

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA



**“MODELACIÓN DEL FLUJO DE DETRITOS PARA EL
ANÁLISIS DEL RIESGO EN LA QUEBRADA LOS
CÓNDORES, PROVINCIA DE LIMA, PERÚ”**

Presentado por:

CARLOS ENRIQUE MILLÁN ARANCIBIA

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA

Lima – Perú

2018

Dedicatoria.

*A Dios, por su amor inagotable y fidelidad,
y por el don del pensamiento.*

*A la memoria de mi hermano Franz Millán,
por enseñarme que tenemos solo una vida, y no hay que desperdiciarla.*

Agradecimientos

A Dios por cada puerta abierta para poder realizar esta investigación.

A mi madre Olga Arancibia, por su ejemplo de esfuerzo y apoyo incondicional.

A mi hermano James Millán, por sus aportes y discusiones en la investigación.

A mi tío Javier Arancibia, por la apertura al tema de investigación, y su constante apoyo.

Al Dr. Eduardo Chavarri por su asesoría, por su tiempo y consejos.

A Joan Torrebadella por su desinteresada ayuda.

Al Vicerrectorado de Investigación y a la Oficina de Gestión de la Investigación de la Universidad Nacional Agraria la Molina por la subvención de tesis.

A mi familia, amigos, y cada persona que de diversas formas contribuyeron para poder terminar esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCION.....	1
1.1	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1	Movimiento de Masas	3
2.2	Flujo de Detritos	6
2.3	Modelo reológico para flujo de detritos	7
2.3.1	Modelo de Voellmy	8
2.4	Modelo RAMMS: Debris Flow.....	9
2.4.1	Aplicaciones en el mundo:.....	11
2.5	Riesgo	14
2.5.1	Amenazas de origen hidrometeorológico.....	14
2.5.2	Vulnerabilidad (V).....	14
2.5.3	Riesgo	14
2.5.4	Desastre.....	15
2.5.5	Análisis del Riesgo	15
2.6	Aspectos básicos.....	15
2.6.1	Geología	15
2.6.2	Geomorfología.....	15
2.6.3	Hidrología	15
2.7	Cuenca hidrográfica y su geomorfología	16
2.7.1	Características físicas de la cuenca	16
2.8	Modelo Digitales de Elevaciones	18
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
3.1	Zona de estudio: Quebrada Los Cóndores.....	20
3.1.1	Ubicación	20
3.2	Materiales y equipos	21
3.3	Metodología	23
3.3.1	Cartografía.....	23
3.3.2	Geodesia.....	24
3.3.3	Imágenes satelitales PeruSAT	25
3.3.4	Información pluviométrica y climática.....	25
3.3.5	Delimitación de la zona de estudio.....	26
3.3.6	Parámetros de cuenca	27

3.3.7	Suelo.....	32
3.3.8	Geología	35
3.3.9	Geomorfología.....	36
3.4	Evaluación geodinámica del flujo de detritos	38
3.5	Hidrología y climatología	40
3.5.1	Pluviometría	40
3.5.2	Análisis de precipitaciones máximas en 24 horas.....	42
3.5.3	Generación de precipitaciones máximas probables de 24 horas.....	46
3.5.4	Generación de volúmenes de flujo de detritos para diferentes escenarios.....	52
3.6	Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) PeruSAT-1	54
3.6.1	Lectura de información satelital	55
3.6.2	Corrección con los puntos de control y tie points (TP)	55
3.6.3	Generación de pares epipolares	55
3.6.4	Generación y edición del modelo de elevación digital	55
3.7	Identificación de zonas pobladas en la quebrada Los Cóndores	56
3.8	Parámetros de calibración del modelo	58
3.8.1	Análisis de fotogramas	59
3.8.2	Determinación de las longitudes del tramo y pendiente en campo	60
3.8.3	Volumen de calibración	61
3.9	Modelamiento de flujo de detritos con RAMMS::Debris Flow	62
3.9.1	Entrada del Modelo Digital de Elevaciones:	62
3.9.2	Entrada del Área de liberación:	63
3.9.3	Área de dominio	64
3.9.4	Hidrograma de entrada	64
3.9.5	Entrada de parámetros.....	65
3.10	Calibración del modelo.....	65
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67
4.1	Modelo RAMMS::Debris Flow – DEM PeruSAT-1	67
4.2	Comparación de modelos PeruSAT-1 vs ALOS Palsar	69
4.3	Análisis de riesgos de flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores	71
4.4	Flujograma metodológico.....	73
V.	CONCLUSIONES	74
VI.	RECOMENDACIONES	76
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	77
VIII.	ANEXOS	80
	Anexo 1: Mapas de escenarios de riesgo	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de Movimientos de Masa	4
Tabla 2 Clasificación de cuencas según su tamaño	17
Tabla 3 Puntos de Control	24
Tabla 4 Disponibilidad de información	26
Tabla 5 Altura entre curvas de nivel	29
Tabla 6 Datos del ensayo de granulometría	33
Tabla 7 Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) – Estación Chosica	42
Tabla 8 Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) – Estación Santiago de Tuna	44
Tabla 9 Precipitación máxima en 24 horas (mm) para diferentes periodos de retorno – Estación Chosica	48
Tabla 10 Precipitación máxima en 24 horas (mm) para diferentes periodos de retorno – Estación Santiago de Tuna	48
Tabla 11 Periodos de retorno para una lluvia de 6.5 mm	49
Tabla 12 Periodos de retorno para una lluvia de 6.5 mm	49
Tabla 13 Precipitación máxima representativa para la quebrada Los Cóndores	51
Tabla 14 Volúmenes de flujo de detritos para diferentes periodos de retorno	53
Tabla 15 Estructuras expuestas al riesgo por flujo de detritos en el área de estudio	71
Tabla 16 Áreas bajo riesgo por flujo de detritos	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos de Movimientos de masa	5
Figura 2 Tipos de deslizamiento de tierra	6
Figura 3 Relación entre el estrés normal y el esfuerzo cortante. Izquierda: Yield Stress N_0 sirve para aumentar la tensión de corte para presiones normales más altas. A bajas presiones normales (pequeñas alturas de flujo), el esfuerzo cortante aumenta rápidamente de $S = 0$ a $S = N_0$. La pendiente de la relación 'S vs N' permanece μ , cuando las presiones normales son grandes. Derecha: si $\mu = 0$, tenemos un comportamiento visco-plástico	10
Figura 4 Zonas en el mundo donde se utiliza el modelo RAMMS	12
Figura 5 Modelo Digital de Superficie LIDAR de Chiapas	18
Figura 6 Modelo Digital de Terreno vs Modelo Digital de Superficie	19
Figura 7 Modelo Digital de Terreno vs Modelo Digital de Superficie	19
Figura 8 Mapa de Ubicación de la Quebrada Los Cóndores	21
Figura 9 DEM Alos-Palsar	23
Figura 10 Toma de puntos de control con el receptor GNSS	24
Figura 11 Imagen del satélite PeruSAT-1	25
Figura 12 Cuenca delimitada	27
Figura 13 DEM reclasificado de Cuenca Quebrada Los Cóndores	28
Figura 14 Curva Hipsométrica Cuenca Quebrada de Los Cóndores	29
Figura 15 Ráster de pendientes Cuenca Quebrada Los Cóndores	30
Figura 16 Pendiente del Cauce principal y secundarios de la Quebrada los Cóndores	30
Figura 17 División por pendientes del cauce principal de la Quebrada los Cóndores	31

Figura 18 Fotografías del suelo en campo	32
Figura 19 Tipo de Suelos Cuenca Quebrada Los Cóndores	33
Figura 20 Curvas Granulométricas	34
Figura 21 Fotografías del desarrollo de los ensayos de suelo en el laboratorio de mecánica de suelos UNALM.....	34
Figura 22 Zonas geológicas de la cuenca Los Cóndores.....	35
Figura 23 Imagen de la cuenca aguas abajo, donde se visualiza la pendiente del terreno y la gran cantidad de material suelto en la ladera. Parte media alta de la cuenca Los Cóndores.....	36
Figura 24 Zonas geológicas de la cuenca Los Cóndores.....	37
Figura 25 Quebradas presentes en la Cuenca Los Cóndores	38
Figura 26 Vista del proceso de erosión de suelos.....	39
Figura 27 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio	41
Figura 28 Precipitación de la estación Chosica en el verano del 2017.....	41
Figura 29 Serie anual de Precipitación Máxima en 24 horas - Estación Chosica.....	43
Figura 30 Serie anual de Precipitación Máxima en 24 horas - Estación Chosica.....	45
Figura 31 Test de Kolmogorov-Smirnov	46
Figura 32 Test de Kolmogorov-Smirnov	47
Figura 33 Mapa climático del Perú	50
Figura 34 Flujograma metodológico para la generación del Modelo Digital de Elevaciones PeruSAT-1.....	54
Figura 35 Visualización de una imagen del satélite PeruSAT-1.....	55
Figura 36 DEM generado a partir de Imágenes PeruSAT-1.....	56
Figura 37 Población vulnerable ante la presencia de flujo de detritos Cuenca Los Cóndores	57
Figura 38 Imagen del video del flujo de detritos del 16 de enero de 2017	58
Figura 39 Fotogramas del video del huayco del 16-01-2017	60
Figura 40 Tramo final escogido del video	61
Figura 41 Salida a campo - Vista aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha) del tramo analizado	61
Figura 42 Rasterizado del DEM del satélite PeruSAT-1 (izquierda) y del DEM del satélite ALOS-Palsar (derecha)	63
Figura 43 Resultado de geoprocésamiento para identificar las Áreas de liberación	63
Figura 44 Área de dominio del moldeo “Domain area”	64
Figura 45 Hidrograma de ingreso del flujo de detritos	65
Figura 46 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de presiones.....	66
Figura 47 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1	67
Figura 48 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1	68
Figura 49 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de velocidades.....	68
Figura 50 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de presiones.....	69
Figura 51 Modelo RAMMS PeruSAT-1 (der.) – ALOS Palsar (izq.).....	69
Figura 52 Flujo de detritos del 16 de enero del 2017	72
Figura 53 Flujograma metodológico para el modelamiento de flujo de detritos para el análisis del riesgo	73

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene por objetivo modelar el flujo de detritos de gran magnitud que se presentó el día 16 de enero de 2017, para el análisis del riesgo en la quebrada Los Cóndores, distrito de Chaclacayo, Lima – Perú. La modelación se lleva a cabo utilizando el módulo *Debris Flow* del modelo RAMMS (*Rapid Mass Movement Simulation*) que permite modelar flujos de detritos para el análisis de riesgos. El insumo principal del modelo es el *Modelo Digital de Elevaciones*, el cual fue generado a partir de las imágenes del satélite PeruSAT-1. La calibración del modelo fue llevada a cabo a partir de una filmación de un tramo del flujo tomada en el mismo día del evento. A partir de esta modelación se logra reproducir la simulación de cinco escenarios de riesgo para la quebrada Los Cóndores que dependen de precipitaciones máximas probables de 24 horas para diferentes periodos de retorno. De acuerdo a los resultados obtenidos, el modelo RAMMS es un método apropiado para la modelación de flujo de detritos para el análisis del riesgo, mediante el cual se genera los escenarios de riesgo por flujo de detritos para la gestión de riesgos.

Palabras clave: Flujo de escombros, huaycos, PeruSAT, análisis del riesgo.

ABSTRACT

This research work aims to model the debris flow of great magnitude that was presented on January 16, 2017, for the risk analysis in Los Cóndores basin, Chaclacayo district, Lima - Peru. The modeling process is performed using the Debris Flow module of the RAMMS model (Rapid Mass Movement Simulation) that allows modeling the debris flows for risk analysis. The main input of the model is the Digital Elevation Model, which was generated from the imagery of the PeruSAT-1 satellite. Calibration of the model was carried out from a filming of a section of the flow taken on the same day of the event. From this modeling, it is possible to reproduce the simulation of five risk scenarios for Los Cóndores basin that depend on probable maximum rainfall of 24 hours for different return periods. According to the results obtained, the RAMMS model is an appropriate method for debris flow modeling for risk analysis, through which risk scenarios are generated by debris flow for risk management.

