

Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba

Integrating methods for assessing the risks of landslides and floods in the Tunari basins and the Alto Cochabamba area

Willman García F., Mirko Delfin S., Mauricio Ledezma P. y Boris Arévalo S.

Universidad Católica Boliviana “San Pablo”, Calle M. Márquez esq. Plaza Jorge Trigo s/n, P.O. Box 5381, Cochabamba, Bolivia

wgarcia@ucb.edu.bo

Resumen: El estudio enfatizó una evaluación de riesgos en dos cuencas piloto de la cordillera del Tunari (K'horá en Tiquipaya y Kaquerama en Sacaba) y en la zona de Alto Cochabamba. Se utilizaron tres métodos integrales: *i)* Evaluación participativa (cualitativa y cuantitativa) de riesgo, *ii)* Mapeo de vulnerabilidades de deslizamientos con SIG y *iii)* Corrida de modelos hidrológicos e hidrodinámicos bidimensionales para simulación de inundaciones. Existe un alto grado de riesgo de incendios forestales y mazamoras; riesgo medio de inundaciones y deslizamientos, con elementos vulnerables altamente expuestos (urbanizaciones) en las torrenteras de ambas cuencas y en la zona de Alto Cochabamba. Se evidencia una falta de mantenimiento de obras estructurales de reducción de riesgos y muy baja implementación de nuevas obras. Las simulaciones muestran que hay un amplio rango de inundación principalmente en la parte media y baja de la cuenca afectando poblaciones establecidas, servicios básicos y medios de vida en general.

Palabras clave: Deslizamientos, inundaciones, mazamorra, cuenca, torrenteras, riesgos

Summary: The study emphasized a risk assessment in two pilot basins in the Tunari mountain range (K'horá in Tiquipaya and Kaquerama in Sacaba) and in the Alto Cochabamba area. Three comprehensive methods were used: *i)* Participatory evaluation (qualitative and quantitative) of risk, *ii)* Mapping of landslide vulnerabilities with GIS and *iii)* Run of two-dimensional hydrological and hydrodynamic models for flood simulation. There is a high degree of risk of forest fires and mazamoras; medium risk of floods and landslides, with highly exposed vulnerable elements (urbanizations) in the streams of both basins and in the Alto Cochabamba area. There is evidence of a lack of maintenance of structural works to reduce risks and very low implementation of new works. The simulations show that there is a wide range of flooding mainly in the middle and lower part of the basin affecting established populations, basic services and livelihoods in general.

Keywords: Landslides, floods, mazamorra, basin, streams, risks

1 INTRODUCCIÓN

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) enfatizó que el calentamiento global es un hecho, y predijo que la temperatura global se incrementará entre 1.8 y 4 °C para el año 2100, lo cual junto con la variabilidad climática traerá graves consecuencias para el medio ambiente. Asimismo el IPCC señala que en los últimos 25 años los cambios en la temperatura fueron 4 veces más rápidos que en los últimos 150 años y el Cambio Climático se ha convertido en el problema ambiental de mayor trascendencia del siglo XXI. El cambio climático lleva a cambios en la frecuencia, intensidad, extensión, duración y temporalidad de los eventos extremos (IPCC 2012a, IPCC, 2012b). El IPCC resalta con un nivel de confianza alto que las inundaciones y deslizamientos de tierra en zonas urbanas y rurales son debido a la precipitación extrema (IPCC, 2013).

Por otro lado, como consecuencia de la variabilidad climática, cada vez menos las amenazas son consideradas elementos de la naturaleza o del mundo físico, es decir, que cada vez se construye socialmente la amenaza (Lavel, 1996). Es así que las amenazas pueden ser voluntarias e involuntarias de una parte y naturales y construidas de otra. La creciente frecuencia de eventos climáticos extremos como las altas precipitaciones que ocasionan deslizamientos, mazamoras e inundaciones es interpretada como consecuencia de la variabilidad climática.

En la región Andina la variabilidad y el cambio climático significará un cambio radical en los patrones de temperatura y precipitación, más aún en zonas montañosas de Bolivia (Andersen, 2009; Comunidad Andina, 2007; Hoffmann, 2012), siendo las lluvias intensas de verano las principales causantes de flujos de detritos, aluviones, movimientos de ladera, movimientos en masa, remociones en masa, deslizamientos o mazamorra en los sistemas áridos y semiáridos (Alonso y Wayne 1992; ASAGAI, 2004; Solís, 2004). En los andes existe un incremento de las lluvias torrenciales en la estación húmeda y decremento mínimo en la estación seca, lo cual tiene importantes consecuencias con la erosión y deslizamientos (Pérez et al. 2009).

Los movimientos o procesos de ladera es el movimiento hacia afuera y debajo de una ladera bajo la influencia de la gravedad, que resulta del fallo de deslizamiento de una sección de la ladera a lo largo de un plano de fractura (Dikau, 2004). Entre los factores que favorecen su desarrollo están la inclinación de una superficie, morfología del terreno, carga por obras humanas, deforestación, sismo, agua subterránea, altas precipitaciones, alternancia de humectación-sequedad, movimientos tectónicos, actividad volcánica, entre otros (Lugo, 2011).

El objetivo del presente estudio es realizar una evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones integrando métodos activos (participativos) y pasivos (interpretativos) de análisis en dos cuencas y torrenteras del Tunari (K'horá en Tiquipaya y Kaquerama en Sacaba) y en la zona de Alto Cochabamba.

2 ANTECEDENTES

Los fenómenos naturales de movimientos de masa a lo largo de la cordillera de los Andes, según (Suárez. 2010), dependen de las condiciones geomorfológicas, geológicas y del clima imperante en los diversos sectores de esta macroforma. Este autor menciona cuatro elementos como los más importantes para la ocurrencia de los movimientos en masa: el relieve, la sismicidad, la meteorización y las lluvias intensas. En tanto que en las zonas bajas de Bolivia, la urbanización en sitios inadecuados, el manejo inadecuado de residuos sólidos y la falta de obras de reducción de riesgos de desastres, generan alta vulnerabilidad a las inundaciones (García et al. 2017).

Las remociones en masa constituyen un riesgo geológico (Ayala et al. 1987). La mejor estrategia para reducir los impactos de los deslizamientos es la prevención, que precisa de la percepción, identificación, caracterización cartográfica y evaluación de los riesgos sobre todo, en zonas montañosas (Corominas, 1993, Irigaray y Chacon, 1991). Los factores internos que influyen en la estabilidad de las laderas pueden ser características intrínsecas (litología, textura, consolidación, espesor de los materiales, parámetros estructurales de estratificación y debilidad) y las características extrínsecas (pendiente, orientación, humedad del terreno, cambios estacionales de temperaturas y precipitaciones, cambios en la vegetación). Los factores externos incluyen infiltraciones de agua, vibraciones sísmicas o por explosiones mineras, actividades humanas como tala de bosques, incendios forestales y construcciones de edificios (Ferrer y Ayala, 1997).

Se pueden reducir enormemente los daños causados por los movimientos de ladera si se utilizan medidas de mitigación apropiadas. Las partes de un deslizamiento están sometidas a tensión, compresión, inclinación, empuje, etc., en el proceso ocurre desplazamiento lateral, arrastre, carga (Leone et al. 1996). Los elementos en riesgo por movimientos de ladera se agrupan en población, edificios, estructuras, servicios e infraestructura, propiedad, actividad y medio ambientales. Asimismo, los eventos de remoción en masa no son vistos solo como un desastre natural, sino también como un desastre socioeconómico, causado por la falta de estrategias de mitigación (Felgentreff y Orgs, 2008). Las remociones en masa no siempre son consideradas como eventos individuales, sino, como una cadena de procesos con causa efectos más severos (Margili et al. 2015).

Por su parte las inundaciones no son tan naturales como parecen, está demostrado que las causas naturales de las inundaciones son magnificadas por causas debidas factores humanos. El manejo inadecuado del ambiente se pone en evidencia en la salud de la población, en su calidad de vida, medios de vida, y del Estado para hacer frente las consecuencias de las emergencias hídricas. La gestión del riesgo es lo

único que garantiza que la población involucrada esté mejor preparada para superar la emergencia o el desastre (Andrade, 2015).

Existen diferentes métodos de estudio de movimientos en masa (mazamoras) como el método Mora-Vhanson, método Morfométrico (Quesada y Barrentes, 2017, Quesada y Feoli, 2018), entre otros. Los Sistemas de Información Geográfica son una herramienta que permite la elaboración de mapas de vulnerabilidad y peligrosidad de manera sistemática, rápida y eficiente sobre todo en zonas montañosas (Irigaray, 1995, Etxeberria et al. 2005, Paz et al. 2017). Asimismo, la evaluación participativa (cualitativa y cuantitativa) de riesgos *in situ* es vital realizarla con los actores locales como método complementario de análisis de riesgos.

De 1991 al 2010 el Programa de Manejo Integral de Cuencas (PROMIC) implementó medidas estructurales y no estructurales de reducción de riesgos de desastres en diferentes cuencas de la vertiente sur de la cordillera del Tunari, entre ellas las cuencas Taquiña y K'horá en el Municipio de Tiquipaya. No obstante, a la conclusión del PROMIC, el mantenimiento, monitoreo y/o implementación de medidas fue mínimo o ausente, lo cual, condujo a desastres de deslizamientos, mazamoras e inundaciones.

El 6 de febrero de 2018, el Municipio de Tiquipaya de la cordillera del Tunari en la ciudad de Cochabamba sufrió el desborde del río Taquiña, causando desastres en los distritos 5 y 6 del municipio. El evento ocurrió cerca de las 17:00 pm, debido a las fuertes lluvias en la región, provocando la acumulación de mazamorra que arrasó con viviendas que se encontraban en el lugar, dejando un saldo de 5 fallecidos y más de 50 familias sin vivienda y más de 500 viviendas afectadas. El régimen pluviométrico en el Departamento de Cochabamba indica que la época lluviosa es de octubre a marzo con los meses más lluviosos en enero y febrero, la precipitación promedio anual es de 464 mm y temperatura media anual de 17,13 ° C (Fig 1).

El deslave de la Cuenca Taquiña podía haber sido impedido con un manejo adecuado la cuenca, donde, se considere la Gestión del riesgo con medidas estructurales y no estructurales preventivas, correctivas y prospectivas para reducir el riesgo de desastres, disminuir las vulnerabilidades e incrementar la resiliencia de la cuenca. Asimismo, deben resolverse los conflictos entre los sindicatos agrarios Taquiña y Linkupata que se disputan el agua del río y se enfrentan cuando se realiza alguna actividad en la cordillera. Con este problema las comunidades no permiten la reforestación en el lugar, lo cual, pone en alta probabilidad que se repita el desastre en esta y en otras cuencas del Tunari.

