temperatura de pozos, ondas en embalses y depósitos de agua, y grietas en terreno húmedo y en taludes inclinados. Entonces, el escenario 2 y 3 de amenaza sísmica en el área del Proyecto Minera La Colosa puede afectar la integridad de las instalaciones del proyecto, causando derrames o lixiviación de cianuro de las pilas hasta los acuíferos.

Evaluación de la amenaza por deslizamientos

Movimientos en masa es un término amplio para designar cualquier tipo de movimiento ladera abajo del terreno. Por comodidad, se engloba como deslizamientos a fenómenos relacionados como flujos de tierra y flujos de detritos, caídas de rocas y avalanchas. Los deslizamientos de tierra ocurren como resultado de cambios, súbitos o graduales, en la composición, estructura, hidrología o vegetación de una ladera. Estos cambios puede ser causados por factores naturales, como: Condiciones de suelo y roca; Topografía; Lluvia; Actividad Sísmica (ver Tabla 3); Actividad volcánica y meteorización hidrotermal; Deforestación; y/o por factores relacionados con la actividad humana, como: Excavaciones para la construcción de viviendas, edificios, escuelas, puentes y carreteras; Vibraciones (explosiones en la construcción o minería, al construir carreteras, maquinaria, tráfico y truenos. Las vibraciones producidas actúan como pequeños temblores fracturando y debilitando las rocas); Sobrecargas como resultado del aumento de peso (se produce debido a varios tipos de construcciones sobre el suelo, rellenos, terraplenes, acumulación de materiales y de agua); Actividad minera (originada por la extracción de materiales a cielo abierto –canteras-); Interrupción del curso de las aguas y cambios en el agua potable; y Nuevas construcciones en las cuales se usan métodos de “desmonte y terraplén”, los cuales perjudican la estabilidad de la ladera.

Tabla 3. Posibilidad de deslizamientos causados por sismos

| Magnitud del sismo | Tipo de deslizamiento producido |
|--------------------|---|
| 4.0 | Caído de roca, deslizamientos de roca, caído de suelo y alteración de masas de suelo. |
| 4.5 | Deslizamiento de translación, rotación y bloques de suelo. |
| 5.0 | Flujos de suelo, esparcimientos laterales, deslizamientos subacuáticos. |
| 6.0 | Avalanchas de roca. |
| 6.5 | Avalanchas de suelo. |

Fuente: Keefer, 1984.

El análisis para amenaza por deslizamientos puede realizarse sobre un área donde se tiene información de la ocurrencia de deslizamientos o se tiene un inventario de estos eventos, o sobre áreas en las cuales no se tiene conocimiento de deslizamientos en el pasado, pero se requiere predecir la posibilidad de amenazas hacia el futuro. En el primer caso se trabaja con una metodología de mapeo directo con base en la experiencia y en el segundo una de mapeo indirecto con base en los factores que contribuyen a su ocurrencia.

Existen técnicas de análisis relativo y técnicas de análisis absoluto. El análisis relativo

presenta la posibilidad diferencial de ocurrencia de deslizamientos sin dar valores exactos y en el análisis absoluto se presentan factores de seguridad o probabilidad real de ocurrencia de movimientos.

Carrara, 1983 diferenció las técnicas de zonificación en tres formatos así:

- Modelos de caja blanca (White box model), los cuales se basan en modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos. A estos se le conocen como modelos determinísticos.
- Modelos de Caja negra (Black box model), los cuales se basan en análisis estadístico solamente.
- Modelos de caja gris (Gray box model), basados parcialmente en modelos físicos y parcialmente en estadística (análisis heurístico).

No existe un procedimiento estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad a los deslizamientos y existe mucha libertad en la determinación de los pasos a seguir. En este tipo de mapas se zonifica las unidades de terreno que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores que pueden producir deslizamientos y el mapa de inventario de deslizamientos.

En áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos se pueden identificar las áreas de acuerdo a su topografía. Si se posee un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad, y se puede combinar formación geológica y topografía para identificar áreas diferentes dentro de la misma formación. Combinando mapas de pendientes y de geología dentro de un sistema de información geográfica se pueden lograr resultados interesantes.

Se deben tener en cuenta otros factores tales como uso de la tierra y drenaje. Para la elaboración del mapa de susceptibilidad se tienen en cuenta generalmente tres elementos:

- 1) Inventario de deslizamientos ocurridos en el pasado.
- 2) Topografía y mapa de pendientes
- 3) Características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del terreno.

Amenaza por deslizamientos en el municipio de Cajamarca

Para determinar la susceptibilidad y/o facilidad con la que un fenómeno como los deslizamientos pueda ocurrir sobre las condiciones locales del terreno en el municipio de Cajamarca, se procedió a definir los atributos primarios y secundarios del terreno.

- 1) Primarios: a partir de un modelo de elevación digital (MED) con una resolución de 30 m, se calcularon los atributos primarios del terreno, mediante el uso de

la herramienta Spatial Analyst y su módulo Surface Analysis de ArcGis 9.3, obteniendo:

- Curvas de nivel: a través del módulo de operaciones Contour, con una diferencia de nivel entre curvas de 25 m. El valor mínimo de curva de nivel fue de 1550 msnm y el más alto de 3700 msnm.
- Pendiente: mediante la operación denominada Slope, se obtuvo un mapa de la variación en porcentaje de la pendiente del terreno. Al cual se le modifico los intervalos, así: 0-2%; 2-15%; 15-30%; 30-70% y >70%
- Orientaciones de ladera: se calculó con el módulo de operación Aspect, que permite ver el ángulo de orientación con respecto al norte y determinar la estabilidad del territorio.
- Mapa de pendientes: con las tres capas calculadas, se re-clasificó generando el mapa final de pendientes.

- 2) Secundarios o compuestos: incluyen la combinación de dos o más atributos primarios y se pueden usar para caracterizar la variabilidad espacial de procesos específicos que ocurren en el paisaje, tales como el contenido y distribución de agua en el suelo o la susceptibilidad a la erosión laminar (Moore et al., 1991).

Luego, a cada una de las variables temáticas (pendiente, geología, geomorfología, condiciones de agua subterránea, y uso del suelo y cobertura vegetal) se le asignó un “peso”, a saber:

- Unidades geológicas: en el municipio se presentan 4 unidades litoestratigráficas, que son básicamente de origen ígneo (rocas Hipoabisales, depósitos de origen volcánico) y metamórfico (p.e. esquistos, mármoles), asignándoseles un peso de 1.5.
- Unidades geomorfológicas: el modelamiento del paisaje en el municipio está relacionado con procesos denudativos y estructurales, asociado con esfuerzos tectónicos y levantamiento de la cordillera Central. Las geoformas que se presentan son principalmente laderas de pendiente suave a fuertemente inclinada, a las cuales se les asigno un peso de 1.5.
- Pendiente: los pesos asignados a las clases de pendientes presentes en el municipio de Cajamarca, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Peso según grado de susceptibilidad a deslizamientos de la pendiente

| Clase de Pendiente | | | Peso |
|--|--------|-------|------|
| Relativa | Grados | % | |
| Muy Baja (planas a suaves) | 0-2 | 0-2 | 0.5 |
| Baja (leves) | 2-8 | 2-15 | 0.5 |
| Mediana (moderadas) | 8-16 | 15-30 | 0.5 |
| Alta (inclinadas) | 16-35 | 30-70 | 1.0 |
| Muy Alta (muy inclinadas o escarpadas) | >35 | >70 | 1.7 |

Fuente: Elaboración propia

- Uso de la tierra y cobertura vegetal: en el Tabla 5. se muestran las coberturas presentes en el área y sus respectivos pesos.