Keywords: Debris flow, huaycos, PeruSAT, risk analysis.

I. INTRODUCCION

Durante el verano del año 2017 se desarrollaron eventos extraordinarios los cuales derivaron en fuertes lluvias y, por ende, en caudales que superaron los picos históricos en varias estaciones a nivel nacional, según el SENAMHI.

Estos fenómenos generaron desastres naturales que causaron estragos en diferentes ciudades del país como Lima, Trujillo, Chiclayo, Piura; además afectaron a otras ciudades que dependen de las actividades en estas ciudades.

A nivel nacional, según reportes del COEN (abril 2017) los eventos de ese año generaron 113 víctimas mortales, 185638 damnificados, 1075587 afectados y 244833 viviendas afectadas. Sólo en Lima se tuvieron 14 víctimas mortales, 14328 damnificados, 44351 afectados y 12162 viviendas afectadas.

Los lugares que fueron afectados en las provincias de Lima y Huarochirí fueron las ciudades de Chosica, Santa Eulalia, Chaclacayo, donde se activaron diferentes microcuencas como consecuencia de estos eventos naturales, generando daños a la población que vive en estas zonas. Esto demuestra que estas ciudades siguen siendo altamente riesgosas a pesar de que es comun ver este tipo de fenómenos naturales en estas zonas del Perú.

Este panorama, que es ocurrente históricamente, indica que aún se debe de seguir estudiando las zonas vulnerables, como base para determinar de una forma adecuada las medidas preventivas y correctivas que deberían de ser ejecutadas en cada zona.

Es en este contexto en que nace este estudio de investigación para analizar el riesgo generado por flujos de detritos, comúnmente conocidos como huaycos; simulando estos eventos a través del modelo de simulación RAMMS: Debris Flow. El cual proporcionará la información de cuáles son las zonas de riesgo que serán afectadas por un movimiento de masa, y así, mostrar las zonas más adecuadas para la construcción de estructuras preventivas en el cauce.

Existen varias quebradas de alto riesgo como Carossio, Rayos de Sol, Quirio, Cashahuacra, Los Cóndores, entre otros; de las cuales se optó por realizar el estudio de la quebrada Los Cóndores, pues es una de las quebradas afectadas por este tipo de eventos, y que además no ha sido intervenida en mayor medida como otras quebradas. Este estudio de esta quebrada servirá de base para estudios en otras quebradas que se ven afectadas por el mismo evento.

La Quebrada Los Cóndores, se encuentra ubicada políticamente dentro del distrito de Chaclacayo, la Provincia de Lima, departamento de Lima, Perú.

1.1 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo Principal:

- Realizar el análisis del riesgo por flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores.

Objetivo Secundarios:

- Calibrar los parámetros de ingreso del modelo RAMMS: Debris Flow.
- Simular eventos de flujo de detritos a través del modelo RAMMS: Debris Flow en la quebrada Los Cóndores para diversos periodos de retorno.
- Proponer una metodología para realizar el análisis del riesgo del flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Para iniciar este estudio, se debe de tener claro los conceptos con los cuales se desarrollarán esta investigación. Los cuales se definirán en este apartado.

2.1 Movimiento de Masas

Duque (2016) indicó que son los movimientos de la roca y del material no consolidados en respuesta a la atracción de la gravedad. El agua, el hielo y el viento son agentes geológicos de erosión. Aunque los medios de transporte son variados, entre los principales figuran los ríos. Siendo varias las causantes que condicionan el modelado de las rocas y las distintas morfológicas, entre ellas se destacan la tectónica, la climatología y el tipo de roca. La climatología influencia los agentes geológicos externos que provocan erosión.

Corina Wendeler (2016) indicó en su trabajo de investigación acerca de los sistemas de protección para flujo de detritos en montañas tormentosas que existen diferentes movimientos de masas utilizados con fines de ingeniería, dicha clasificación se presenta en la siguiente tabla, donde se muestra la clasificación completa de movimientos de masa según Varnes (1978).

Tabla 1 Clasificación de Movimientos de Masa

Mecanismos de Movimiento	Tipo de Material involucrado		
	Roca (<i>rock</i>)	Derrubios (<i>debris</i>)	Suelo (<i>soil</i>)
Desprendimientos (<i>fall</i>)	Caida o desprendimiento de rocas (<i>rockfall</i>)	Caida o desprendimiento de derrubios (<i>debris fall</i>)	Caida o desprendimiento de suelos (<i>soil fall</i>)
Vuelco o desplome (<i>topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)	Vuelco o desplome de derrubios (<i>debris topple</i>)	Vuelco o desplome de rocas (<i>rock topple</i>)
Deslizamiento rotacional simple (<i>rotational slide</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)	Individual (<i>simple</i>) Multiple (<i>multiple</i>) Sucesivo (<i>successive</i>)
Deslizamiento translacional o de bloques no rotacional (<i>translational slide, non-rotational</i>)	Deslizamiento de roca en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento de derrubios en bloque (<i>block slide</i>)	Deslizamiento translacional de suelos (<i>slab slide</i>)
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas (<i>rock slide</i>)	Deslizamiento de derrubios (<i>debris slide</i>)	Coladas de barro (<i>mudslide</i>)
Flujos (<i>flow</i>)	Flujo de rocas (<i>rock flow</i>)	Corrientes de derrubios (<i>debris flow</i>)	Flujos de tierra, arena o suelo (<i>soil flow</i>)
Expansion lateral (<i>lateral spreading</i>)	Expansiones laterales en rocas (<i>rock spreading</i>)	Expansiones laterales en derrubios (<i>debris spread</i>)	Expansiones laterales en suelos (<i>soil spreading</i>)
Complejo (<i>complex</i>)	Ejemplo: alud de rocas (<i>rock avalanche</i>)	Ejemplo: Flujo deslizante (<i>flow slide</i>)	Ejemplo: rotación con flujo de tierras (<i>slump-earthflow</i>)

Fuente: EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988)

Algunos de estos eventos son representados en la siguiente figura relacionado a tipos de movimiento.

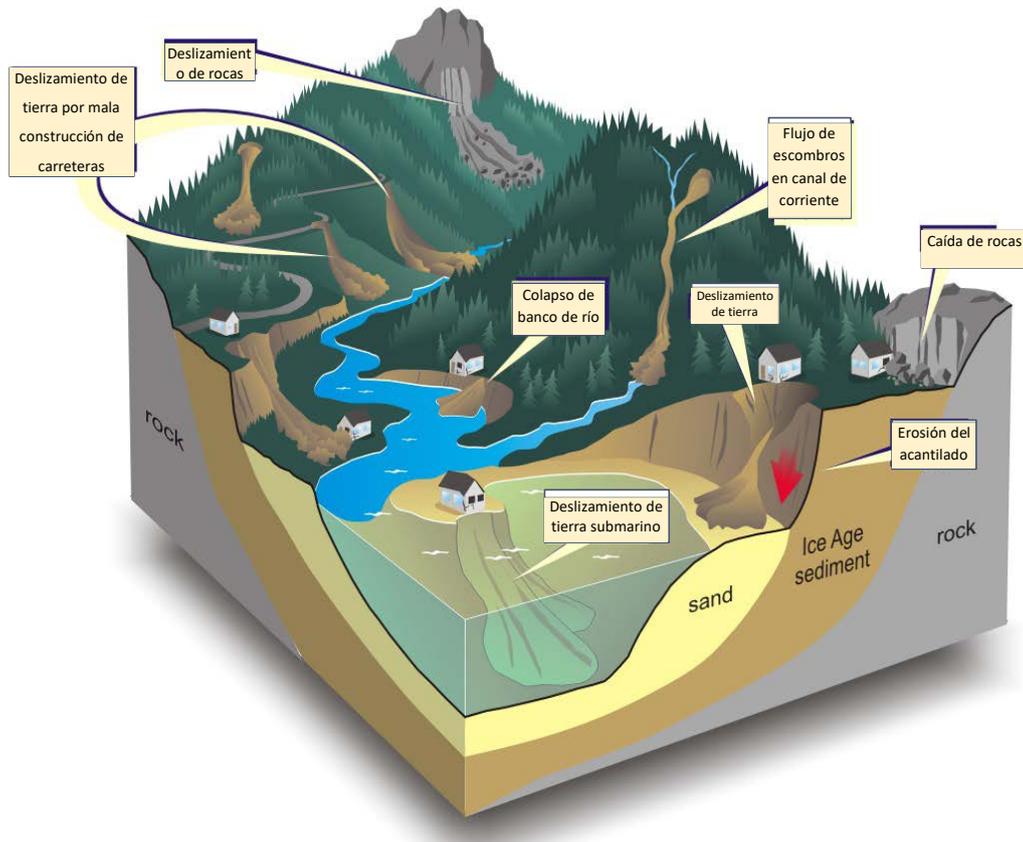


Figura 1 Tipos de Movimientos de masa

Fuente: MADRIMASD

Además, Wendeler, señala que los movimientos de masa gravitacional ocurren debido a cambios en el equilibrio de fuerzas, es decir, la relación entre las fuerzas de desaceleración y aceleración, que son el resultado de procesos físicos y/o químicos. Donde menciona que, al igual que Duque, el agua juega generalmente un papel decisivo, ya que reduce la estabilidad, es decir, la fricción interna y la cohesión del material, por medio de una diversidad de procesos. En este punto, la autora hace la diferencia entre movimientos de masa gravitacional y el deslizamiento de tierra (landslide), siendo el primer término más usado comúnmente pues abarca otros procesos como los de caída, derribo y deslizamientos más lentos como el Creep (que es el movimiento lento e imperceptible hacia abajo por la pendiente de material formado por suelo y roca) y Spread (expansiones laterales es el movimiento lateral del suelo característico en pendientes suaves o terrenos planos).

Se define a los movimientos de masa gravitacional como el proceso geomorfológico gravitacional de rocas, suelo y material no consolidado, el cual está relacionado con la erosión. Es producto de la interacción de diferentes factores, donde el agua originada por las lluvias, acentúan este proceso.

2.2 Flujo de Detritos

En el apartado anterior, se definió el término de movimiento de masas, donde se vio que el flujo de detritos es un tipo de movimiento de masa gravitacional. Los flujos de detritos también son conocidos como debris flow o comúnmente llamado huaycos. Los flujos de detritos son flujos rápidos de mezclas de agua, detritos o escombros, sedimentos y maderas; con alta concentración de sólidos alrededor de 30 a 70 %. El cual se produce en regiones montañosas donde los sustratos susceptibles a la erosión proveen mucho material de roca no consolidado. Adicionalmente, se requiere de pendientes pronunciadas entre 25 y 30 %, dependiendo del ángulo de fricción del material. Además, se necesitan grandes cantidades de agua, por ejemplo, las que resultan de fuertes lluvias, como iniciador, movilizándolo el material sólido no consolidado. Una vez que el flujo de detritos es movilizado, puede alcanzar velocidades hasta 15 m/s y densidades entre 1600 y 2300 kg/m³. Los volúmenes desplazados por un flujo de escombros pueden crecer hasta varios cientos de miles de metros cúbicos. Dicho flujo es depositado cuando sale del lecho del río o se rompe lateralmente en un terraplén, señala Wendeler (2016).

Este es el proceso que ocurre en las zonas de estudio, donde se puede observar el flujo de los detritos provenientes de las zonas altas, las cuales son originadas por las lluvias intensas, propias de la estación, y que además el verano del 2017 se produjo con mayor magnitud que otros años por el fenómeno del Niño costero. Es este fenómeno que se pretende caracterizar y estimar como se dio y daría el proceso en futuros eventos en la quebrada de estudio.