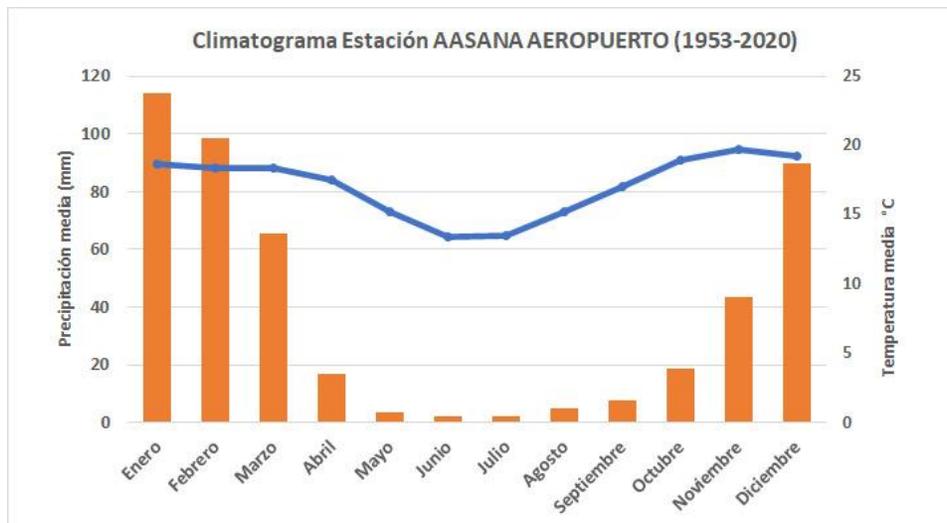


Figura 1 Climograma de Cochabamba.

En la Cordillera del Tunari existen 39 cuencas con muchos afluentes en cada una de ellas, la Cuenca Taquiña, tiene entre 15 a 20 afluentes, y es la que sufrió el desastre de desprendimiento por los pasados eventos de precipitaciones intensas. El riesgo de deslizamiento y erosión de la zona depende en gran nivel de la pendiente y la geología, pero también del cambio del uso de suelo ejercido por la población. Si bien en febrero de 2018 se dio la tragedia en la Cuenca Taquiña, no olvidemos que en la Cordillera del Tunari existen otras 38 cuencas que de alguna manera también poner en riesgo a numerosas Organizaciones Territoriales de Base asentadas en la parte media y baja de las cuencas. Por lo que, urge realizar estudios de evaluación participativa (cualitativa y cuantitativa) de riesgos, mapeo de riesgos empleando sistemas de información geográfico, análisis de tendencias y escenarios climáticos, análisis de efectos e impactos económicos y sociales, y simulaciones de inundaciones.

3 AREA DE ESTUDIO

Para el estudio se priorizaron dos micro cuencas (K'horá en el Municipio de Tiquipaya y Kaquerama en el Municipio de Sacaba) y la zona de Alto Cochabamba en el Municipio de Cochabamba en Bolivia (Mapa 1).



Mapa 1 Ubicación del área de estudio: cuencas Kh'ora y Kaquerama, y zona de Alto Cochabamba

3.1 Geomorfología

Los rasgos geomorfológicos de los terrenos investigados y zonas adyacentes están definidos por la presencia de abanicos aluviales o conos de deyección que se presentan a pie de talud de la Cordillera del Tunari; su forma en planta presenta el aspecto de un abanico abierto de moderada inclinación que se origina por los torrentes en la época de crecidas cuando aumentan los volúmenes de agua y depositan sus materiales de arrastre al pie de los macizos montañosos. Los sitios de estudio (Cuencas K' hora en el Municipio de Tiquipaya y Cuenca Kaquerama en el Municipio de Sacaba) se localizan en la cabecera de los abanicos aluviales y están constituidos por sedimentos detríticos muy heterogéneos no consolidados totalmente que pertenecen a la edad del periodo cuaternario. Se comportan como depósitos permeables a semipermeables, por lo tanto, el drenaje se efectúa por escorrentía superficial en algunos casos y en otros por escorrentía más infiltración. El perfil estratigráfico del suelo no está bien definido por que presentan sedimentos masivos constituidos por materiales granulares que se observan tanto lateralmente como verticalmente en todas las zonas de estudio.

3.2 Características biofísicas

3.2.1 Cuenca Kaquerama

La Cuenca Kaquerama, se encuentra emplazada en el valle del Municipio de Sacaba del eje metropolitano de Cochabamba, entre los $17^{\circ}21'56''$ de Latitud Sud y los $66^{\circ}05'03''$ de Longitud Oeste, amplitud altitudinal máxima 4.040 m.s.n.m. y mínima 3.000 m.s.n.m. (Fig. 2a). La cuenca de aporte está delimitada hacia el norte por la divisoria de aguas con la vertiente oriental de la Cordillera del Tunari al sud por el punto de salida en la confluencia con el río Rocha al este y al oeste por la divisoria de aguas llegando a contar con 4,25 km² (Fig 2b). Las amenazas y vulnerabilidades varían según su ubicación de la cuenca alta, media o baja.

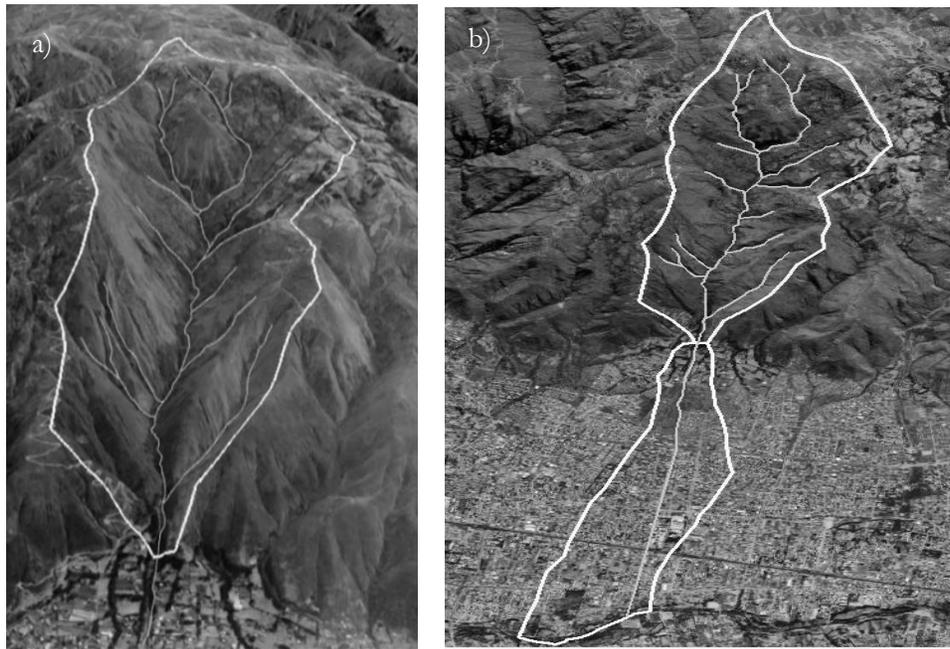


Figura 2 a). Cuenca Kaquerama - Imagen Satelital. Delimitación del área de aporte Cuenca K' hora. Fuente: elaboración propia. b). Cuenca Kaquerama - Imagen Satelital. Delimitación del área de influencia.

La Cuenca K' hora, se encuentra en el Valle del Municipio de Tiquipaya de la ciudad de Cochabamba, entre los $17^{\circ}19'36''$ de Latitud Sud y los $66^{\circ}12'36''$ de Longitud Oeste, amplitud altitudinal máxima 4.566 m.s.n.m. y mínima 2.860 m.s.n.m. (Fig. 3a). La cuenca de aporte está delimitada hacia el norte por la divisoria de aguas con la vertiente oriental de la Cordillera del Tunari, al sud por el punto de salida en la confluencia con el río Rocha al este y al oeste por la divisoria de aguas llegando a

contar con 27,24 km² (Fig 3b). Las amenazas y vulnerabilidades varían según su ubicación de la cuenca alta, media o baja.

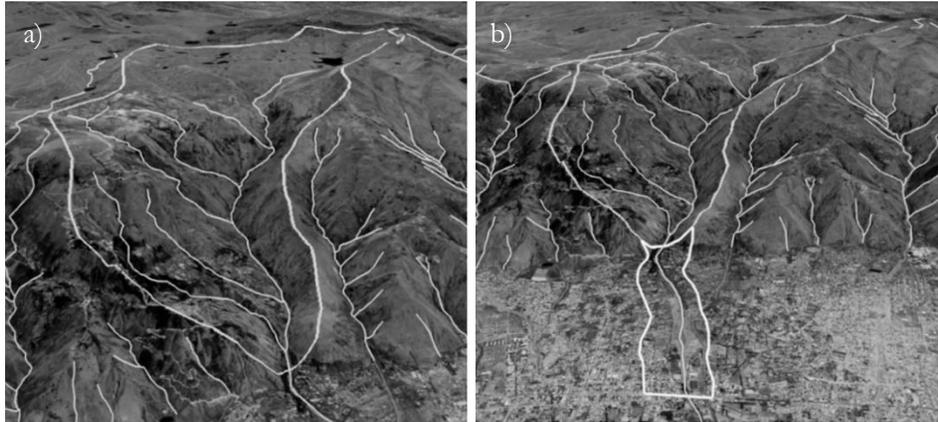


Figura 3 a). Cuenca K'houra – Imagen Satelital. Delimitación del área de aporte. b). Cuenca K'houra – Imagen Satelital. Delimitación del área de influencia.

En la zona de Alto Cochabamba la amplitud altitudinal máxima es de 2.841 m s.n.m. y mínima 2.592 m s.n.m. (Fig 4a), la parte alta presenta una topografía con pendiente elevadas más del 30% y con asentamientos urbanos en gran parte de la ladera (Fig 4b). Las amenazas y vulnerabilidades varían según la pendiente, tipo de suelo y asentamientos urbanos.