Tabla 5. Peso según grado de susceptibilidad a deslizamientos del uso y cobertura de la tierra

| Uso de la Tierra y Cobertura Vegetal | Peso |
|--------------------------------------|------|
| Bosque | 0.8 |
| Cultivos | 2.0 |
| Pastos | 1.35 |
| Rastrojos | 1.35 |
| Tierras eriales | 2.0 |
| Vegetación de Páramo | 0.8 |

Fuente: Elaboración propia.

- Condiciones de agua subterránea: por sus condiciones edafológicas y por estar cubierta por tres micro-cuencas, Cajamarca es una zona muy húmeda, por lo que se le aplicó un peso de 0.5 definido según la Tabla 6.

Tabla 6. Peso según grado de susceptibilidad a deslizamientos por condiciones de agua subterránea

| Uso de la Tierra y Cobertura Vegetal | Peso |
|--------------------------------------|------|
| Inundable | 1.0 |
| Pantanosos | 0.8 |
| Muy Húmedo | 0.5 |
| Húmedo | 0.2 |
| Seco | 0.0 |

Fuente: Elaboración propia.

A partir del método multicriterio, y asignado un peso a cada variable temática, con la utilización de los sistemas de información geográfica, en este caso el software ArcGis 9.3 se interceptaron las 5 capas (pendiente, geología, geomorfología, condiciones de agua subterránea, y uso del suelo y cobertura vegetal), generándose un total de 380 polígonos, clasificando cada uno de acuerdo a la Tabla 7, obteniendo una cartografía final, de zonas de alta, media y baja amenaza.

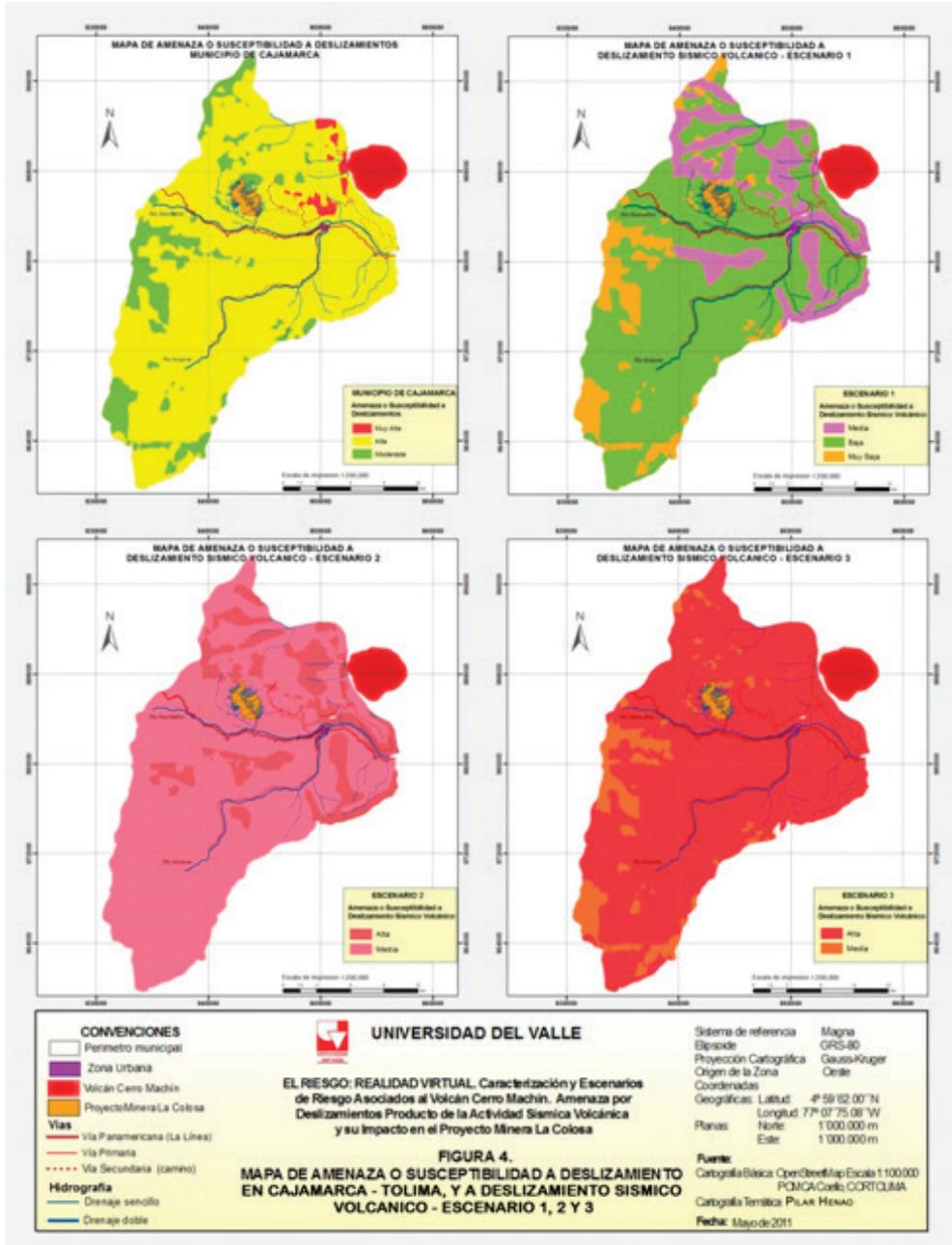
Tabla 7. Clasificación de la amenaza o susceptibilidad a deslizamientos según la sumatoria de los pesos