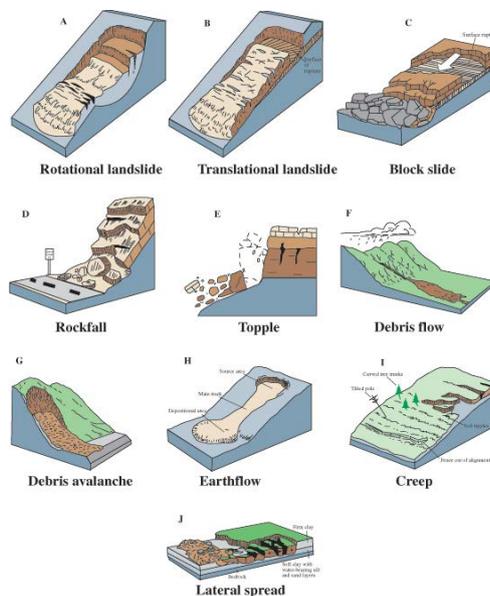


Figura 2 Tipos de deslizamiento de tierra

Fuente: USGS, 2004

2.3 Modelo reológico para flujo de detritos

El modelo RAMMS: Debris Flow, el cual será descrito en la siguiente sección, está basado en un modelo de un fluido reológico, por lo cual en esta sección se presenta la información referente a este tipo de modelo, y luego se describe el modelo Voellmy relacionado a nuestro modelo.

La reología es la ciencia que explica la deformación de los materiales, tanto líquidos como sólidos. Un material determinado responde de una forma característica frente a una fuerza aplicada. El objetivo de la reología es describir el comportamiento del material a partir de las relaciones entre la fuerza aplicada, la deformación y el tiempo. Para ello se establecen las ecuaciones constitutivas, que derivan de los principios físicos (Oto, 2007).

Existen diferentes modelos para representar el comportamiento de los flujos de gravas y barro. Se puede diferenciar dos grupos en este tipo de modelos, los que representan el flujo de detritos como una sola fase continua y los que lo representan como dos fases.

Los modelos de una sola fase tienen como base parámetros de las tensiones, incluyendo modelos elasto-visco-plásticos; dentro de este grupo se puede nombrar las siguientes:

- Fluidos Newtonianos y no-Newtonianos
- Modelos convectivos de Maxwell
- Fluidos de Bingham
- Fluidos de Johnson-Segelman
- Fluidos de Reiner-Rivlin
- Modelo de Herschel-Bulkley
- Modelo de Mohr-Coulomb
- Modelo de Voellmy
- Modelos hipoplásticos

Los modelos de dos fases tienen como base el balance de momentum postulado para cada uno de los constituyentes, con relaciones constitutivas para las tensiones parciales y las fuerzas de interacción (en el caso de una mezcla entre sólido y fluido se trataría de la fuerza que ejerce el fluido sobre las partículas sólidas y la correspondiente reacción sobre el fluido). La parametrización de todo el conjunto se vuelve complicada, y los modelos existentes requieren detalles sutiles para cada caso. Los más reconocidos son los siguientes:

- Modelo de Iverson
- Modelo de Pitman-Le

2.3.1 Modelo de Voellmy

Este modelo es el que sirve de base para el modelo RAMMS: Debris Flow. El modelo de Voellmy (1955) se desarrolló inicialmente para estudiar el flujo de las avalanchas de nieve. En él se asume que las tensiones de corte en el cuerpo son pequeñas, y que la resistencia al flujo se concentra en la base del mismo. Voellmy propuso una ecuación para la tensión en la base integrada por dos términos, un término de fricción y un término turbulento:

$$\tau_b = S = \mu\rho Hg\cos(\phi) + \frac{\rho g u^2}{\xi}$$

donde ρ es la densidad de los granos, g es la constante gravitacional, h es el calado, ϕ es el ángulo de inclinación, U es la velocidad promedio y ξ es el coeficiente de Chézy. El primer término es el término friccional de Mohr-Coulomb, y el segundo es el término turbulento de Chézy.

Hungr (1995) testó los resultados de Bagnold en el régimen inercial, en el que la tensión de corte depende del cuadrado de la velocidad de deformación, y obtuvo una buena correlación. Por otro lado, Richenmann & Koch (1997) mostraron que el modelo de Voellmy también ofrece buenos resultados en la simulación de flujos detríticos en canales torrenciales.

2.4 Modelo RAMMS: Debris Flow

RAMMS (Rapid Mass Movements) Debris Flow es un modelo desarrollado para simular el proceso de movimiento de los flujos de barros y escombros en terrenos susceptibles. Este módulo fue desarrollado por el Instituto Federal Suizo de Bosques, Nieve y Paisajes (WSL, por sus siglas en alemán), y el Instituto Federal Suizo de Nieve y Avalanchas (SLF por sus siglas en alemán). El modelo requiere los siguientes datos de entrada: la topografía, el área de liberación o hidrograma, y la fricción de los parámetros μ y ξ . Los resultados más importantes son la altura de deposición, velocidad, presión y cantidad de movimiento, también en términos de los valores máximos. El proyecto RAMMS, inicio el 2005, y el módulo Debris Flow fue lanzado el 2012 (Bartelt et al., 2003).

El modelo RAMMS: DEBRISFLOW se utiliza para calcular el cambio del movimiento desde la iniciación hasta la carrera en un terreno tridimensional. El modelo utiliza ecuaciones de profundidad promediada y predicen las velocidades de pendiente paralela y las alturas de flujo. Esta información es suficiente para la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. La información en la dirección perpendicular de la pendiente (por ejemplo, distribución de la masa y la velocidad) se pierde; sin embargo, esto rara vez es de interés práctico. El modelo requiere una representación digital precisa del terreno. Los ingenieros especifican las condiciones iniciales (ubicación y tamaño de la masa de liberación) y los parámetros de fricción, según el terreno (por ejemplo, rugosidad, vegetación) y el material (por ejemplo, el contenido de nieve, hielo o lodo del flujo de escombros) (Bartelt et al., 2003).

El instituto WSL y el instituto SLF, explica en su manual para RAMMS que el modelo físico de RAMMS: Debris Flow utiliza la ley de fricción Voellmy. Este modelo divide la resistencia friccional en dos partes: una fricción de tipo Coulomb seco (coeficiente μ) que se escala con la tensión normal y una velocidad-cuadrado de resistencia o fricción viscosa-turbulenta (coeficiente ξ).

La resistencia de fricción S (Pa) es entonces

$$S = \mu\rho Hg\cos(\phi) + \frac{\rho g u^2}{\xi}$$

dónde ρ es la densidad, g la aceleración gravitacional, ϕ el ángulo de la pendiente, H la altura del flujo y el vector $u = (u_x, u_y)^T$ que consiste en la velocidad del flujo en las dirección x e y . El estrés normal en la superficie de rodadura, $\rho Hg\cos(\phi)$, se puede resumir en un solo parámetro N . El modelo de Voellmy explica la resistencia de la fase sólida (μ se expresa a

veces como la tangente del ángulo de corte interno) y una fase de fluido viscoso o turbulento (ζ fue introducido por Voellmy usando argumentos hidrodinámicos). Los coeficientes de fricción son responsables del comportamiento del flujo. μ domina cuando el flujo está cerca de detenerse, ζ domina cuando el flujo se está ejecutando rápidamente. La ecuación resumida con el parámetro N ($N = \rho H g \cos(\phi)$) sería:

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\zeta},$$

A lo largo de una simulación, los coeficientes de fricción de un dominio de cálculo son constantes. Sin embargo, tiene la posibilidad de agregar hasta dos polígonos dentro del dominio de cálculo con diferentes parámetros de fricción.

Desde su versión 1.6.20 la ecuación básica de Vollmy fue modificada para incluir un parámetro de cohesión denominado *Yield stress* (esfuerzo de producción), esto pues muchos materiales, como el barro, no muestran una relación lineal simple ($\mu = \text{constante}$), mirar la siguiente figura. Para modelar el límite elástico, se introdujo el parámetro N_0 . Con ese enfoque, es posible modelar materiales plásticos ideales. En este caso, N_0 sirve como un límite elástico y μ como un parámetro de "endurecimiento". La nueva ecuación para la resistencia de fricción S es entonces:

$$S = \mu N + \frac{\rho g u^2}{\zeta} + (1 + \mu)N_0 - (1 - \mu)N_0 e^{-\frac{N}{N_0}}$$

donde N_0 es la cohesión de material que fluye. Esta fórmula aumenta la tensión de corte y, por lo tanto, hace que el flujo de residuos se detenga antes, según el valor de N_0 .

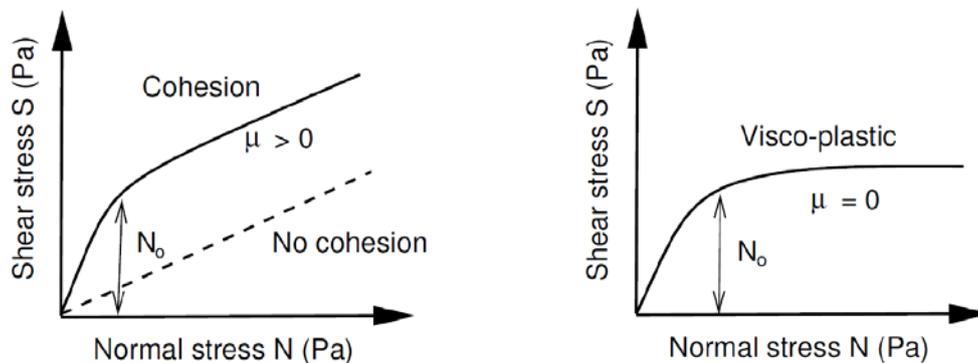


Figura 3 Relación entre el estrés normal y el esfuerzo cortante. Izquierda: Yield Stress N_0 sirve para aumentar la tensión de corte para presiones normales más altas. A bajas presiones normales (pequeñas alturas de flujo), el esfuerzo cortante aumenta rápidamente de $S = 0$ a $S = N_0$. La pendiente de la relación 'S vs N' permanece μ , cuando las presiones normales son grandes. Derecha: si $\mu = 0$, tenemos un comportamiento visco-plástico.

Fuente: Manual RAMMS:DBF

Este es el modelo que se aplica a la zona de riesgo del presente estudio, y calibra con el evento producido el 16 de enero del verano del año 2017.

Técnica de solución numérica utilizada por RAMMS

En todas las versiones de RAMMS hasta la versión 1.5.01, se usó un esquema ENO (esencialmente no oscilatorio) para resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales gobernantes (Christen et al., 2010). Sin embargo, la solución numérica se implementó en grillas estrictamente ortogonales. Esto mejora la velocidad computacional, pero introduce inestabilidades numéricas especialmente en terrenos empinados. A partir de la versión 1.6.20 se utiliza el mismo esquema ENO de segundo orden, pero ahora en cuadrícula cuadrilátera general. Este nuevo esquema mejora la estabilidad numérica, pero reduce un poco la velocidad de cálculo. La introducción de este esquema ENO estable nos permite utilizar valores H_cutoff más bajos que minimizan la pérdida de masa durante los cálculos. El valor estándar de H_cutoff es 0.000001 m (Bartelt et al., 2017). El método numérico ENO aumenta la región de precisión para el interpolador evitando las oscilaciones cerca de las discontinuidades.

Los métodos ENO han sido de bastante utilidad para aquellos problemas que consideran complicadas estructuras de solución suave, como, por ejemplo, las simulaciones de turbulencias compresibles y las simulaciones de aeroacústica (Coronel et al., 1996).

2.4.1 Aplicaciones en el mundo:

Según el equipo de RAMMS (2017) el modelo viene siendo usado por ingenieros especialistas en riesgo, por diferentes gobiernos, y en universidades e instituciones dedicadas a la investigación. Está siendo aplicado en diferentes partes del mundo como Suiza, Noruega, Austria, Italia, Chile, Corea del Sur, India, Nueva Zelanda, Polonia, España, Estados Unidos, Francia, República Checa, Rusia, Alemania, China, Brasil, Andorra, Arabia Saudita, Canadá, Reino Unido, Turquía, Eslovenia, Kasachstan, Uzbekistán, El Salvador, Argentina, Taiwán, etc.