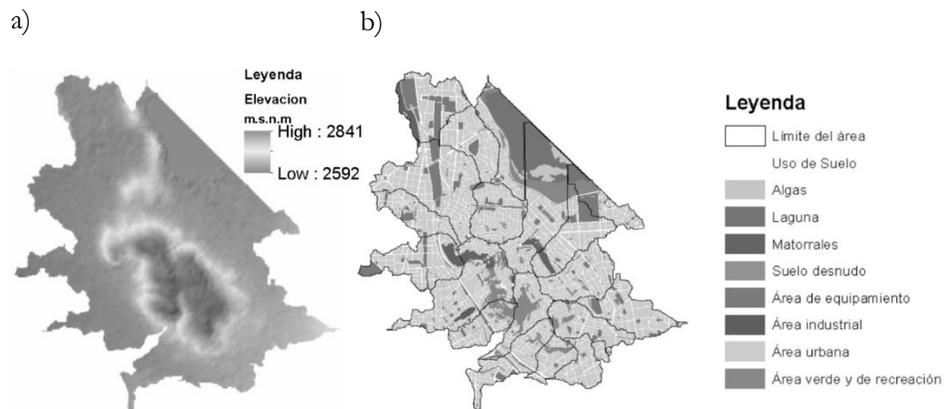


Figura 4 a). Variación altitudinal de la zona de Alto Cochabamba. b). Asentamientos urbanos en la zona de Alto Cochabamba.

4 LA UNIVERSIDAD CATÓLICA FRENTE A LOS DESASTRES NATURALES

La Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (UCB) en el marco de sus mandatos de apoyo en la investigación para beneficio de la sociedad, entre otros, hace estudios de diagnóstico y evaluación de riesgos, planes de contingencia, sistemas de alerta temprana, análisis de escenarios climáticos y de simulaciones y establece bases de datos en coordinación con autoridades y técnicos municipales. En este caso en coordinación autoridades municipales y sindicales, técnicos municipales y comunarios de los Municipios de Tiquipaya, Sacaba y Cochabamba, se realizó el estudio de evaluación de riesgos de deslizamientos, mazamorra (movimientos en masa) e inundaciones con el objeto que la información sea un insumo para estrategias, Plan Territorial de Desarrollo Integral Municipal PTDI, programas y/o proyectos de gestión integral del riesgo de desastres, manejo integral de cuencas, planes de ordenamiento territorial, planes de emergencia y contingencia, y planes de reducción de riesgos de desastres.

5 METODOLOGÍA

Para fines del presente estudio de evaluación de riesgos de desastres hídricos, se aplicaron tres metodologías de análisis:

Evaluación participativa (cualitativa y cuantitativa) de riesgos.- Esta metodología permite la participación activa *in situ* de actores locales (técnicos municipales, autoridades municipales y sindicales, y comunarios) a través de tres talleres en los Municipios de Tiquipaya, Sacaba y Cochabamba con la participación de 80 actores sociales. La técnica de evaluación participativa es mediante el diálogo abierto y percepciones de riesgos de los actores locales. El análisis de riesgos incluye:

El análisis de las amenazas en sus componentes intensidad, recurrencia y magnitud según la integral:

$$\int ap(A)da = I + R + M \quad \text{Ecuación 1}$$

A mayor intensidad de la amenaza, la probabilidad de excedencia y ocurrencia es menor y viceversa a menor intensidad de la amenaza, la probabilidad de ocurrencia es mayor. El resultado de la amenaza es el promedio de la suma de la intensidad, recurrencia y magnitud en una escala de 1 a 3, donde, 1 es bajo, 2 es medio y 3 es alto.

El análisis de las vulnerabilidades locales en sus componentes exposición, fragilidad y resiliencia (este último en términos de capacidad de respuesta social ante las emergencias y/o desastres), según la integral:

$$\int dp(V)da = E + F + R \quad \text{Ecuación 2}$$

A mayor intensidad de la amenaza, el daño de los elementos vulnerables es mayor y a menor intensidad de la amenaza el daño de los elementos vulnerables es menor. El resultado de la vulnerabilidad es el promedio de la suma de la exposición, fragilidad y resiliencia en una escala de 1 a 3, donde, 1 es bajo, 2 es medio y 3 es alto. Con la aclaración que en el caso de la resiliencia se hace la inversa al valor asignado debido a que es un factor positivo en relación a los otros factores de exposición y fragilidad.

El análisis de riesgos es resultado del análisis de las amenazas por el análisis de las vulnerabilidades ($R = A \times V$). El riesgo es la función integral de la probabilidad de la intensidad de la amenaza sobre el daño potencial de los elementos vulnerables. La escala de riesgo es de 1 a 9, donde, 1 a 3 es riesgo bajo; 3,1 a 5 riesgo medio; 5,1 a 7 riesgo alto y 7,1 a 9 riesgo muy alto.

$$\int_{a,d} p(R)da = \int_a p(A)da * \int_d p(V)da \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde: A= Amenaza; V= Vulnerabilidad; R= Riesgo; *= Función de convolución; p = Probabilidad de ocurrencia; a= Intensidad de la amenaza; d= Daño potencial

Adicionalmente se analizan:

- Efectos de las amenazas en los medios de vida
- Causas y efectos de los desastres sobre los elementos vulnerables
- Medidas estructurales y no estructurales de reducción de riesgos de desastres como medidas preventivas y/o de mitigación
- Mapas de percepción local de amenazas y vulnerabilidades
- Tendencias climáticas e historial de desastres en base al historial climático en la zona

Mapeo de vulnerabilidad al deslizamiento con sistemas de información geográfico.- Para el mapeo de áreas vulnerables al deslizamiento se utilizó la metodología de Sergio Mora y Wilhelm Guenther Vahrson (Chaverri, 2016). Su aplicación se basa en tres factores pasivos (pendiente, litología y humedad del suelo) y dos activos (intensidad sísmica e intensidad de precipitación), los cuales se obtienen de la observación y medición de factores morfodinámicos y su distribución espacial. Para cada factor se define un índice de influencia para un determinado sitio que al combinarse con el peso específico ponderado se obtiene un nivel relativo de amenaza (H), por medio de la multiplicación y suma matricial de los índices según la ecuación:

$$H = (S_r \times S_l \times S_h) \times (T_s + T_p) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde: H = Grado de vulnerabilidad al deslizamiento; Sr = Factor pendiente; Sl = Factor litológico; Sh = Factor de la humedad del suelo; Ts = Sismicidad; Tp = Intensidad de precipitaciones.

Modelación hidrológica e hidrodinámica para inundaciones.- Para conocer la magnitud de la inundación como consecuencia de los deslizamientos y movimientos en masa, se hicieron correr los modelos hidrológicos e hidrodinámicos bidimensionales para inundaciones HEC-RAS (Auza *et al.* 2018, Hec H, 2000, *Hydrologic engineering Center-River Analysis System, 2000*). La caracterización topográfica del área de estudio y la delimitación de cuencas se realizó utilizando el Modelo de Elevación digital MDE levantado por Dron Panthom 4 de 0,10 metros de resolución, cámara óptica 4K y altura de vuelo de 300 m. Se analizó las variables de régimen pluvial de estaciones meteorológicas locales de la zona, estudio de crecidas, eventos extremos de precipitación, ajuste de distribución probabilidad y precipitaciones para diferentes periodos de retorno, hietogramas de precipitación-tormentas de diseño, modelación precipitación escurrimiento por el método del número de curva de la *Soil Conservation Services* SCS, tiempo de llegada del caudal máximo según método de Témez.

Asumiendo que el agua es un fluido casi incompresible, la ecuación diferencial de conservación de masa en base a flujo variado es la siguiente:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde: t es el tiempo, u y v son los componentes de velocidad en la dirección de los ejes x e y respectivamente y q es el término de la tasa almacenamiento.

La aplicación de la aproximación de Flujo por volúmenes finitos tendrá la forma:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} \approx \frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 6}$$

6 RESULTADOS

6.1 Evaluación cualitativa y cuantitativa de riesgo participativo

6.1.1 Análisis de amenazas y vulnerabilidades.-

En la parte media y baja de las Cuencas K'horá en Tiquipaya y Kaquerama en Sacaba (Fig 3a y 3b) del abanico de 39 cuencas del Tunari, el **análisis de amenazas** según sus componentes intensidad, magnitud y recurrencia, muestra como las principales amenazas los incendios forestales, deslizamientos, mazamorras e inundaciones, con grado alto y medio (Tabla 1). En tanto que el **análisis de vulnerabilidades** en sus componentes exposición, fragilidad y resiliencia presenta a

las mayores vulnerabilidades a los impactos de mazamorra, incendios forestales, inundaciones y deslizamientos, con grado alto y medio (Tabla 2).

Tabla 1. Grado de amenazas.

AMENAZA	Componentes de Amenaza			
	Intensidad	Magnitud	Frecuencia	Grado de Amenaza
Mazamorra	2	3	2	2,3
Inundaciones	3	2	2	2,3
Deslizamientos	2	3	2	2,3
Incendios forestales	3	3	2	2,7

Escala 1-3, donde 1=bajo (verde); 2=medio (amarillo); 3=alto (rojo)

Tabla 2. Grado de vulnerabilidades.

AMENAZA	VULNERABILIDAD	Componentes de Vulnerabilidad			
		Exposición	Fragilidad	Resiliencia	Grado de Vulnerabilidad
Mazamorra	viviendas, construcciones, personas, caminos, cultivos, animales, servicios básicos	3	3	1=3 (inversa)	3,0
Inundaciones	viviendas, construcciones, personas, caminos, cultivos, animales, servicios básicos	3	2	1=3(inversa)	2,7
Deslizamientos	Vías de acceso, viviendas, cultivos	2	2	1=3 (inversa)	2,3
Incendios forestales	bosque, flora, fauna, viviendas, personas, animales, área protegida	3	3	2=2 (inversa)	2,7

Escala 1-3, donde 1=bajo (verde); 2=medio (amarillo); 3=alto (rojo)

6.1.2 Análisis de riesgo.-

El análisis de riesgo es la relación del análisis de la amenaza por el análisis de la vulnerabilidad ($R = A \times V$) en la parte media y baja de las cuencas de estudio presenta

un grado alto de riesgo los incendios forestales y mazamorra; con riesgo medio están las inundaciones y deslizamientos (Tabla 3).

Tabla 3. Grado de riesgo de desastres.

RIESGO	Grado de Amenaza	Grado de Vulnerabilidad	Grado de Riesgo
Mazamorra	2,3	3,0	6,9
Inundaciones	2,3	2,7	6,2
Deslizamientos	2,3	2,3	5,3
Incendios forestales	2,7	2,7	7,2

Escala 1-9, donde 1 a 3 = bajo (verde); 3,1 a 5 = medio (amarillo); 5,1 a 7 = alto (naranja); 7,1 a 9 = muy alto (rojo)

6.1.3 Complementaciones al análisis de vulnerabilidades.-

En la parte media y baja de la cuenca, el efecto de las inundaciones y mazamorra sobre los medios de vida, inciden negativamente principalmente sobre el factor humano, social y económico y en menor grado sobre los factores físico y ambiental (Fig 5a). En tanto que, los efectos negativos de las inundaciones y mazamorra sobre los factores de vulnerabilidad inciden fundamentalmente en los terrenos de cultivo, vías de comunicación, viviendas unifamiliares y multifamiliares, y sistema de agua potable (Fig 5b).