| Amenaza Total | Descripción | Suma de los pesos |
|---------------|------------------|-------------------|
| I | Amenaza Muy Baja | <2.5 |
| II | Amenaza Baja | 2.5 a 4 |
| III | Amenaza Moderada | 4.1 a 5.0 |
| IV | Amenaza Alta | 5.1 a 6.5 |
| V | Amenaza Muy Alta | >6.5 |

Fuente: Adaptado de Ambalagan, 1992.

En la Figura 4 (primer mapa), se observa que la amenaza o susceptibilidad a deslizamientos para el municipio de Cajamarca es alta en más del 80% de su territorio, debido a que es una zona montañosa, de pendientes fuertes, regímenes climáticos severos, complejidad litológica y estructural, y uso inadecuado de la tierra.

Figura 4. Mapa de amenaza o susceptibilidad a deslizamiento Cajamarca – Tolima, y a deslizamiento sísmico volcánico - Escenario 1, 2 y 3



Fuente: Elaboración propia

Amenaza a deslizamientos producto de la actividad sísmica volcánica del Cerro Machín. Para cada uno de los Escenarios sísmicos volcánicos, se hizo la intercepción del Mapa de Amenaza Sísmica Volcánica con el Mapa de Amenaza o Susceptibilidad a Deslizamientos, clasificándolo de acuerdo a la Tabla 8, por ejemplo, amenaza sísmica volcánica baja con amenaza a deslizamientos alta, da un valor de 4, que posteriormente es clasificado según la Tabla 9 en amenaza baja a deslizamientos de tierras provocado por un sismo volcánico.

Tabla 8. Clasificación posibles combinaciones de susceptibilidad de deslizamientos con amenaza sísmica volcánica

| | | PGA | | | | |
|--|--------------|----------|-----------|----------------|----------|--------------|
| | | Baja (1) | Media (2) | Media Alta (3) | Alta (4) | Muy Alta (5) |
| AMENAZA O SUSCEPTIBILIDAD A DESLIZAMIENTO | Muy Baja (0) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Baja (1) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | Moderada (2) | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| | Alta (3) | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| | Muy Alta (4) | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

Fuente: Adaptado de Terlien y Van Westen (1996)