Figura 4 Zonas en el mundo donde se utiliza el modelo RAMMS

Fuente: Presentación RAMMS, WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF

A continuación, se presenta algunas aplicaciones realizadas con el modelo RAMMS, en diferentes partes del mundo:

“Modeling Debris-Flow Runout Pattern on a Forested Alpine Fan with Different Dynamic Simulation Models”. (Modelado del patrón de desviación del flujo de escombros en un ventilador alpino con bosques con diferentes modelos de simulación dinámica). En este trabajo de investigación se compararon dos modelos de flujo de detritos, RAMMS-Debris Flow y DAN 3D, en la localidad de Reiselehnrinne Creek, en Austria, con un área de 0.7 km², teniendo parámetros de tensión similares que va desde 0.07–0.11 para μ y 200–400m/s² para ξ . Una de las conclusiones fue que se genere más modelaciones para diferenciar los tipos de rugosidad en cada superficie. Schraml, et all. (2015).

“Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model” (Modelado del flujo de escombros en las cuencas de Meretschibach y Bondasca, Suiza: pruebas de sensibilidad del modelo de arrastre basado en datos de campo). En este trabajo se concluyó que el método general presentado en el estudio es útil para estudios de casos donde hay suficientes datos disponibles para restringir los resultados del modelo. Sin embargo, se deben realizar más estudios de caso para desarrollar una recomendación más integral para modelar la desviación de los flujos de escombros erosivos en el terreno natural. Frank, et all. (2017).

“Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el Barranc de Portainé”. El estudio fue realizado en la cuenca Barranco de Portainé, donde llegaron a las conclusiones de que la calibración se puede realizar con datos tomados en campo para un evento histórico, denominado *back-analysis*. Además, que RAMMS es una herramienta capaz de simular con

notable precisión las características del flujo de detritos del evento histórico. Raïmat, et all. (2013).

“Modelación de Crecidas Aluvionales en la Cuenca del Río Copiapó, Chile”. El estudio genero las siguientes conclusiones que, a pesar de la limitada información disponible para calibrar el modelo, esa primera experiencia de modelación de las crecidas aluvionales en la cuenca del Río Copiapó ha demostrado ser exitosa. Donde la mayor dificultad encontrada fue la calibración.

2.5 Riesgo

A continuación, se presentan conceptos acerca del riesgo en una zona.

2.5.1 Amenazas de origen hidrometeorológico

Según el SENAMHI en su página web, esta amenaza es un factor externo y son clasificados como amenazas naturales, en tanto el hombre no interviene en su ocurrencia y tampoco hay condiciones para evitar que se presenten dichos fenómenos. En el Perú se producen intensas lluvias, granizadas, desbordes e inundaciones, temperaturas extremas, sequías, etc. Estas amenazas pueden alterar la geodinámica de nuestro territorio y producirse: deslizamientos, huaycos y aluviones.

2.5.2 Vulnerabilidad (V)

Según el SENAMHI en su página web, la vulnerabilidad es el factor interno de una comunidad expuesta a una amenaza y que puede ser afectada y depende de varios factores:

- El grado de exposición (zona de huaycos, ribera de los ríos, terrenos con fallas geológicas, etc.).
- El grado de incorporación en la cultura y los conocimientos que permita a los pobladores reconocer las amenazas.
- La calidad del diseño de la construcción de las viviendas y las áreas libres de evacuación.
- El grado de organización de la sociedad y la orientación de las instituciones de la comunidad, del Estado y de las organizaciones no gubernamentales.
- Capacidades de las instituciones que prestan apoyo en las emergencias.

2.5.3 Riesgo

Es la exposición a la amenaza y las condiciones en que se encuentra una comunidad.

Es la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas a consecuencia de su condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro.

2.5.4 Desastre

Es Producida por una amenaza que un momento dado era potencial y por causas humanas. Estos sucesos causan alteraciones intensas en las personas, los bienes, los servicios y su ambiente, excediendo la capacidad de respuesta de la comunidad afectada, de tal manera que en su recuperación requiera de ayuda externa.

2.5.5 Análisis del Riesgo

El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres – CENEPRED, define el análisis del riesgo como el procedimiento técnico, que permite identificar y caracterizar los peligros, analizar las vulnerabilidades, calcular, controlar, manejar y comunicar los riesgos, para lograr un desarrollo sostenido mediante una adecuada toma de decisiones en la Gestión del Riesgo de Desastres. El Análisis de Riesgo facilita la determinación del nivel del riesgo y la toma de decisiones.

2.6 Aspectos básicos

Entender los aspectos básicos de la cuenca en cuanto a su geología, geomorfología y clima brindará información importante para estudiar y analizar los huaycos en la zona. A continuación, se definen estos aspectos básicos considerados en la tesis.

2.6.1 Geología

Se define como la ciencia que persigue la comprensión del planeta tierra, a través del estudio de los materiales que componen la tierra y la búsqueda de la comprensión de los diferentes procesos que actúan debajo y encima de la superficie terrestre (Tarbuck et al., 2005).

2.6.2 Geomorfología

Rama de la geología que estudia y se ocupa de la forma de la tierra, incluyendo todos los fenómenos sobre y cerca de la superficie terrestre y se preocupa de las interacciones entre varios tipos de materiales y procesos, implicando sólidos, líquidos y gaseosos (Gutiérrez, 2008).

2.6.3 Hidrología

La hidrología se define como la ciencia que estudia el comportamiento, las propiedades, la distribución y circulación del agua; el cual en su descripción y análisis se relaciona

estrechamente con otras ciencias que gobiernan los entornos estudiados, tales como la meteorología, geología, ecología, etc (Mejía,2012).

2.7 Cuenca hidrográfica y su geomorfología

Según, Viessman, Harbaugh, Knapp (1977), la cuenca hidrográfica es toda el área drenada por un curso de agua o por un sistema de cursos de agua, cuyas aguas concurren a un punto de salida (punto de desfogue).

Mejía (2012), señala que cada cuenca hidrográfica tiene características físicas y funcionales que determinan la naturaleza de la descarga de un curso de agua. El conocimiento de estos factores de cuenca hidrográfica es importante para la hidrología de la zona, y por ende lo es, para el análisis del riesgo del flujo de detritos en una cuenca hidrográfica ya que el flujo de detritos sigue el mismo recorrido de los cauces de agua.

2.7.1 Características físicas de la cuenca

a) Área de la cuenca

Es el área plana en proyección horizontal, encerrada por la divisoria. Investigaciones hidrológicas diversas han puesto de manifiesto que existe diferencia entre una cuenca pequeña y una grande. En una cuenca pequeña la cantidad y distribución del escurrimiento son influenciadas principalmente por el clima, geomorfología, condiciones físicas del suelo y la cobertura, etc; en cambio para cuencas grandes el control del hombre, así como el efecto de almacenamiento en la cuenca determina que la estimación del escurrimiento sea más compleja (Chavarri, 2013).

Según Ven Te Chow, una cuenca pequeña puede ser definida como aquella que es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración y en la cual predominan las características físicas del suelo sobre las del cauce principal. Menciona además que una cuenca pequeña puede bordear entre 4 a 130 km².

Como referencia se puede utilizar la siguiente clasificación:

Tabla 2 Clasificación de cuencas según su tamaño

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia-pequeña
500 a 2500	Intermedia-grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: Chavarri (2013), Apuntes de clase

b) Forma de la cuenca

La forma de la cuenca definitivamente afecta las características del hidrograma de descargas, principalmente en los eventos de máximas avenidas. Generalmente los escurrimientos máximos de una cuenca de forma casi circular serán de duración más corta y de descarga pico mayor que una cuenca estrecha y alargada considerando que ambas soportan la misma precipitación sobre una misma área.

Coefficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (Cc)

Definido por Gravelius en 1914. El coeficiente de compacidad se define como el cociente adimensional entre el perímetro de la cuenca (P) y la circunferencia (Pc) de un círculo con área igual al tamaño (A) de la cuenca.

$$Cc = \frac{P}{Pc} = 0.282 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

El coeficiente de compacidad tendrá como límite inferior la unidad, indicando entonces que la cuenca es circular y conforme su valor crece indicará una mayor distorsión en su forma, es decir se volverá más alargada o asimétrica (Chavarri, 2013).

Relación de elongación

Se define como el cociente adimensional entre el diámetro (D) de un círculo que tiene igual área (A) que la cuenca y la longitud (Lc) de la misma. La longitud Lc se define como la más grande dimensión de la cuenca, a lo largo de una línea recta desde la salida hasta la divisoria, paralela al cauce principal.

2.8 Modelo Digitales de Elevaciones

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, define los Modelos Digitales de Elevación, también conocidos por sus siglas en inglés como DEM, como la representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, lo cual permite representar el relieve y sus características superficiales. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos).

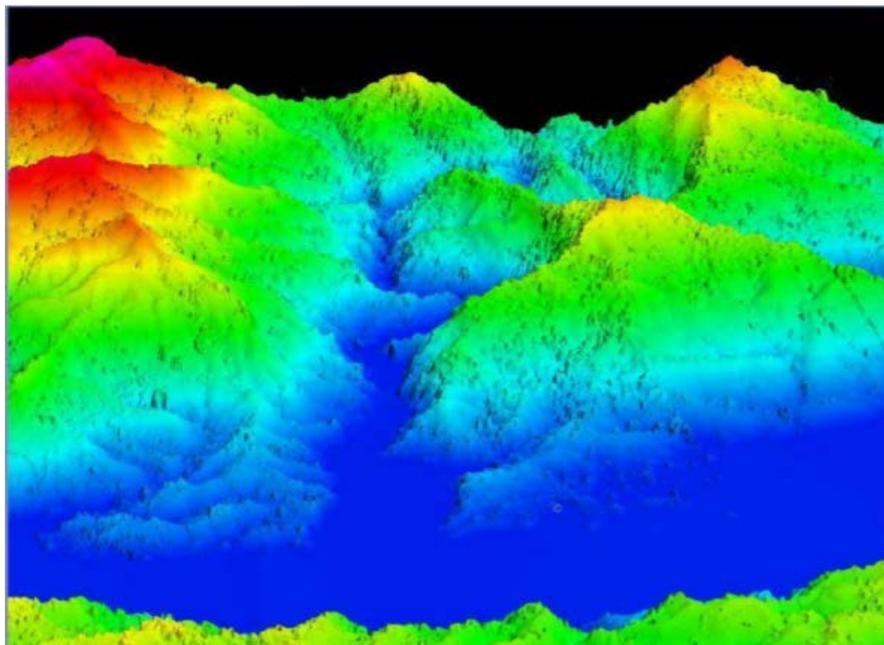


Figura 5 Modelo Digital de Superficie LIDAR de Chiapas

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México

Los modelos digitales de elevaciones, se dividen en dos subgrupos, los modelos digitales de superficie y los modelos digitales del terreno, la siguiente figura muestra la diferencia entre ambos tipos de modelos, y luego se define más detalladamente estos puntos.

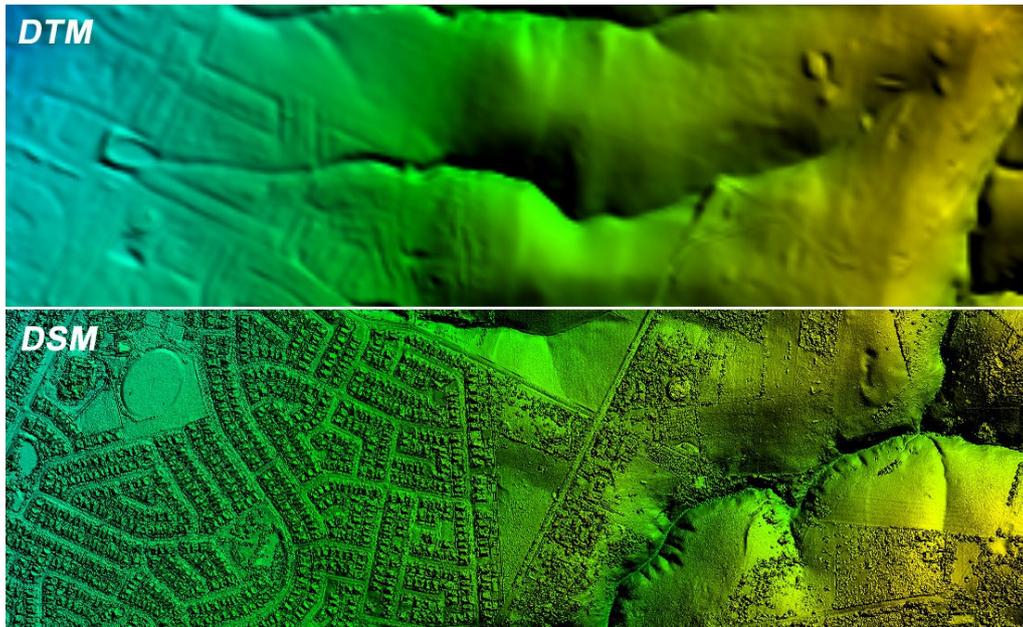


Figura 6 Modelo Digital de Terreno vs Modelo Digital de Superficie

Fuente: GIS Resources

Un Modelo Digital de Superficie (MDS o DSM por sus siglas en inglés) es una elevación que incluye la parte superior de edificios, copas de árboles, líneas eléctricas y otras características sobre la tierra desnuda. Por ejemplo, la primera devolución de LiDAR consiste en un DSM.