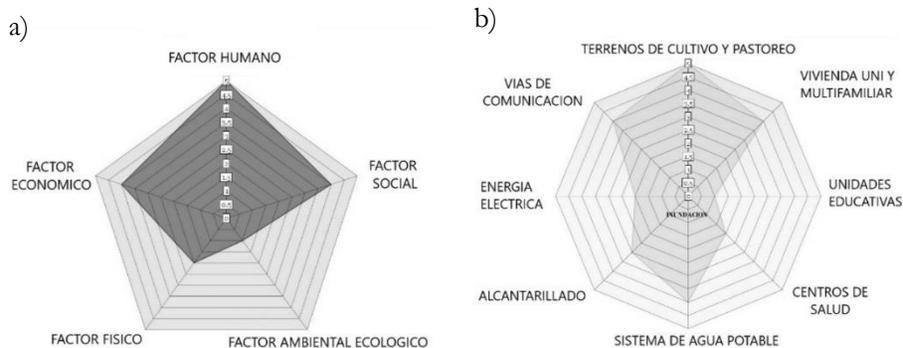


Figura 5 a). Efecto de las inundaciones sobre los medios de vida, en la parte media y baja de las Cuencas K’hora y Kaquerama. Fuente: elaboración propia. b). Efecto de las inundaciones sobre los factores de vulnerabilidad, en la parte media y baja de las Cuencas K’hora y Kaquerama.

En la parte alta de la cuenca, los efectos negativos de los deslizamientos inciden negativamente de forma intermedia sobre el factor ambiental, los otros componentes de los medios de vida son poco afectados (Fig 6a). El impacto de los deslizamientos

sobre los factores de vulnerabilidad en la parte alta y media de la cuenca incide fundamentalmente sobre las vías de acceso, terrenos de cultivo y pastoreo, sistema de agua potable y alcantarillado (Fig 6b).

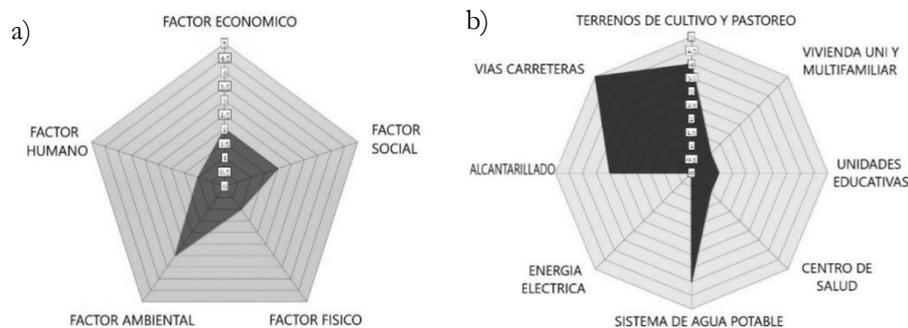


Figura 6 a). Efecto de los deslizamientos sobre los medios de vida en la parte alta de las Cuencas K’hora y Kaquerama. b) Efecto de los deslizamientos sobre los factores de vulnerabilidad en la parte alta de las Cuencas K’hora y Kaquerama.

6.1.4 Análisis de causas y efectos.-

De acuerdo al análisis participativo con los actores locales de la parte alta, media y baja de las Cuencas K’hora en Tiquipaya y Kaquerama en Sacaba, perciben como las principales causas de las amenazas de los deslizamientos y mazamoras: las altas precipitaciones, pendientes pronunciadas (los actores locales no perciben como causa la geología y litología), falta de implementación y mantenimiento de obras de reducción de riesgos de desastres, urbanización en zonas de alto riesgo en las torrenteras e incumplimiento de normativas ambientales. Las causas de los incendios forestales son mayormente de tipo antrópico por chaqueo e intencionales. Los efectos de las emergencias y/o desastres de este tipo de amenazas enfatizan en la pérdida de vidas, destrucción de viviendas, contaminación del ambiente, retracción del desarrollo, inseguridad alimentaria y mayor pobreza (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de causas y efectos de las amenazas en las Cuencas K'horá y Kaquerama.

Causas	AMENAZA	Efectos Directos	Efectos Indirectos
-Saturación del terreno por altas precipitaciones -Granizada -Riego por inundación -Incendios forestales -Falta de forestación -Tala de árboles -Falta de cobertura vegetal -Pastoreo -Falta de implementación de obras estructurales de contención de deslizamientos -Falta de incentivos para conservar el bosque -Falta de mantenimiento de vías -Apertura de caminos sin cunetas -Asentamientos sobre la cota	Deslizamientos	-Afectación a flora y fauna -Afectación a la agricultura -Afectación al turismo -Afectación a vías de acceso -Daño a construcciones precarias	-Mayor pobreza -Inseguridad alimentaria -Desabastecimiento de alimentos -Incomunicación -Micro y macroeconomía municipal y departamental -Retracción del desarrollo -Contaminación del agua -Contaminación ambiental -Más enfermedades -Migración
-Altas precipitaciones -Cambio de cursos de agua -Falta de implementación y/o mantenimiento de obras estructurales de reducción de riesgos de desastres: Diques de contención Muros de contención Colmatadores Piscinas de disipación -Falta sistemas de alerta temprana -Falta de planes de contingencia y emergencia	Mazamorra	-Destrucción de infraestructura y viviendas -Pérdidas humanas y de animales domésticos -Daño a servicios básicos -Afectación a la agricultura -Afectación al turismo -Daño a vías de acceso -Daño a servicios básicos	

<ul style="list-style-type: none"> -Falta de apropiación y/o utilización de Planes Municipales de Ordenamiento Territorial PMOTs -Falta de diagnósticos y evaluaciones de riesgos -Falta de mapas de riesgos -Incumplimiento de normativas ambientales, de riesgos y políticas de conservación -Sociedad no sensibilizada en medidas de prevención y conservación del ecosistema -Falta de estrategias y financiamiento para manejo integral de cuencas -Crecimiento poblacional -Ausencia de planificación urbana en los Planes de Desarrollo Territorial Integral Municipal PTDIs y Planes Municipales de Ordenamiento Territorial PMOTs -Mal manejo de residuos sólidos en las micro cuencas 	<p>Inundaciones</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Destrucción de viviendas -Daño a servicios básicos -Afectación a la agricultura -Afectación a vías de acceso
<ul style="list-style-type: none"> -Incentivo al chaqueo en normativas -Chaqueo sin control -Habilitación de terrenos de cultivo -Manejo inadecuado de la forestación -Provocación mal intencionada -Los actores locales (principalmente comunarios) no consideran el cambio climático como causa 	<p>Incendios forestales</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Destrucción de bosques, matorrales y pastizales -Afectación a flora y fauna silvestre -Secado de vertientes

6.1.5 Análisis y selección de medidas.-

Consiste en la identificación de medidas de Reducción de Riesgos de Desastres RDD, las cuales, pueden ser estructurales o no estructurales para las amenazas (mazamoras, deslizamientos, inundaciones e incendios forestales) identificadas en el estudio (Tabla 5).

Tabla 5. Medidas de reducción de riesgos de desastres.

AMENAZA	MEDIDAS	
	Estructurales	No estructurales
Deslizamientos y Mazamorras	-Terrazas	-Sistema de Alerta Temprana
	-Mallas protectoras de deslizamientos	-Plan de contingencia
	-Diques transversales	-Capacitación en primera respuesta
	-Discipadores y colmatadores	-Capacitación en prevención
	-Muros y gaviones de contención	-Simulacros
	-Reforestación	-Asignación presupuestaria (antes, durante y después)
	-Zanjas de infiltración	-Cumplimiento de normativas ambientales de lecho de ríos y construcción
	-Acondicionamiento hidráulico	
Incendios Forestales	-Mantenimiento de vía de acceso	-Sistema de Alerta Temprana
	-Franjas corta fuegos	-Plan de contingencias
		-Capacitación en prevención y manejo de incendios forestales
		-Capacitación en primeros auxilios

De acuerdo al Manual (CEDRIG, 2012), las medidas de RRD son seleccionadas y priorizadas de acuerdo a cuatro criterios de evaluación para la toma de decisiones en su implementación (Tabla 6). En base a dichos criterios, las medidas con mayor grado para su implementación son las medidas no estructurales por sus beneficios, bajo costo, aceptación y perduración en el tiempo. Las medidas estructurales tienen un grado medio principalmente por el elevado costo, no obstante igualmente son indispensable en el marco del manejo integral de la gestión del riesgo.

Tabla 6. Evaluación de medidas de reducción de riesgos de desastres.

MEDIDA	Eficacia	Costo	Factibilidad	Sostenibilidad	Grado
Sistemas de alerta temprana	3	3	3	3	3,0
Planes de contingencia	3	3	3	3	3,0
Capacitación	3	3	3	3	3,0
Reforestación	3	3	2	3	2,7
Mantenimiento de vías de acceso	3	2	3	3	2,7
Terrazas	3	2	3	3	2,7
Zanjas de infiltración	3	2	3	3	2,7

Acondicionamiento hidráulico	3	2	3	3	2,7
Diques de contención	3	1	2	3	2,2
Muros y gaviones de contención	3	1	2	3	2,2
Disipadores y colmatadores	3	1	2	3	2,2
Franjas corta fuegos	2	2	2	2	2,0
Mallas protectoras de deslizamientos	2	2	2	2	2,0

Escala 1-3; 1=bajo (verde); 2=medio (amarillo); 3=alto (rojo)

Nota: Eficacia.- Si mejora la resiliencia y reduce la vulnerabilidad, beneficios

Costo.- Si es caro o barato, incluye inversión, operación y mantenimiento

Factibilidad.- Si se cuenta con recursos humanos, financieros y aceptación del público

Sostenibilidad.- No solo social, económica y ecológica sino en el apoyo financiero del sector público y la cooperación internacional

6.1.6 Análisis de la variabilidad climática

El análisis de tendencias de las precipitaciones en tres estaciones climatológicas de las zonas de estudio muestra que hay una tendencia a disminuir las precipitaciones promedio anuales (Fig. 7), sin embargo la variabilidad climática respecto de la intensidad y recurrencia es mayor en los meses más lluviosos (diciembre a febrero). Según los actores locales el periodo de lluvias se acorto y la intensidad de lluvias en los meses más lluviosos es mayor, razón lo que el riesgo de deslizamientos, mazamoras e inundaciones se hace más recurrente en los últimos años.