Tabla 9. Clasificación de la amenaza o susceptibilidad a deslizamientos sísmico volcánico

| Amenaza Total | Descripción | Valor |
|---------------|------------------|-------|
| I | Amenaza Muy Baja | 1-3 |
| II | Amenaza Baja | 4 |
| III | Amenaza Media | 5-6 |
| IV | Amenaza Alta | 7-8 |
| V | Amenaza Muy Alta | 9 |

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4, en los mapas de susceptibilidad a deslizamiento sísmico volcánico para cada uno de los tres escenarios evaluados, muestra que la predisposición para desencadenarse movimientos en masa en el municipio de Cajamarca, es preponderantemente baja para un sismo de Magnitud 2.0 (escenario 1), media para un sismo de Magnitud 4.3 (escenario 2) y alta para un sismo de Magnitud 5.7 (escenario 3).

Amenaza a deslizamientos sísmico volcánico en el proyecto minera

La Colosa. La Figura 5 presenta la amenaza a deslizamiento sísmico volcánico en el proyecto Minera La Colosa para cada uno de los escenarios propuestos para la actividad sísmica del volcán Cerro Machín. Estos se obtuvieron al interceptar el polígono del proyecto minero con la variable temática de amenaza a deslizamiento sísmico.

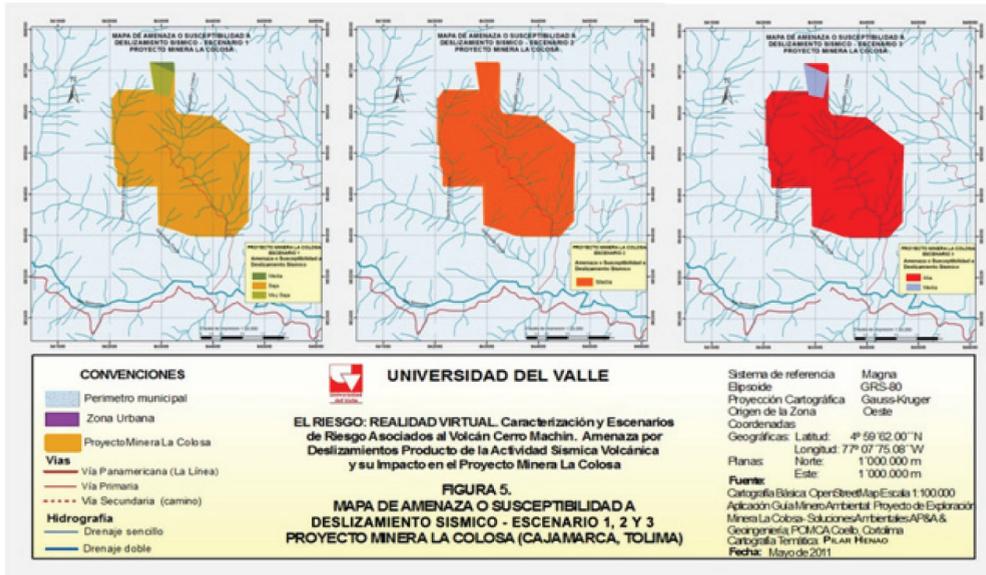
Los mapas indican que el Proyecto Minera La Colosa, actualmente en fase de exploración, se encuentra en una zona susceptible a deslizamientos y que además pueden ser detonados por eventos sísmicos. En el primer escenario (ver primer mapa, Figura 5) la amenaza es baja para gran parte del polígono, en el segundo escenario (evento sísmico máximo del Machín, segundo mapa Figura 5) es media, y para el evento máximo asociado a volcanes similares al Cerro Machín (escenario 3, tercer mapa Figura 5) es alta. Lo anterior, configura un escenario global con características propicias para la generación de deslizamientos en la zona, producto de la sismicidad asociada al Cerro Machín, sin contar, con los eventos relacionados a otras fuentes sísmicas, e inclusión de detonantes como la lluvia y las explosiones y vibraciones producidas por la actividad minera, que pueden inducir a fallas estructurales de la explotación minera.