En cambio, el Modelo Digital del Terreno (MDT o DTM por sus siglas en inglés) recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno (Saurabh Singh, 2016).

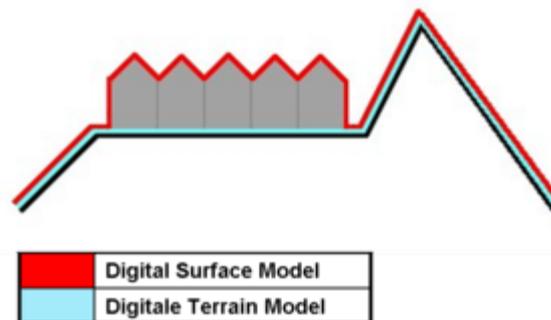


Figura 7 Modelo Digital de Terreno vs Modelo Digital de Superficie

Fuente: GIS Resources

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Zona de estudio: Quebrada Los Cóndores

3.1.1 Ubicación

La zona de estudio para el presente proyecto es la Quebrada Los Cóndores, está localizada dentro del distrito de Chaclacayo, al lado este de la provincia de Lima, departamento de Lima, Perú.

Según datos de la Municipalidad de Chaclacayo, esta se encuentra ubicado geográficamente a 11° 58' Latitud Sur, 76° 46' Longitud Oeste a una altitud de 647 msnm. En las afueras de Lima Metropolitana, a 27km en dirección este por medio de la Carretera Central.

Para hablar acerca de su geografía, es necesario precisar que el distrito está localizado en el valle del río Rímac, río que desciende de los Andes peruanos hacia la vertiente hidrográfica del océano Pacífico. Este recorrido del río está acompañada por dos cadenas de formaciones montañosas ramificadas de la cordillera de los andes que corren paralelo al río Rímac ubicándose al norte y sur de la ciudad. Esta combinación de factores a modelado su relieve presentando accidentes geográficos notables.

Acerca del clima de la zona, tiene la particularidad de tener un clima seco y templado, siendo la contra estación de Lima, ubicada a solo 20 kilómetros de distancia; es decir, mientras en la capital peruana hace frío, en Chaclacayo hace calor. Climatológicamente Chaclacayo varía en las estaciones de otoño-invierno entre los 22 °C a 13 °C (siendo las mañanas de cielo cubierto con ligeras nieblas, y a partir de las 11 h. brillo intenso de sol hasta el atardecer). Mientras que en las estaciones de primavera-verano la temperatura varía entre los 13 °C a 25 °C (siendo la totalidad del día soleado), llegando incluso a temperaturas que superan los 28 °C, esto según lo especificado por la Municipalidad de Chaclacayo. En la Figura 8 se presenta el mapa de ubicación de la zona de estudio.

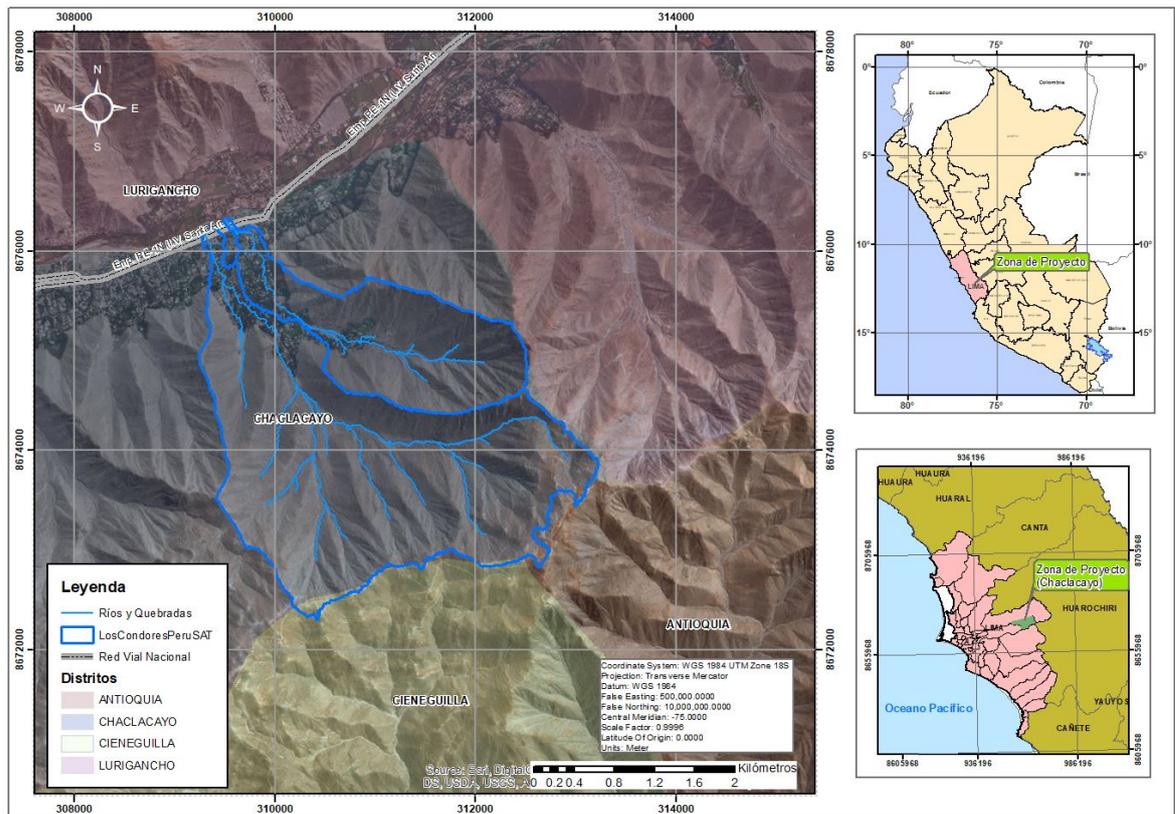


Figura 8 Mapa de Ubicación de la Quebrada Los Cóndores

Fuente: Elaboración propia

3.2 Materiales y equipos

Para la presente investigación se requirió diferentes tipos de fuente de información base, materiales y equipos, las cuales se listan a continuación.

a) Cartografía

- 1 DEM ALOS Palsar de 12.5 m de resolución espacial.
- Carta nacional 24-j del MINEDU
- Información de los geoservidores del MINAM, INGEMMET.
- 3 Imágenes del satélite PeruSAT-1 de la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial del Perú.

b) Pluviometría y climatología

- 2 estaciones pluviométrica: Chosica y Santiago de Tuna.

c) Equipos

- 2 Equipos geodésicos receptores GNSS (Global Navigation Satelital System).
- 1 nivel de ingeniero.
- 1 wincha de 50 metros
- 1 receptor gps navegador.
- 1 laptop de séptima generación Intel Core i7.

d) Laboratorio de suelos

Para el estudio del suelo, se tomaron muestras en campo, las cuales fueron analizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

Los ensayos realizados fueron los siguientes:

- 2 Análisis para determinación de la densidad del suelo
- 2 Ensayos de granulometría del suelo
- 2 Ensayos de Corte Directo

e) Materiales

- Útiles de escritorio: libretas, lapiceros, papelería, marcadores.

f) Softwares

- RAMMS: Debris Flow.
- PCI Geomatica Professional.
- ArcGIS 10.4.
- Microsoft Office: Word, Excel y Power Point.
- Adobe Acrobat.
- Google Earth Pro.
- Hydrognomon.

3.3 Metodología

A continuación, se presenta el desarrollo de la metodología empleada para el desarrollo de la presente tesis.

3.3.1 Cartografía

La cartografía es la representación del relieve a través de mapas, para lo cual se utilizó diversas fuentes de información.

La primera fuente de información cartográfica fueron los modelos digitales de elevaciones que son un tipo de ráster que representan la información de alturas del relieve terrestre; este ráster es una matriz de celdas con información del nivel de altura en cada celda, dichas celdas son representaciones de un espacio del territorio. Esta información se obtuvo de la recolección de datos del satélite de observación terrestre ALOS-PALSAR de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA). El cual tiene una resolución de 12.5 metros, lo cual es la de mayor resolución libre del mercado. Esta información se encuentra disponible en la web de Vertex, el cual es el portal de datos de la Instalación de Satélites de Alaska para imágenes de la Tierra con sensores remotos (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>). En la Figura 9 se observa el modelo digital de elevaciones ALOS-PALSAR.

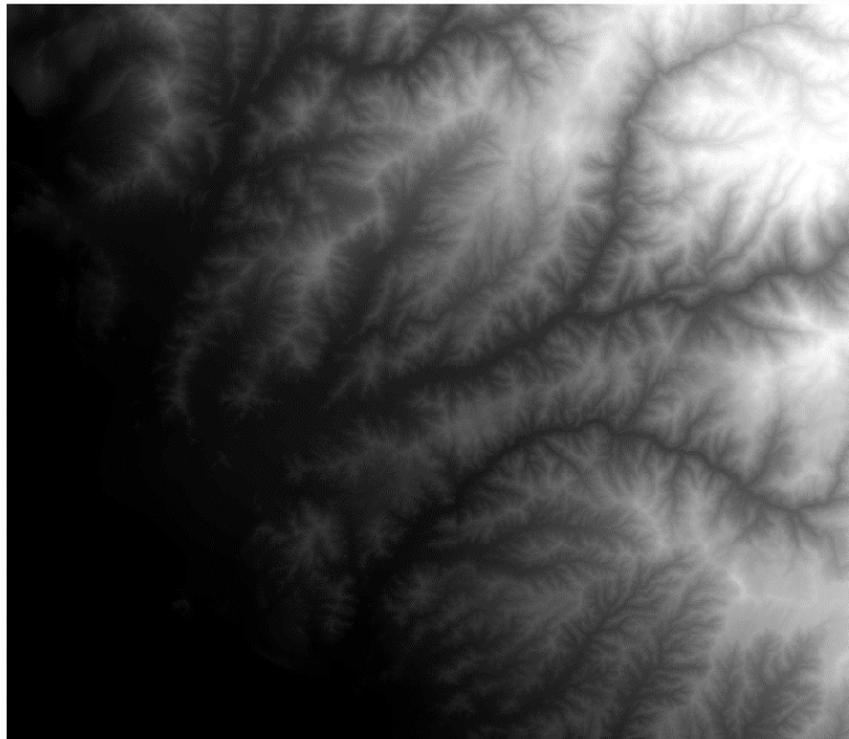


Figura 9 DEM Alos-Palsar

Fuente: Vertex

Asimismo, se descargaron las cartas nacionales 24j en formato shapefile, a una escala 1:100 000 de la página web del MINEDU (Ministerio de Educación del Perú).

Por último, se utilizó la información de los geoservidores del MINAM, INGEMMET.

3.3.2 Geodesia

Para la corrección de las imágenes satelitales se tomaron cuatro puntos de control geodésicos, lo cual se realizó con los receptores GNSS (Global Navigation Satelital System) integrados del laboratorio de Geomática de la facultad de Ingeniera Agrícola de la Universidad Nacional Agraria la Molina. A partir del cual se obtuvo cuatro puntos de control.