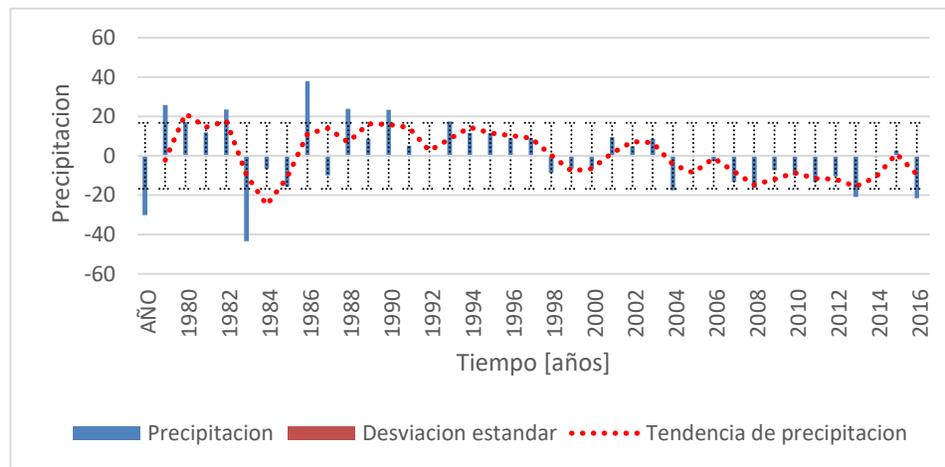


Figura 7 Historial climático de tendencias de precipitaciones en la Estación La Violeta.

6.1.7 Mapas de percepción local de riesgos.-

Se basa en un proceso participativo en el cual la población identifica en una imagen del satélite GeoEye-1 ubicación espacial de las amenazas y las vulnerabilidades, el cual ofrece una resolución 1,64 m en modo multispectral. Para el estudio se utilizó una composición con las bandas 3, 2, 1 que aproximan a los colores reales de la cuenca, la ubicación espacial se encuentra en el sistema de Proyección Universal Transversal de Mercator WGS 84.

Para lograr la elaboración de estos mapas se hace uso del material georeferenciado, sin embargo es necesario destacar que en los talleres el análisis conjunto es realizado para un entorno multinivel, donde en un primer nivel se trabaja con los técnicos municipales y en un segundo nivel con representantes comunales, comunarios y comités locales de emergencia (Fig 8).



Figura 8 Comunarios y técnicos construyendo mapas de percepción local de riesgos de deslizamientos.

Con ese insumo, los mapas de percepción local se traducen en mapas con imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (Fig. 9a, 9b), pasando por un proceso de validación por los actores locales.

6.2 Mapeo de susceptibilidad al deslizamiento con sistemas de información geográfica.

6.2.1 Cuenca Kaquerama en Sacaba

Realizando un corte del perfil longitudinal del río, se puede observar un desnivel de 1.000 m desde la parte alta hasta la parte baja, lo que indica una pendiente fuerte de más de 55 % (Fig. 10).

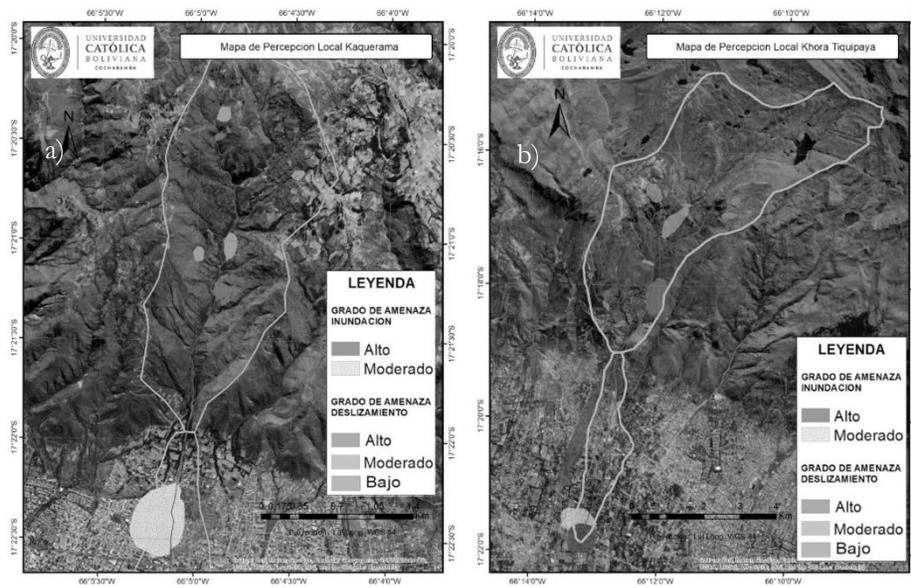


Figura 9 a). Mapa de percepción local de deslizamientos e inundaciones en la Cuenca Kaquerama en Sacaba. b). Mapa de percepción local de deslizamientos e inundaciones en la Cuenca K'hora en Tiquipaya.



Figura 10 Perfil longitudinal del río de la Cuenca Kaquerama en Sacaba.

En la Cuenca Kaquerama se observan precipitaciones en el orden de los 1.500 mm en la parte baja y 2.800 mm en la parte alta, esto indica que hay precipitaciones elevadas en la parte alta a nivel anual. Las temperaturas mínimas anuales van desde los 5°C hasta temperaturas máximas de 10°C, se puede concluir que es una zona con

probabilidad de riesgos de helada. Por último indicar que la Humedad relativa se encuentra de 63% a 75% promedio a nivel anual (Fig. 11).

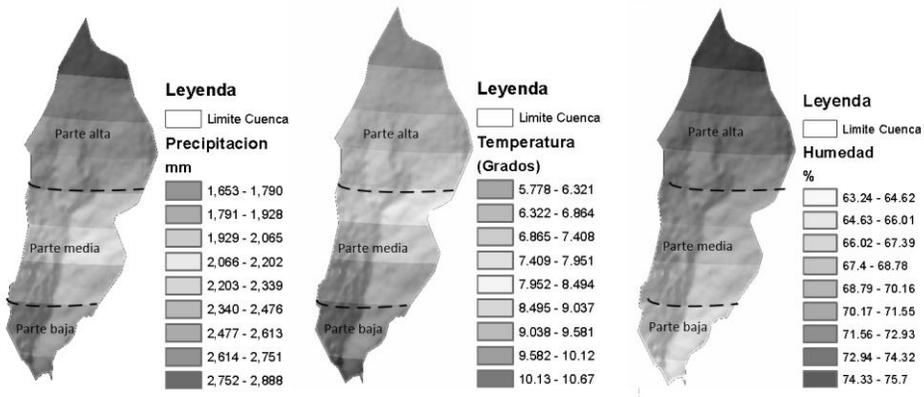


Figura 11 Descripción climática en la Cuenca Kaquerama en Sacaba.

En función del análisis y estandarización de los parámetros de pendiente, precipitación, humedad del suelo, litología y sismos, los resultados producto de la superposición indican probabilidad moderada y alta a deslizamientos en la Cuenca Kaquerama (color naranja y rojo) (Fig. 12). Este análisis muestra que en las zonas altas es donde existe un riesgo latente de deslizamiento esto debido principalmente al factor de pendiente.

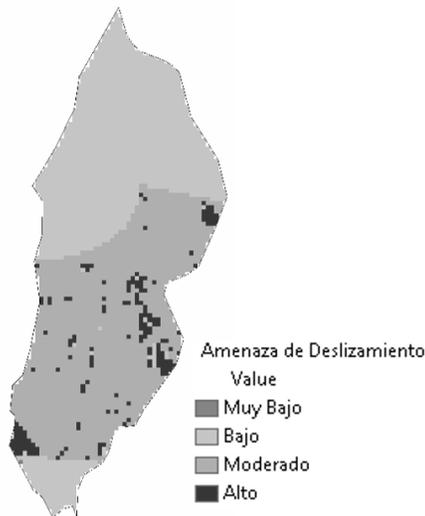


Figura 12 Zonas vulnerables a deslizamientos en la Cuenca Kaquerama en Sacaba.

6.2.2 Cuenca K'horá en Tiquipaya

Realizando un corte del perfil longitudinal del río, se puede observar un desnivel de 900 metros desde la parte media hasta la parte baja, lo que indica una pendiente fuerte de más de 45% (Fig 13).

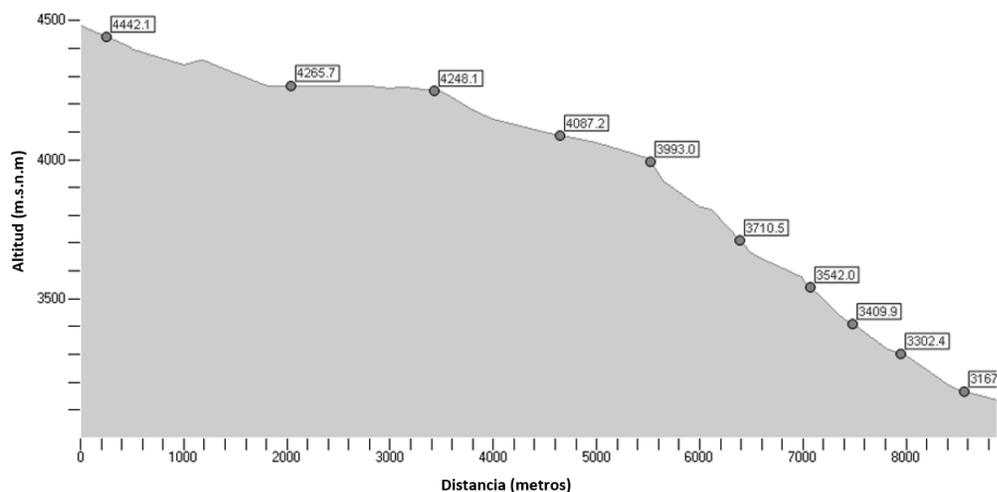


Figura 13 Perfil longitudinal del río de la Cuenca K'horá en Tiquipaya.

En la Cuenca K'horá se observan precipitaciones en el orden de los 1.300 mm en la parte baja y 2.900 mm en la parte alta, indica que hay precipitaciones elevadas en la parte alta. Las temperaturas mínimas van desde los 3°C hasta temperaturas máximas de 11°C. La Humedad relativa se encuentra entre 58% a 81% promedio a nivel anual (Fig 14).