Al estar en fase de exploración, la información sobre la fase de Explotación del Proyecto Minera La Colosa no está disponible en su totalidad, por lo tanto, el análisis de estabilidad de taludes y factor de seguridad no fue posible llevarlo a cabo, siendo, la susceptibilidad a deslizamientos asociados a la actividad sísmica del Volcán Cerro Machín, un indicador de riesgo (de partida) de la posibilidad de falla estructural en la mina por dicho factor, debido a que el desarrollo de deslizamientos en la zona se facilita a causa de la respuesta de alta plasticidad del horizonte de cenizas volcánicas de las pendientes naturales dentro del área del proyecto, pues, dicha capa de suelo, se considera como una unidad geotécnica e hidrogeológica posible contenedora de acuíferos locales, con permeabilidades variables, que aunado a la actividad sísmica volcánica y a los impactos causados por la minería (cargas dinámicas producidas por las voladuras, pérdida de confinamiento por movimientos de tierra y la subsecuente pérdida de resistencia capilar, entre otras) se vuelve más inestable.

Los tres escenarios sísmicos propuestos para el volcán Cerro Machín, muestran que pueden ser detonadores de deslizamientos, debido a las características del terreno (geológicas, geomorfológicas, de humedad, de pendiente, de usos y cobertura, edafológicas, de historicidad de los fenómenos, entre otras), dos variables no tenidas en cuenta, pero relevantes en futuras investigaciones, es el factor lluvia y frecuencia de ocurrencia de los escenarios, lo cual, delinearía un escenario más profundo de análisis y sobretodo de predicción.

La Mina La Colosa presenta un alto grado de paralelismo con la Mina Bellavista (en Miramar, Costa Rica), es decir, explotaciones mineras de oro a tajo abierto por lixiviación en pilas con cianuro, localizadas en áreas de cuencas hidrográficas y de terrenos abruptos, que configuran una la relación peligrosa entre deslizamientos y minería, y su impacto sobre el recurso agua. En la Mina de Bellavista se produjo

Figura 5. Mapa amenaza o susceptibilidad a deslizamiento sísmico volcánico en el Proyecto Minera La Colosa - Escenario 1, 2 y 3



Fuente: Elaboración propia.

un deslizamiento que rasgó y dejó marcas en la faz del sitio minero, deslizándose cuesta abajo, arrancando árboles de sus raíces y destrozando carreteras. La planta de procesamiento de un millón de dólares quedó destruida y en peligro la integridad de las garantías medioambientales de la mina, quedando en vilo el futuro del suministro de agua potable de Miramar, a sólo dos kilómetros debajo de la mina. En el caso de la Mina La Colosa, su impacto sobre el recurso agua y por ende sobre todos los usuarios y actividades que de esta dependen es de proporciones gigantescas, pues este proyecto está sobre la Quebrada La Colosa y Quebrada La Arenosa, la cual desemboca a la Quebrada Guala, y estas al río Bermellón, tributario de la cuenca Coello, que hacer parte de la cuenca media del río Magdalena.

Debido a las dimensiones y características del fenómeno sísmico asociado al Cerro Machín, se deben tener en cuenta las limitaciones de la evaluación de la amenaza, debido a la condición dinámica y cambiante de los riesgos, por lo cual, estas evaluaciones deben ser actualizadas y complementadas periódicamente, donde un Sistema de Información Geográfica constituiría una forma rápida y de amplio alcance para hacerlo.

Es necesario que estas evaluaciones se traduzcan en acciones y/o apoyo en decisiones sobre el ordenamiento del territorio, donde prime el Principio de Precaución sobre el de conveniencia y/u oportunidad. Siendo necesario que todos: implicados y no implicados, entiendan los reales alcances y/o repercusiones de nuestras actuaciones y decisiones, que son las que construyen el riesgo. Así, para el caso de la Mina La Colosa,

las autoridades municipales, departamentales y nacionales deben aunar criterios y fuerzas para que prevalezca el bienestar de todos y el respeto por la Ley, sobre el de intereses particulares y momentáneos, pues, estamos hablando de un servicio ecosistémico de carácter e interés público: el agua.