Tabla 3 Puntos de Control

Nombre	Coordenadas UTM WGS84 Zona 18 Sur		
	Norte	Este	Elevación (m)
HITO 1	8674730.986	310223.624	880.43
HITO 2	8674220.526	310814.611	1007.179
HITO 3	8676328.916	309743.095	713.305
HITO 4	8674422.802	310062.65	941.682

Fuente: Toma propia

Los puntos tomados tienen la proyección UTM Zona 18 Sur, con datum WGS84 y el geoide EGM2008-Perú 4, los resultados se presentan en la siguiente tabla.

En la siguiente figura se observa una fotografía con el equipo GNSS obteniendo el punto de control en la zona de estudio.



Figura 10 Toma de puntos de control con el receptor GNSS

Fuente: Toma propia

3.3.3 Imágenes satelitales PeruSAT

Las imágenes satelitales son productos obtenidos por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial, estos productos dependen del tipo de satélite, en el caso de la presente investigación se utilizaron tres imágenes del satélite PeruSAT. El satélite PeruSAT-1 es un satélite de observación terrestre de propiedad del gobierno peruano, el cual viene operando desde el año 2016 por la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA). Tiene una visión pancromática a 0.70 m y 2.8 m multiespectral.

Las imágenes usadas fueron captadas los días 05, 07 y 19 de febrero de 2017, las cuales son las más cercanas a la fecha del evento. A continuación, se muestra un recorte de una imagen satelital del satélite PeruSAT-1

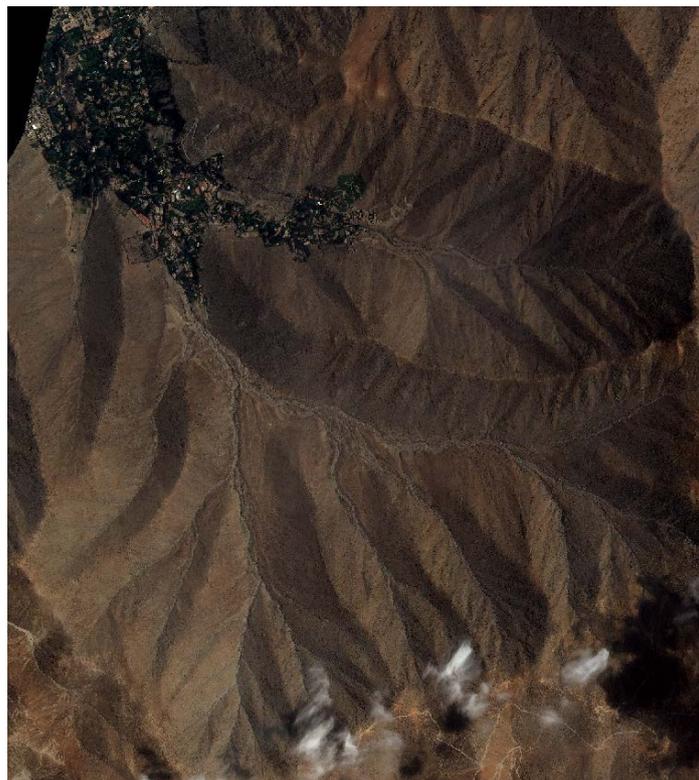


Figura 11 Imagen del satélite PeruSAT-1

Fuente: Imágenes de @CONIDA (2017), Distribución CONIDA, Republica de Perú, todos los derechos reservados.

3.3.4 Información pluviométrica y climática

La cuenca de estudio no cuenta con ninguna estación pluviométrica dentro de la cuenca, por lo cual se utilizó las estaciones Chosica y Santiago de Tuna, las cuales son las más próximas al área de estudio.

La información fue obtenida de SENAMHI y la disponibilidad de la información se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4 Disponibilidad de información

Estación	Parámetro	Periodo de registro	N° años
Chosica	Precipitación diaria	1964-2017	29
Santiago de Tuna	Precipitación diaria	1990-2017	53

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Delimitación de la zona de estudio

La zona de estudio, la Quebrada Los Cóndores, fue delimitada y procesada mediante el uso de la herramienta ArcMap, el cual es la aplicación central del software ArcGIS en su versión 10.4. La información de ingreso a dicho software fue el Modelo Digital de Elevaciones, producto del satélite ALOS-PALSAR, cuya resolución es de 12.5 m (detallada en el ítem dedicado a la información cartográfica).

Con el uso de dicha información se procedió a realizar la delimitación de la cuenca de estudio.

a) Corrección de vacíos de DEM

Se elimina las imperfecciones de elevaciones del terreno del ráster DEM con la función *fill* de la herramienta ArcMAP.

b) Dirección de flujo

Se genera un ráster con la información de la dirección de flujo, haciendo uso de la función *Flow direction* del software ArcMAP.

c) Acumulación de flujo

Se genera un ráster con la información de flujo acumulado, haciendo uso de la función *Flow accumulation* del software ArcMAP.

d) Construcción de la red de drenaje

Se genera un ráster con la información de la red de drenaje, haciendo uso de la función *Conditional (Con)* del software ArcMAP.

e) Puntos desfogue y delimitación

Creamos un shape con el punto de desfogue de nuestra cuenca, desde donde se delimita la cuenca.

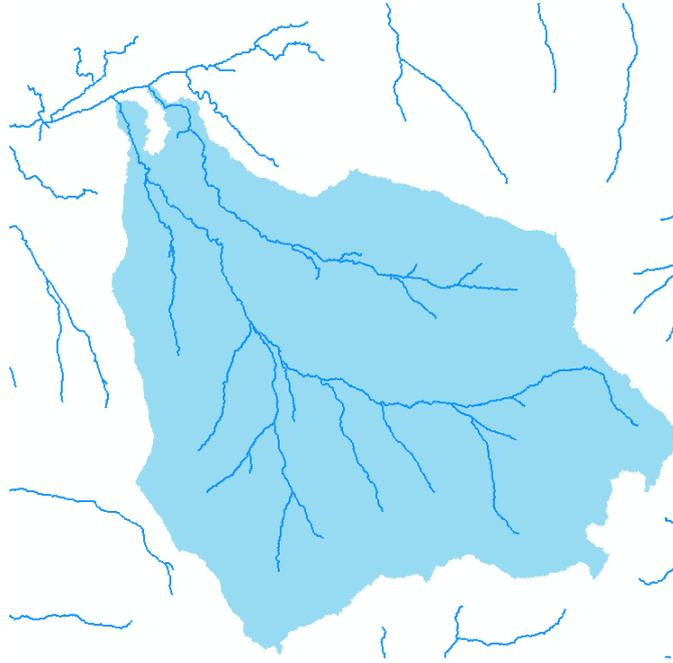


Figura 12 Cuenca delimitada

Fuente: Elaboración propia

3.3.6 Parámetros de cuenca

En este capítulo se determinan los parámetros de cuenca para caracterizar a la cuenca de estudio.

a) Área

El área de la cuenca 9.14 km^2 (913.78 Ha), lo cual según Ven Te Chow, la cuenca estudiada se define como Cuenca Muy Pequeña, por lo cual es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, y en la cual predominan las características físicas del suelo sobre las del cauce principal.

b) Perímetro

El perímetro de la cuenca es 13.96 km (13960.46 m).

c) Forma de la cuenca

Coefficiente de Compacidad o Índice de Gravelius (Cc)

El coeficiente de compacidad de la cuenca estudiada es 1.3 lo cual indica que la cuenca tiene una distribución medianamente simétrica, redondeada, por estar cerca a la unidad.

Relación de elongación (Re)

La cuenca tiene una longitud (L_c) de 5.84 kilómetros, por lo que la relación de elongación de la cuenca es de 0.58, lo cual indica un relieve no tan pronunciado ya que la relación está alejada de la unidad.

Factor de forma (Rf)

El factor de forma de la cuenca es de 0.31, lo cual muestra que se trata de una cuenca medianamente alargada

d) Curva hipsométrica

Para obtener la curva hipsométrica, se obtiene el área de entre curvas de nivel establecidas, en el caso de la cuenca estudiada se obtuvo las áreas entre curvas de nivel cada 100 metros, obteniéndose 11 intervalos (ver DEM reclasificado en la siguiente figura).

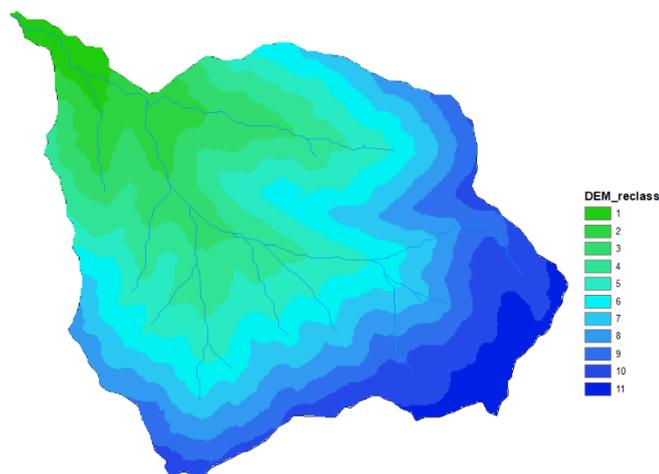


Figura 13 DEM reclasificado de Cuenca Quebrada Los Cóndores

Fuente: Elaboración propia

El cuadro de alturas se presenta en la siguiente tabla y la curva hipsométrica en la figura que le sigue.

Tabla 5 Altura entre curvas de nivel

Cotas (m.s.n.m.)			Área (km ²)	Área acum. (km ²)	% Acumulado	% Área entre curvas
Min	Max	Promedio				
726	800	763	0.21	9.14	100.00	2.26
801	900	851	0.49	8.93	97.74	5.38
901	1000	951	0.84	8.44	92.36	9.22
1001	1100	1051	1.18	7.60	83.14	12.91
1101	1200	1151	1.26	6.42	70.23	13.78
1201	1300	1251	1.21	5.16	56.44	13.28
1301	1400	1351	1.02	3.94	43.16	11.14
1401	1500	1451	0.91	2.93	32.02	9.93
1501	1600	1551	0.81	2.02	22.09	8.83
1601	1700	1651	0.83	1.21	13.26	9.03
1701	1783	1742	0.39	0.39	4.23	4.23

Fuente: Elaboración propia

A partir de la curva hipsométrica se determina también la elevación media de la cuenca, la cual equivale al 50% del área de la cuenca, el cual es 1256.95 m.s.n.m (el punto más bajo y más alto son de 726 y 1783 m.s.n.m. respectivamente)

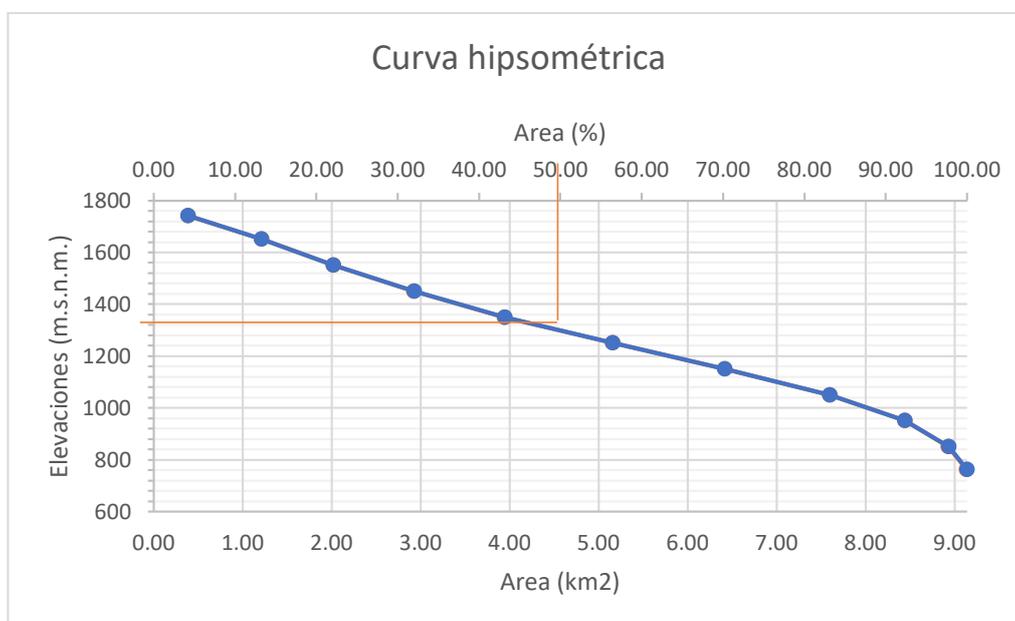


Figura 14 Curva Hipsométrica Cuenca Quebrada de Los Cóndores

Fuente: Elaboración propia

e) Pendiente

La pendiente se obtiene desde el DEM, generando una ráster de pendientes, lo cual muestra que la pendiente media de la cuenca es 26.4° (49.64 %) mostrando que la cuenca tiene una pendiente fuerte por lo cual es un factor determinante para la ocurrencia de avenidas.