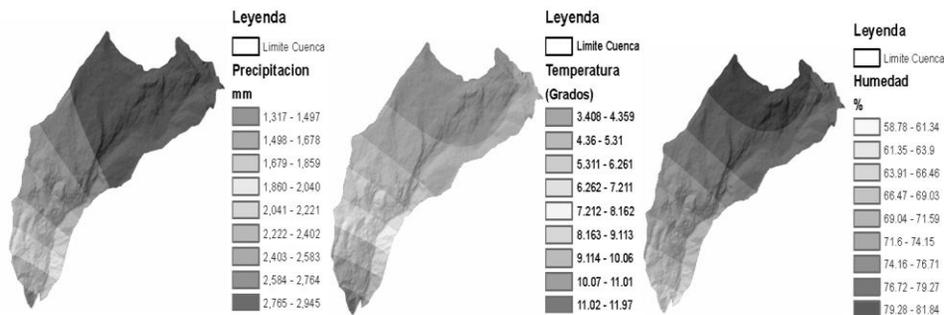


Figura 14 Descripción climática en la Cuenca K'horá en Tiquipaya.

En función del análisis y estandarización de los parámetros de pendiente, precipitación, humedad del suelo, litología y sismos, los resultados producto de la

superposición indican probabilidad de riesgo a deslizamientos bajo a moderado dadas las características de geomorfología de pendientes pronunciadas en la Cuenca K' hora (Fig. 15).

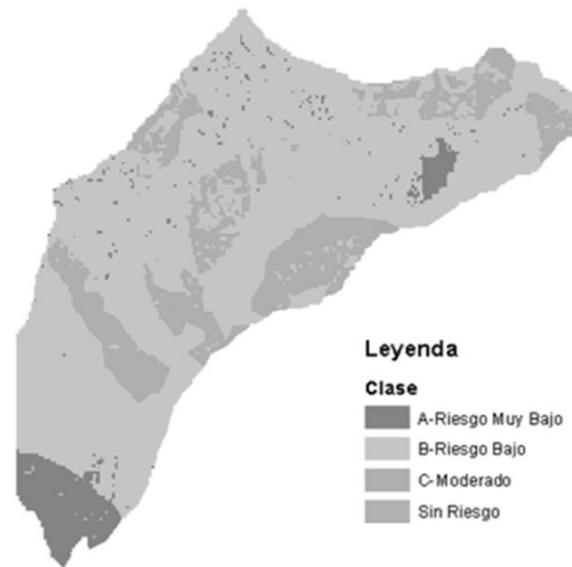


Figura 15 Zonas vulnerables a deslizamientos en la Cuenca K' hora en Tiquipaya.

6.2.3 Alto Cochabamba

Realizando un corte transversal al modelo de elevación, se tiene el perfil longitudinal donde la parte baja va desde los 2.609 m s.n.m. hasta los 2.646 m s.n.m. y la parte alta del cerro de Alto Cochabamba comprende desde los 2.704 m s.n.m. hasta los 2.805 m s.n.m. (Fig. 16).

En la zona de Alto Cochabamba, en promedio se tiene una precipitación de 1.150 mm. En la parte alta de la cuenca las precipitaciones varían de 1.210 mm a 1.230 mm y en la parte media y baja de la cuenca de 900 mm a 1.000 mm a nivel anual. La temperatura promedio anual en la parte media y alta es de 14,8°C y 17, 6°C en la parte baja. La humedad relativa promedio anual está entre 44% y 55% (Fig 17).

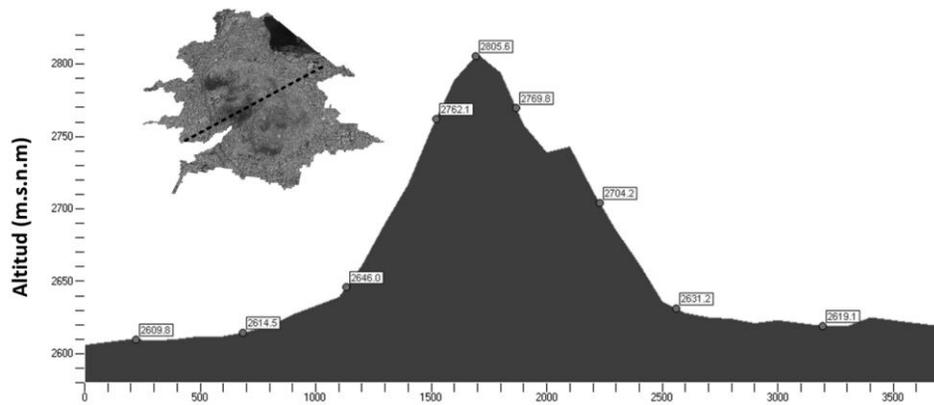


Figura 16 Perfil longitudinal de Alto Cochabamba.

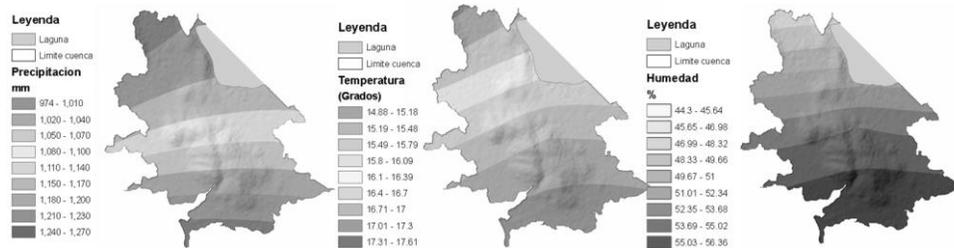


Figura 17 Descripción climatológica en Alto Cochabamba.

En función del análisis y estandarización de la pendiente, precipitación, humedad del suelo, litología y sismos, la zona de Alto Cochabamba presenta áreas con probabilidad de vulnerabilidad media, moderada y baja (Fig. 18). Gran parte de la mancha urbana se encuentra asentada en la zona de probabilidad media de vulnerabilidad, con recurrentes deslizamientos de edificaciones como viene ocurriendo año tras año en la zona (Fig. 19).

En la zona de Alto Cochabamba, la interacción de los factores de litología, humedad de suelo y el aumento del peso por las construcciones superiores a 2 pisos (Fig. 20), son los que originan los deslizamientos, sin embargo, no se debe restar la importancia de interacción con la pendiente, precipitación, suelo arcilloso con pizarra y sismo.

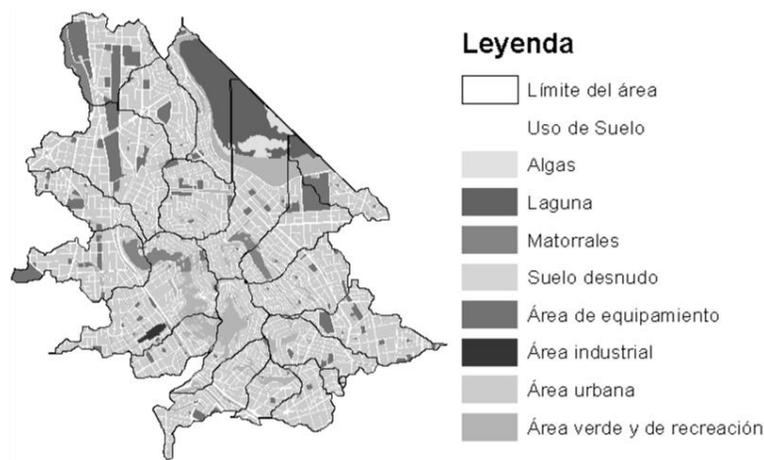


Figura 18 Zonas vulnerables a deslizamientos en Alto Cochabamba.

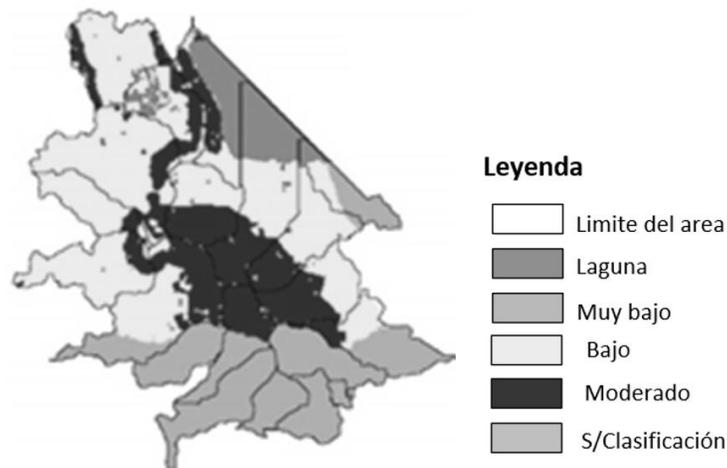


Figura 19 Mancha urbana y zonas de mediana probabilidad de deslizamientos en Alto Cochabamba.

6.3 Simulación de inundaciones

6.3.1 Ajuste de distribución de probabilidad y precipitaciones para diferentes periodos de retorno.

Con la finalidad de determinar precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno, se ajustan diferentes curvas de distribución de probabilidad a las series de precipitaciones extremas (Fig 21).



Figura 20 Edificaciones con número de pisos y probabilidad de riesgo en Alto Cochabamba.

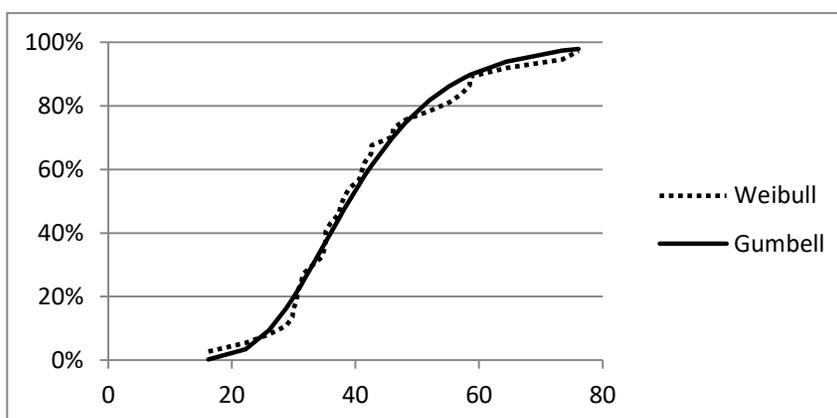


Figura 21 Ajuste Estadístico de datos a la Distribución de Gumbel (línea punteada dato observado vs línea continua dato ajustado a la función de probabilidad de Gumbel).