Referencias bibliográficas

- Alcaldía De Cajamarca. 2000. Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT). Decreto 073 del 29 de Diciembre.
- Ambalagan, R. 1992. Terrain evaluation and landslide hazard zonation for environmental regeneration and land use planning in mountainous terrain. Proceedings of the sixth International Symposium on Landslides, Christchurch, p. 861-871.
- Beck, Ulrich. 1992. Risk Society: Towards a New Modernity. Londres: Sage.
- _____. 2000. Retorno a la teoría de la «sociedad del riesgo». En: Boletín de la A.G.E. No. 30, p. 9-20
- Campbell, K. W. Near-Source Attenuation of Peak Horizontal Acceleration. En: Bull. Seism. Soc. Am. 71(6), 2039-2070, 1981.
- Carrara, A. 1983. Multivariate models for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, Vol. 15, No. 3, p. 403-427.
- Cepeda, H., Cortes, G.P. & Mendez, R.A. 2002. Evaluación de la amenaza volcánica potencial del Cerro Machín (departamento del Tolima, Colombia). Bogotá: INGEOMINAS.
- Cepeda, H., Muñoz, F. & Velasquez, E. 1999. El volcán Cerro Machín. La prevención de desastres y el ordenamiento territorial. Bogotá: INGEOMINAS.
- CORTOLIMA. 2006. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Coello. Acuerdo CORTOLIMA No. 032 de Noviembre 9.
- Espinal, S. 1977. Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Memoria Explicativa sobre el Mapa Ecológico. Bogotá: IGAC, 238 p.
- INGEOMINAS. 2000. Atlas de amenaza volcánica en Colombia, 119p
- Joyner, W. B. & Boore, D. M. 1981. Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Records Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. En: Bull. Seism. Soc. Am. 71(6), p. 2011-2038
- Kanungo, D.P. 1993. Studies on slopes, landslides and mass movements in Himalaya, India. En: Seventh international conference and field workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, p. 35-41.
- Keefer, D.K. 1984. Landslides caused by Earthquakes. En: Geological Society of America Bulletin, Vol. 95, pp. 406-421
- Keller, E. & Blodgett, R. 2007. Riesgos naturales. Madrid: Pearson Educación, S.A., 442 p.
- Loon, Joost Van. 1998. Risk and Technological Culture: Towards a Sociology of Virulence y Piet Strydom, Risk, Environment and Sociology: Ongoing Debates, Current Issues and Futures Prospects. Barcelona: Paidós.

- Martinez Rivillas, A. 2009. Estudio general de riesgos integrales del proyecto de Exploración y Explotación Minera La Colosa, Colombia.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. & Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling review of hydrological, geomorphological and biological applications. En : Hydrological Processes, 5, p. 3-30
- Soluciones Ambientales AP&A & Geoingeniería. 2008. Estudio Ambiental para la Solicitud de Sustracción de un Área de la Reserva Central, Municipio de Cajamarca, Departamento del Tolima, Proyecto de Exploración Minera. Bogotá: AngloGold Ashanti Colombia S.A.
- Terlien, M.T.J. & Van Westen, C.J. 2011. Zonificación regional del peligro de deslizamiento de tierra. [En línea]. [Consultado el 15 de marzo]. Enschede, Holanda: International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), 1996. Disponible en Internet: <<http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/start.html>>
- Thomas Bohórquez, J. 2005. Amenazas, riesgos y planificación territorial. Un acercamiento metodológico. En: Perspectiva Geográfica. No. 11. Tunja: Uptc, p. 89-126.
- Trifunac, M. D. & Brady, A. G. 1975. A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion. En: Bull. Seism. Soc. Am. 65(3), p. 581.626
- Tsige, M. & Garcia Florez, I. 2006. Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. En: Geogaceta, 40, p. 39-42