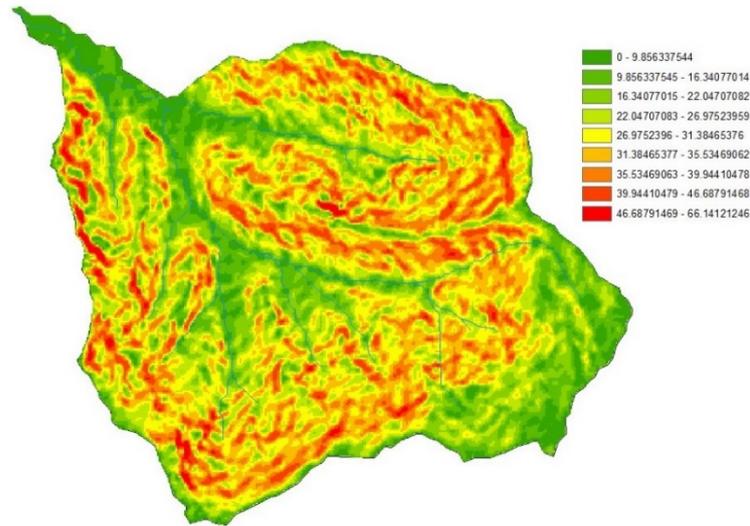


Figura 15 Ráster de pendientes Cuenca Quebrada Los Cóndores
Fuente: Elaboración propia

f) Pendientes de los cauces

Un dato importante para el análisis de flujo de detritos, es la pendiente de los cauces del río, ya que el flujo de detritos ocurre en zonas de alta pendiente el cual facilita su transporte.

En la siguiente figura se visualiza los cambios de las pendientes del cauce principal y secundarios, con la pendiente expresada en grados. La pendiente media de la cuenca es 26.4° .

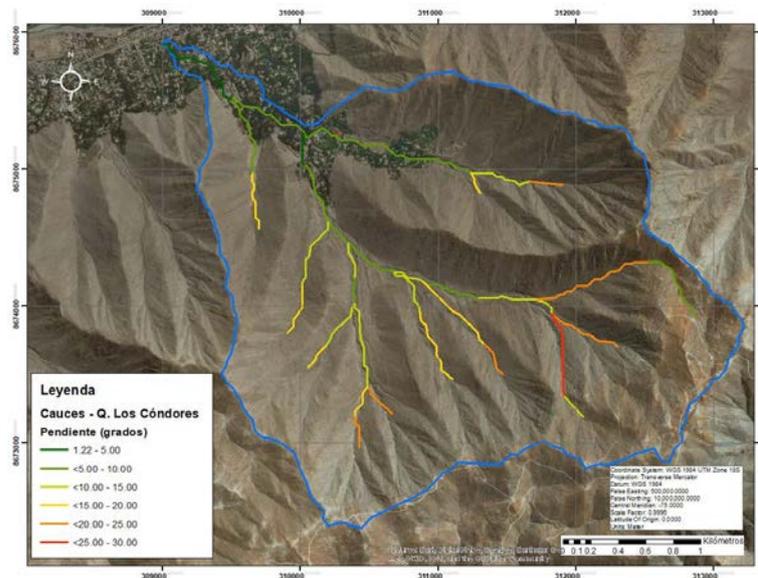


Figura 16 Pendiente del Cauce principal y secundarios de la Quebrada los Cóndores
Fuente: Elaboración propia

La siguiente figura es la representación del perfil longitudinal del cauce principal, donde se visualiza que el cauce principal está dividido en 4 zonas con diferentes pendientes, la parte alta tiene una pendiente promedio de 9 grados, la parte media alta 21.3 grados, la parte media 10.85 grados y la parte baja 4.3 grados.

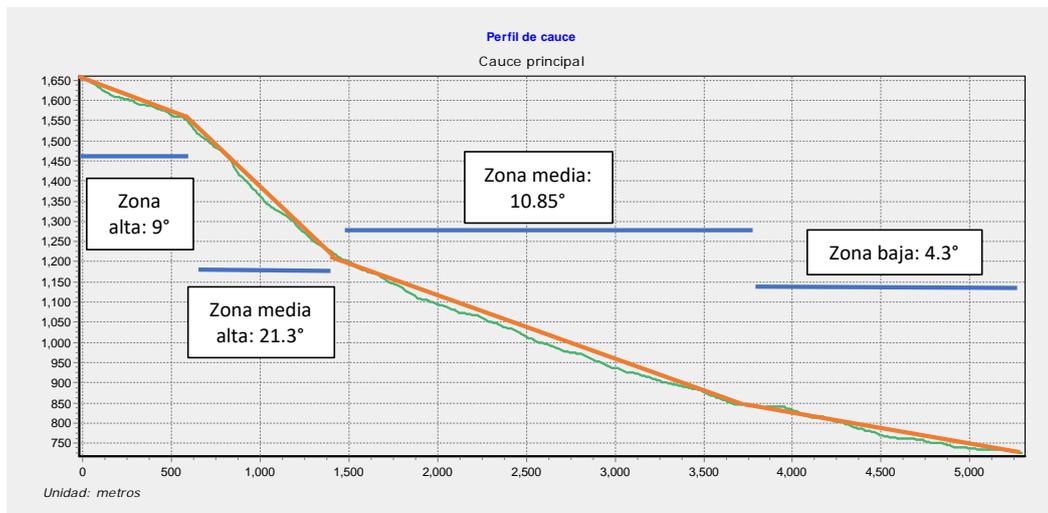


Figura 17 División por pendientes del cauce principal de la Quebrada los Cóndores

Fuente: Elaboración propia

3.3.7 Suelo

En el suelo de la zona de estudio, predominan las arenas, las cuales forman depósitos en la parte media de la cuenca como se observa en las siguientes fotografías del reconocimiento del área de estudio.



Figura 18 Fotografías del suelo en campo

Fuente: Tomas propias

Según el mapa de suelos del Perú (MINAGRI, 2009), la microcuenca presenta la unidad de suelo Leptosol lítico - Afloramiento Lítico (LPq - R1); que, son suelos poco desarrollados, y aparecen en zonas donde casi afloran las cuarcitas y pizarras del Ordovícico. Además, presentan un espesor inferior a 10 centímetros, como horizonte A (ócrico), y se asientan directamente sobre la roca dura (R) que limita su profundidad, por lo que no son suelos aptos para la agricultura, revisar el mapa en la siguiente figura.

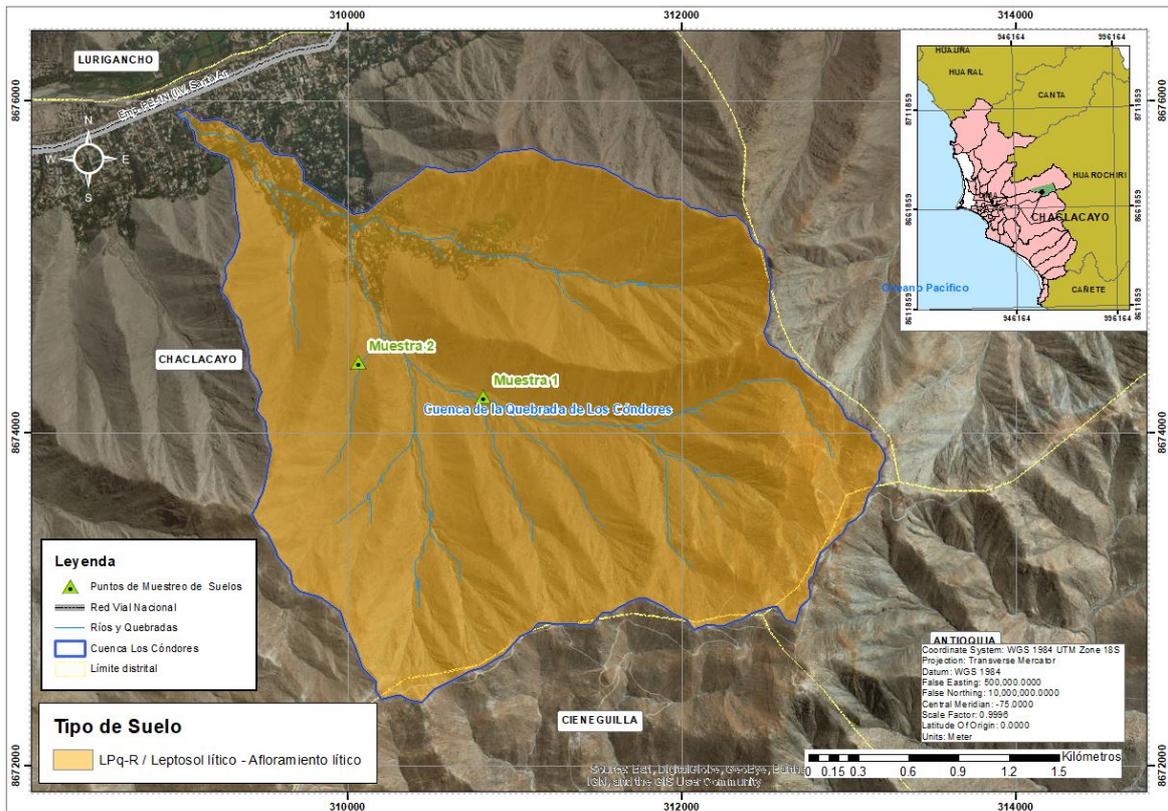


Figura 19 Tipo de Suelos Cuenca Quebrada Los Córdobos

Fuente: Elaboración propia

En el mapa de la figura anterior, se presentan los puntos de muestreo, denominados Muestra 1 (coordenadas WGS 84 18S Sur: 310813/ Norte: 8674223) y Muestra 2 (coordenadas WGS 84 18S Sur: 310064/ Norte: 8674425); los cuales representan depósitos de detritos ubicados en campo. En estos puntos, se tomaron muestras de suelo para determinar la densidad del suelo, y realizar los ensayos de granulometría y corte directo del suelo.

A continuación, se presentan los datos del ensayo de la granulometría del suelo para ambas muestras.

Tabla 6 Datos del ensayo de granulometría

MALLA	Abertura (mm)	% de suelo que pasa	
		Muestra 1	Muestra 2
Nº4	4.75	100.000	100.000
10	2	77.567	72.505
20	0.84	53.884	39.032
40	0.42	34.780	20.075
60	0.25	21.576	10.714
140	0.105	4.930	2.228
200	0.074	0.604	0.246

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados se obtiene que: i) el suelo está conformado por arenas; ii) el porcentaje que pasa la malla N° 200 es menor al 1 %, la malla N° 200 representa el límite de separación entre la arena y el limo + arcillas (FAO, 2006), esta es la razón de la baja cohesión presente en el suelo de la zona de estudio. En la siguiente figura, se presenta las curvas granulométricas de las dos muestras de suelo tomadas en campo.