6.3.2 Hietogramas de precipitación – Tormentas de diseño.-

Desagregando la precipitación diaria, se aplican los factores de la estación AASANA Aeropuerto a los valores de precipitación máxima de 24 h determinados para Estación La Violeta, se pueden obtener los valores Precipitación - Duración –

Frecuencia (PDF) para diferentes periodos de retorno (Fig. 22) y dividiendo entre la duración se obtienen las curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF) (Fig 23).

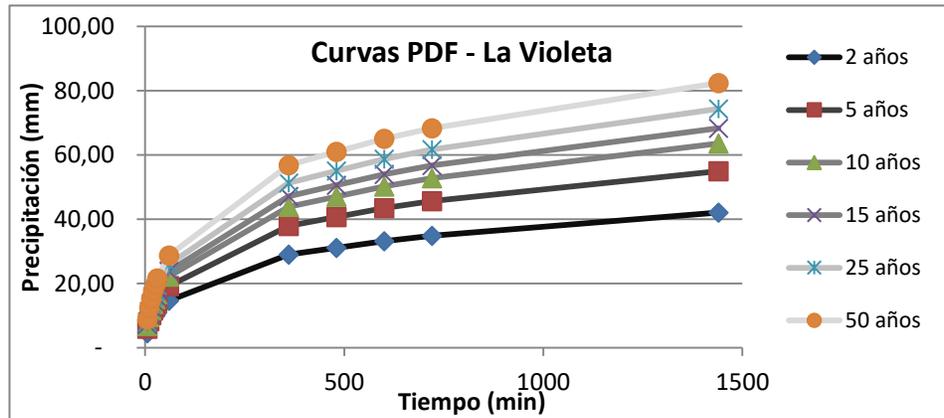


Figura 22 Curvas Precipitación – Duración – Frecuencia. Estación La Violeta.

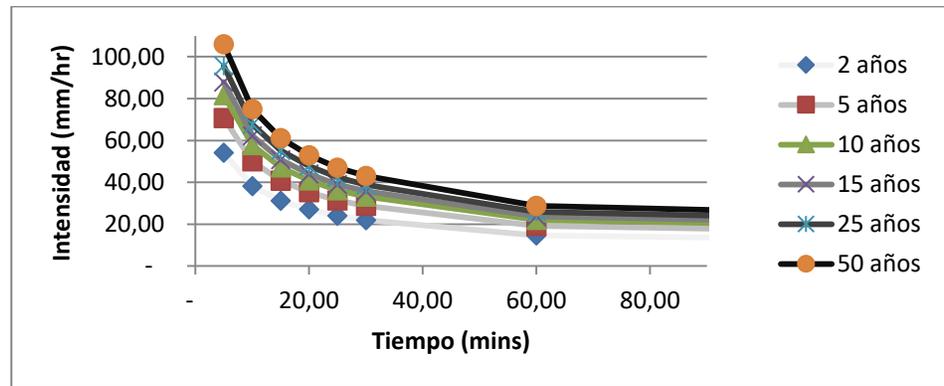


Figura 23 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia. Estación La Violeta.

6.3.3 Modelación precipitación escurrimiento por el método del número de curva de la Soil Conservation Services SCS.-

Tiempo de llegada del caudal máximo: El tiempo de concentración es de $T_c = 1,66$ h. La modelación hidrodinámica bidimensional se realizó con ayuda del Software HEC-RAS versión 5.0.7, para simular el efecto de un hidrograma de crecida en la zona de estudio. Las ecuaciones de conservación de masa y conservación de energía que se usan para la modelación bidimensional están basadas en la ecuación del Saint Venant 1781, donde la expresión representa la tasa de almacenamiento en cada celda en relación al tiempo como la diferencia de dos volúmenes finitos (Fig. 24).

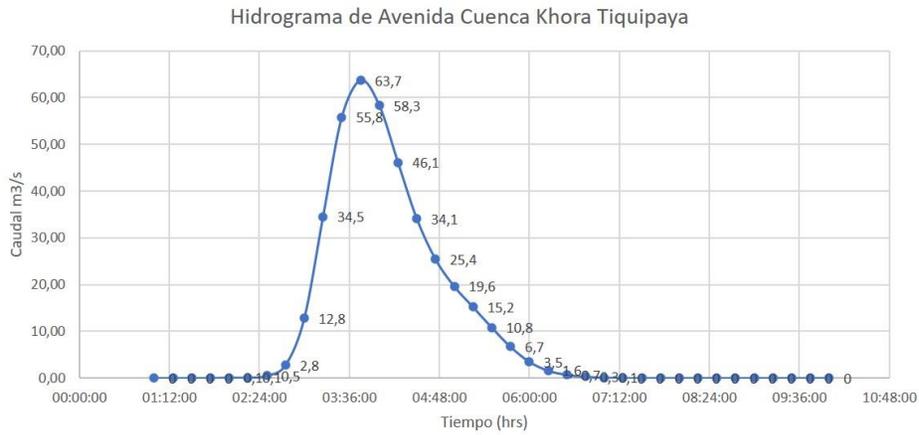


Figura 24 Hidrograma de avenida para la cuenca Kh'ora Tiquipaya.

La modelación hidrodinámica bidimensional muestra que caudales con períodos de retorno de 10 años ya causan desbordes e inundaciones, debiéndose tomar las previsiones en medidas estructurales como no estructurales para la reducción de riesgos de inundaciones y desbordes en las cuencas K' hora en Tiquipaya (Fig. 25).

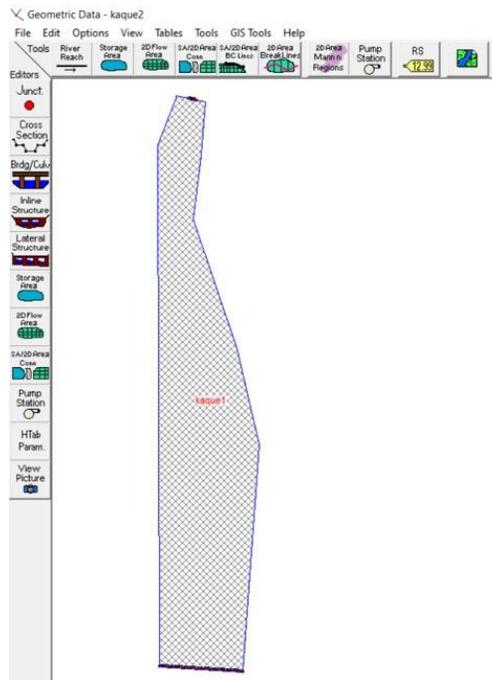


Figura 25 Generación de malla para modelación hidrodinámica bidimensional para la cuenca Kh'ora Tiquipaya.

7 DISCUSIÓN

En Bolivia, las áreas de montaña proveen condiciones favorables para la vida y las actividades económicas. Tradicionalmente el paisaje cultural se extiende sobre una gran variación de pisos ecológicos, lo que conlleva a modificaciones de los ecosistemas y hace vulnerable a las mazamorras. Los asentamientos urbanos como rurales están en riesgo y un gran número de personas son directamente afectadas. Como consecuencia, es urgente la implementación de diferentes tipos de medidas de mitigación requeridas para la reducción del riesgo de desastres.

Existen diversas hipótesis sobre los desastres ocurridos en la Cuenca Taquiña del abanico de cuencas en la cordillera del Tunari, entre otras están: (i) Debilitamiento de la quebrada por falta de mantenimiento con medidas estructurales, (ii) Corte de taludes en los caminos de montaña (iii) Deforestación y asentamientos urbanos en el Tunarí alteraron el cauce natural de los ríos, así como la quema de hectáreas de bosque por el chaqueo, (iv) Crecimiento urbano en pendientes abruptas y expansión horizontal de la mancha urbana sin el cumplimiento de la normativa ambiental, sobre todo no se respetan las construcciones a 30 metros a cada lado de su eje de máxima crecida del río, crecimiento demográfico en la zona, el crecimiento poblacional en 1992 era de 3 mil habitantes y en 2017 fue de 62 mil habitantes.

No obstante los motivos naturales por los que se produce las mazamorras (aluviones) van desde el desgaste natural de tierra hasta las acciones que dejan la ladera de las montañas sueltas, por lo que se desliza la tierra. Dicho de otra manera, al incrementar la tasa de deforestación, la disponibilidad de material suelto en la ladera aumenta y expone a las comunidades a un riesgo mayor de sufrir deslizamientos en temporada de lluvias. Es así que la deforestación y la actividad agrícola inapropiada contribuyen a aumentar la vulnerabilidad a las mazamorras o remociones en masa como indica Harden, 2006. Así mismo, corrobora a la advertencia del IPCC 2012a y 2012b de la ocurrencia de eventos extremos sin precedentes debido a la variabilidad y cambio climático.

A pesar que actualmente existe una mayor conciencia de la necesidad de manejar el riesgo asociado a las remociones en masa y en el pasado se implementaron obras de reducción de riesgos de desastres (disipadores, muros de contención, terrazas) en la Cuenca K'horá en Tiquipaya y mucho menos en la Cuenca Kaquerama en Sacaba, no se hicieron mantenimiento de las obras, por lo que, todavía es necesario mejorar el manejo de laderas para reducir el riesgo.

En las torrenteras zona de deyección de las cuencas hidrográficas de las cuencas de estudio y en las zonas bajas de Bolivia, la urbanización en sitios inadecuados, el manejo inadecuado de residuos sólidos, el desvío del curso de las aguas, la falta de obras de reducción de riesgos de desastres, la saturación del terreno por irrigación,

entre otros, generan alta vulnerabilidad a las mazamorra y inundaciones lo cual corrobora al estudio realizado por García *et al.* 2017.

En la zona de Alto Cochabamba la situación de deslizamientos es característico más bien del tipo de terreno que presenta suelos arcillosos y de pizarra lo cual hace que con saturación de humedad provoque que ocurran deslizamientos. Sin embargo a ello, el crecimiento urbano en muchos casos sin seguir las normas de construcción vertical y conscientes las personas que es una zona de alta probabilidad de riesgo de deslizamientos, las construcciones continuaron, siendo un claro ejemplo que las personas son las propias constructoras de sus vulnerabilidades. No obstante, más que las personas son las autoridades de turno que dan curso a las construcciones sin un plan de ordenamiento territorial y sin respetar las normas vigentes de servidumbres ecológicas. El porcentaje de contenido de humedad es bajo, pero, puede incrementarse por los flujos subterráneos, la infiltración por las fallas en los ductos de agua potable, alcantarillado; y por la duración de la precipitación en los meses más lluviosos (enero, febrero y marzo).

Para las condiciones de montaña en la cordillera del Tunari, los sismos no constituyen el principal disparador de los procesos de remoción en masa; más bien estos eventos están vinculados a condiciones climáticas como las altas precipitaciones.

8 CONCLUSIONES

- Los métodos activos (participativos) y pasivos (interpretación de análisis) de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas y torrenteras son complementarios e integrales de acuerdo al estudio.
- Las amenazas con grado de riesgo alto a medio en las Cuencas Kaquerama en Sacaba y K'horá en Tiquipaya, lo representan los incendios forestales, la mazamorra, las inundaciones y los deslizamientos respectivamente.
- Las causas de las amenazas de deslizamientos y mazamorra son complejas que incluyen precipitaciones intensas, pendientes pronunciadas, falta de implementación y mantenimiento de obras, falta de planes de ordenamiento territorial, incumplimiento de normativas ambientales, etc. Las causas de los incendios forestales son mayormente de tipo antrópico.
- Las medidas de reducción de riesgos de desastres con mayor grado para su implementación son las medidas no estructurales por sus beneficios, bajo costo, aceptación y perduración en el tiempo. Las medidas estructurales tienen un grado medio principalmente por el elevado costo.
- Los resultados identificaron 3 clases de vulnerabilidad en las micro cuencas K'horá en Tiquipaya y Kaquerama en Sacaba, los cuales están estrechamente

relacionados con la pendiente. El 0,93 % de la superficie del área muestra una vulnerabilidad baja (zonas planas), el 48,29 % moderado (pendientes con inclinación suave), el 22,31 % medio (pendiente escarpado); y el 28,47 % no presenta ninguna clasificación a causa del vacío de información litológica y sísmica.

- La vulnerabilidad a deslizamientos en la zona de Alto Cochabamba se debe a la presencia de suelos arcillosos (provenientes de la meteorización y del relleno antrópico) y de la pizarra; los cuales pierden su resistencia cuando sufren procesos de humedecimiento y secado al entrar en contacto con el agua.
- En la zona de Alto Cochabamba, la interacción de los factores de litología, humedad de suelo y el aumento del peso por las construcciones urbanas superiores a 2 pisos, son los que originan los deslizamientos, sumados a la interacción con la pendiente, precipitación y sismo.
- Las obras de infraestructura civil deben respetar las áreas de protección de ríos y quebradas, especialmente en las zonas de alta pendiente.

9 RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar estudios geotécnicos y geofísicos del suelo y subsuelo, como también estudios técnicos del comportamiento de la humedad del suelo, en vista de que son factores relevantes en la ocurrencia de deslizamientos.
- Se recomienda el desarrollo y aplicación de planes de contingencia y emergencia para riesgos de deslizamiento en zonas urbanas vulnerables acompañadas por el cumplimiento de normas urbanísticas.
- Se recomienda realizar proyectos de restauración ecológica en las zonas de riesgo, con el fin de estabilizar las laderas y minimizar el riesgo. Este plan de restauración debe ser una estrategia que permita combinar el uso de especies forestales nativas y otras que se adecuen a la zona a ser reforestada.
- Se recomienda coordinar con las diferentes instituciones encargadas del manejo y atención de emergencias, las estrategias a implementar en las áreas urbanas ubicadas en zonas de media y alta vulnerabilidad a deslizamientos. A fin de que la población esté debidamente informada sobre las acciones a tomar en caso de un deslizamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANDERSEN, L. E. 2009. Cambio climático en Bolivia: impactos sobre bosque y biodiversidad. Instituto de Estudios Avanzados en Desarrollo, Serie de Documentos de Trabajo sobre Desarrollo. No. 11/2009. La Paz, Bolivia.
- [2] ANDRADE, M.I. 2015. Riesgo hídrico y vulnerabilidad en la gestión del territorio. *Geosp – Espacio e Tempo* (On line), v.19, n.2, p 285-296, ago. 2015. ISSN 2179-0892.
- [3] ALONSO, R.N. & W.J. WAYNE. 1992. "Riesgos geológicos en el norte argentino". *Congreso Geológico Boliviano, Boletín* 27:213-216.
- [4] ASAGAI (Argentinean Association of Applied Geology and Engineering). 2004. Special Issue n. 4. Buenos Aires: ASAGAI.
- [5] AUZA, M., SANABRIA, N., SANDOVAL, M. & S. DALENCE. 2018. Diálogo de saberes para la gestión local del riesgo de inundación. S.I.G. y participación comunitaria para la reducción de la vulnerabilidad dentro la gestión local de riesgo de inundación. Franja Colcapirhua-Quillacollo. Cooperación Suiza en Bolivia. Universidad Mayor de San Simón. Centro de levantamientos aeroespaciales y aplicaciones SIG para el desarrollo sostenible de los recursos naturales CLAS. 100 p.
- [6] AYALA-CARCEDO F.J., ELÍZAGA E. & L.I. GONZALES DE VALLEJO. 1987. Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España. Serie Geología Ambiental. IGME. Madrid 91 pp.
- [7] ETXEBERRIA, P., EDESO, J.M. & A. BRAZAOLA. 2005. Propuesta de una metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG. *GeoFocus* (Artículos), No. 5, p. 250-267. ISSN: 1578-5157.
- [8] CHAVERRI, I. F. 2016. Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora-Varhson, en la microcuenca del Río Macho, San José, Costa Rica. Tesis de licenciatura en Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Forestal, Cartago.
- [9] CEDRIG. Guía para la Integración del Clima, el Medio Ambiente y la Reducción del Riesgo de Desastres. 2012. Parte II Manual de CEDRIG. Ed. Departamento Federal de Asuntos Exteriores FDFA. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE. 42 pp.
- [10] COMUNIDAD ANDINA. 2007. ¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y cambio climático en la comunidad andina. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Agencia Española de Cooperación Internacional. Lima, Perú. 130 pp.

- [11] COROMINAS J. 1993. Landslide occurrence a review of the Spanish experience. U.S. Spain Workshop on Natural Hazards Barcelona: 175-194.
- [12] DIKAU, R. 2004. Mass movements. En: Encyclopedia of Geomorphology. Routledge (A. Goudie ed.) Taylor & Francis Group. England 1156 pp.
- [13] FELGENTREFF, C. & T. ORGS. 2008. Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Kolumbien: Springer.
- [14] FERRER M. & AYALA F.J. 1997. Relaciones entre desencadenamiento de movimientos y condiciones meteorológicas para algunos deslizamientos en España. IV Simposio Taludes y Laderas. Granada. Vol 1. 185-197.
- [15] GARCIA, W. SUAREZ Y. & E. HERBAS. 2017. Evaluación del riesgo y medidas de mitigación para eventos de inundación en el Municipio de Santa Ana Del Yacuma (Beni, Bolivia). ACTA NOVA; Vol. 8, No. 2, septiembre 2017, pp.165 – 185 ISSN: 1683-0768.
- [16] GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA DEL VALLE CENTRAL DE COCHABAMBA. Boletín del Servicio Nacional de Geología y Minería año 2000. Sven Renner & Carlos Velasco.
- [17] HEC, H. 2000. Hydrological Modeling System HEC-HMS, Davis, California, USA: U.S. Army Corps of Engineers.
- [18] HOFFMANN, D. 2012. Cambio climático y desarrollo sostenible en regiones de montaña de Bolivia. Revista Virtual REDESMA 6(1): 39-45.
- [19] IRIGARAY C. & J. CHACON. 1991. Los movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga). Revista Sociedad Geológica de España. 4: 203-214.
- [20] IRIGARAY, C. 1995. Movimientos de ladera: Inventario análisis y cartografía susceptibilidad mediante un G.I.S. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga España). Tesis Doctoral. Universidad de Granada.
- [21] IPCC, I. 2007. Fourth Assessment Report: climate change. Informe del Grupo de Trabajo I-Base de las Ciencias Físicas. RT.4 Comprensión y Atribución del Cambio Climático [internet]. Geneva IPCC; 2007.
- [22] IPCC, I. 2012a. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) p. 582. New York: Cambridge University Press.
- [23] IPCC, I.2012b. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) p. 3-21. New York: Cambridge University Press.

- [24] IPCC, 2013: *CLIMATE CHANGE 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- [25] LAVEL, A.I. 1996. La Gestión de riesgo de Desastres: Un enfoque basado en procesos, Lima, Perú.
- [26] LEONE, F. *et al.* 1996. "Vulnerability assesment of elements exposed to mass- movement: Working toward a better risk perception" Landslides, Senneset (ed). Balkema Rotterdam. ISBN 9054108185. 263-269.
- [27] LUGO, J. 2011. Diccionario Geomorfológico. Instituto de Geografía, UNAM. Ciudad de México, México.
- [28] MERGILL, M., CARLA I., MARCHANT S. & S. MOREIRAS. 2015. "Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina". Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 24 (2): 113-131. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50211.
- [29] PAZ J. A, GONZÁLEZ, R., GÓMEZ R. J. & A. V. HERRERA. 2017. Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Investigaciones Geográficas. Instituto de Geografía. UNAMISSN (digital): 2448-7279. DOI: dx.doi.org/10.14350/rig.52822.
- [30] PEREZ, C., NICKLIN, C. DANGLES, O. VANEK, S. SHERWOOD, S., HALLOY, S., MARTINEZ, R., GARRET, K. & G. FORBES. 2009. Climate change in the high-altitude Andes: Implications and adaptation strategies for small scale farmers. McKnight Foundation's Collaborative Crop Research Program. 12 p.
- [31] QUESADA, R. & G. BARRENTES. 2017. Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. pp. 37-48.
- [32] QUESADA, A. & S. FEOLI. 2018. Comparación de la metodología Mora-Vahrson y el Método Morfométrico para determinar Áreas Susceptibles a Deslizamientos en la Microcuenca del Río Macho, Costa Rica. Revista Geográfica de América Central No.61. p 17-45. ISSN 1011-484X, julio-diciembre 2018.
- [33] SOLÍS, N., W. CHAYLE & A. RAMÍREZ. 2004. "¿Qué características tiene la remoción en masa en el noroeste argentino?". En Peligrosidad geológica en

Argentina: Metodologías de análisis y mapeo, editado por M. González y N. J. Bejerman, Publicación especial 4, 366-377. Buenos Aires: Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

- [34] SUAREZ, J. 2010. Deslizamientos: Análisis geotécnico. 1. Universidad de Santander, Colombia. En: Susceptibilidad de movimientos en masa en el valle de Socoroma, precordillera Andina de Arica y Parinacota. Rodríguez *et al.* 2014. Diálogo Andino No.44. Versión On-line ISSN 0719-2681.