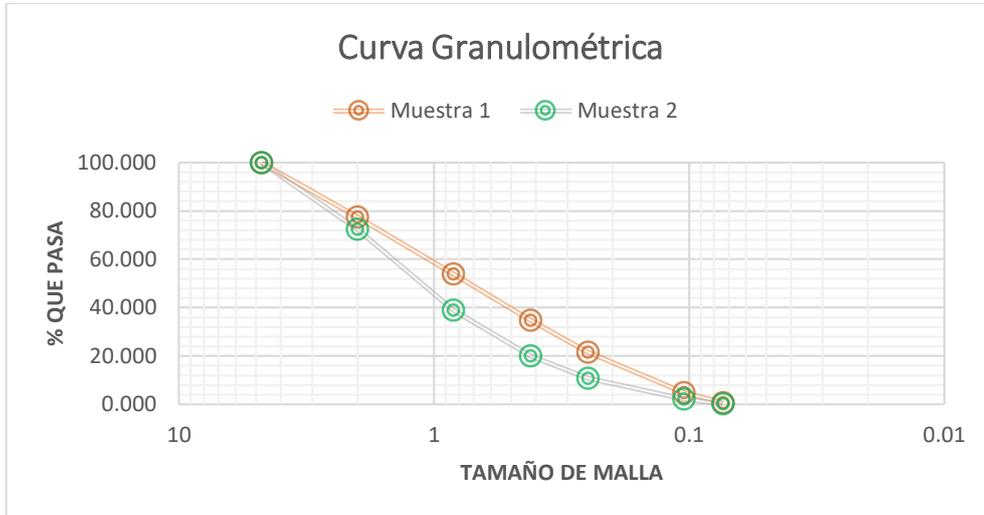


Figura 20 Curvas Granulométricas
Fuente: Elaboración propia

Acerca de los resultados de los otros análisis realizados, confirman que las capas superiores son suelo fino con predominancia de arenas, puesto que el ensayo de corte directo mostró que la fricción arroja los valores de 0.2 y 0.13 evidenciando un suelo poco cohesivo. Además, las dos muestras arrojan densidades promedio de 1.73 y 1.7 g/cm³.



Figura 21 Fotografías del desarrollo de los ensayos de suelo en el laboratorio de mecánica de suelos UNALM

Fuente: Tomas propia

3.3.8 Geología

El mapa geológico del Perú (INGEMMET, 2009), muestra que la geología de la zona de estudio corresponde a la Super Unidad Santa Rosa, sub unidad en cuerpo oscuro (diorita tonalita), con la simbología correspondiente a Ks-tdi-sr (Super Unidad Santa Rosa, tonalita-diorita) y un depósito aluvial.

Palacios et. Al., 1992, explican que esta unidad se reconoce por la afloración de rocas intrusivas, en una variación de intrusivos de tonalidad/diorita.

Las vertientes rocosas muestran una variación de pendiente en sus laderas como resultado del grado de meteorización que presentan; algunas veces formando suelos arenoso – limo y formas redondeadas en las cimas, así como también zonas fuertemente inclinadas a abruptas. El substrato además presenta muchas zonas con agrietamientos o fracturamientos, originando grandes bloques; pero en general suelen presentar un suelo arenoso.

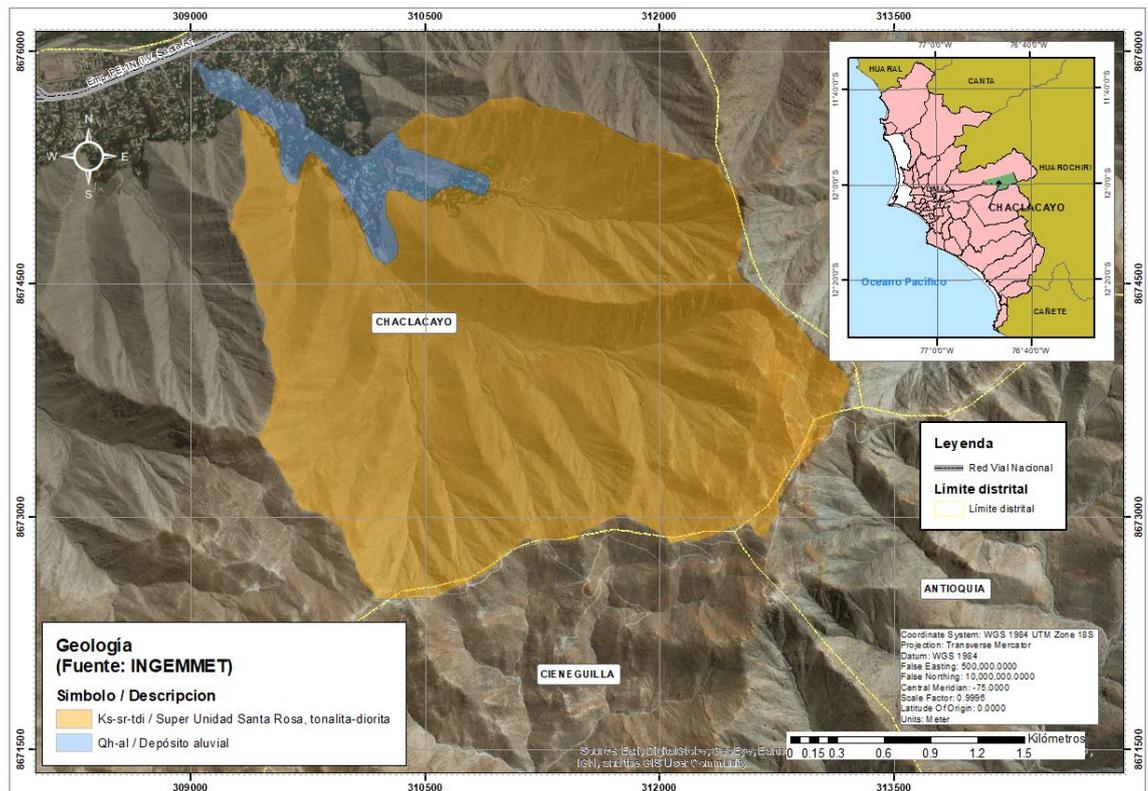


Figura 22 Zonas geológicas de la cuenca Los Cóndores

Fuente: Elaboración propia

3.3.9 Geomorfología

Núñez et al. (2015) en su evaluación geodinámica de los flujos de detritos que incluyen la quebrada Los Cóndores indican que la zona de estudio está comprendida dentro de una cadena montañosa intrusiva de dirección NE-SO, la cuenca de la quebrada Los Cóndores tiene elevaciones desde los 726 msnm hasta los 1783 msnm.

Las montañas y colinas han sido modeladas en rocas intrusivas alineadas con una dirección predominante NO-SE. Las crestas de los cerros presentan vertientes pronunciadas entre los 25° a 40° (ver mapa de pendientes).

En la Figura VI-18, se muestra la existencia de dos geoformas en la zona de estudio, la primera es la Geoforma de origen denuncional (Montañas modeladas en rocas intrusivas) y la segunda es la Geoforma de origen fluvio-aluvial (Vertiente o pie de monte aluvio-torrencial).

Geoforma de origen denuncional

Resultan del efecto de la morfodinámica que degrada los relieves iniciales por procesos exógenos que conducen a la modificación parcial o total de los paisajes a través del tiempo geológico y bajo condiciones climáticas cambiantes (Villota, 2005). El área estudiada continua con las mismas características propias de las cuencas de la zona, con montañas y colinas modeladas en rocas intrusivas alineadas con una dirección predominante NO-SE.



Figura 23 Imagen de la cuenca aguas abajo, donde se visualiza la pendiente del terreno y la gran cantidad de material suelto en la ladera. Parte media alta de la cuenca Los Cóndores.

Geoforma de origen fluvio-aluvial

Esta forma del relieve es que se presenta en las partes bajas de las cuencas, modeladas por los flujos de detritos, la desembocadura de las quebradas que se activan en época de lluvias; en la zona de estudio, aquí se encuentran localizada las viviendas, por lo cual esta geoforma va siendo condicionada por las actividades del hombre, aunque los eventos naturales generan riesgos en esta zona de la cuenca.

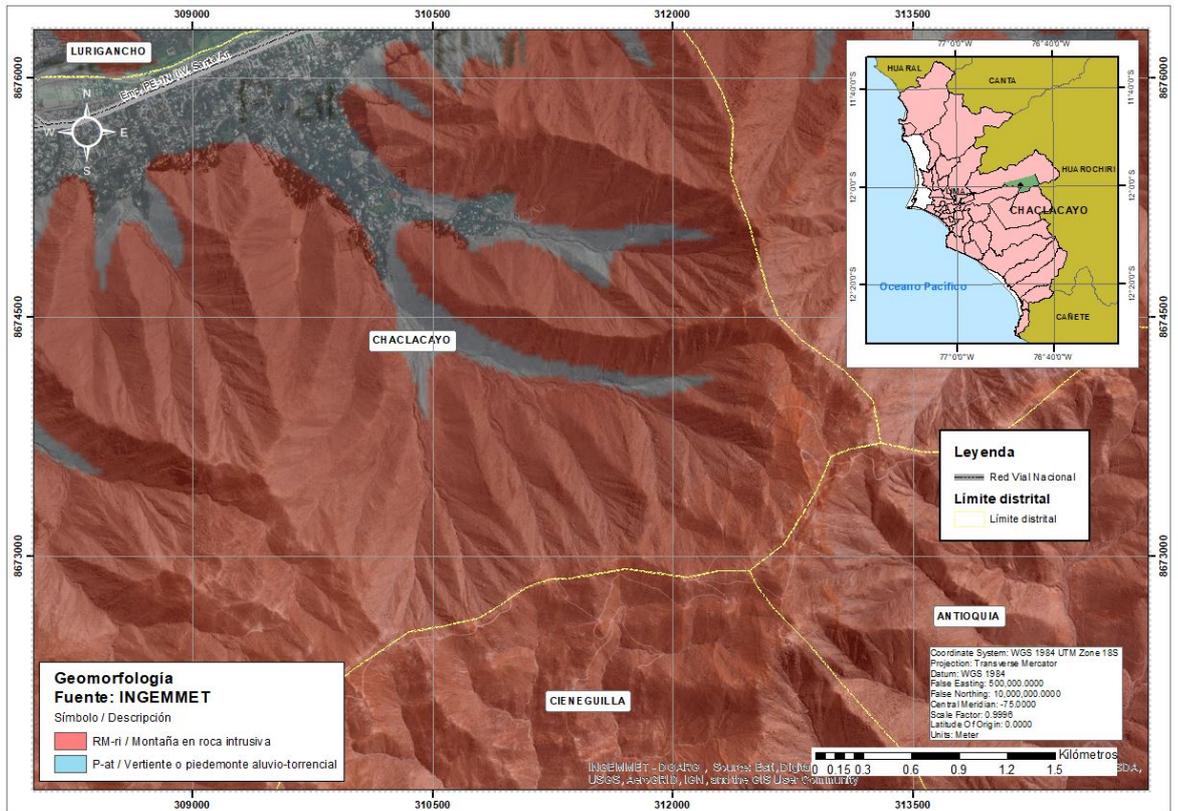


Figura 24 Zonas geológicas de la cuenca Los Córdores

Fuente: Elaboración propia

3.4 Evaluación geodinámica del flujo de detritos

Morfología y morfometría: Esta microcuenca presenta cuatro quebradas definidas: Q1) Una superior, cuyas nacientes están alineadas este-oeste y conforman parte de los cerros de Chaclacayo. Aquí es donde se inician los eventos de flujo de detritos que generan mayor riesgo, pues es la cuenca que ocupa las zonas con mayor altitud y pendiente, además de mayor área que pueda recepcionar las lluvias. Q2) Es más pequeña y cerrada, elíptica y con un cauce principal que confluye al cauce principal por la derecha. Q3) Es una cuenca mucho más pequeña que las primeras, tiene una forma alargada. Q4) Más pequeña, colindante a la segunda.

Las dos primeras cuencas identificadas son donde se inician los flujos de detritos, y son las que se analizan en la presente investigación, ya que las otras dos no tienen mucha área de almacenamiento de agua proveniente de las lluvias, por lo que hay poco arrastre de partículas.

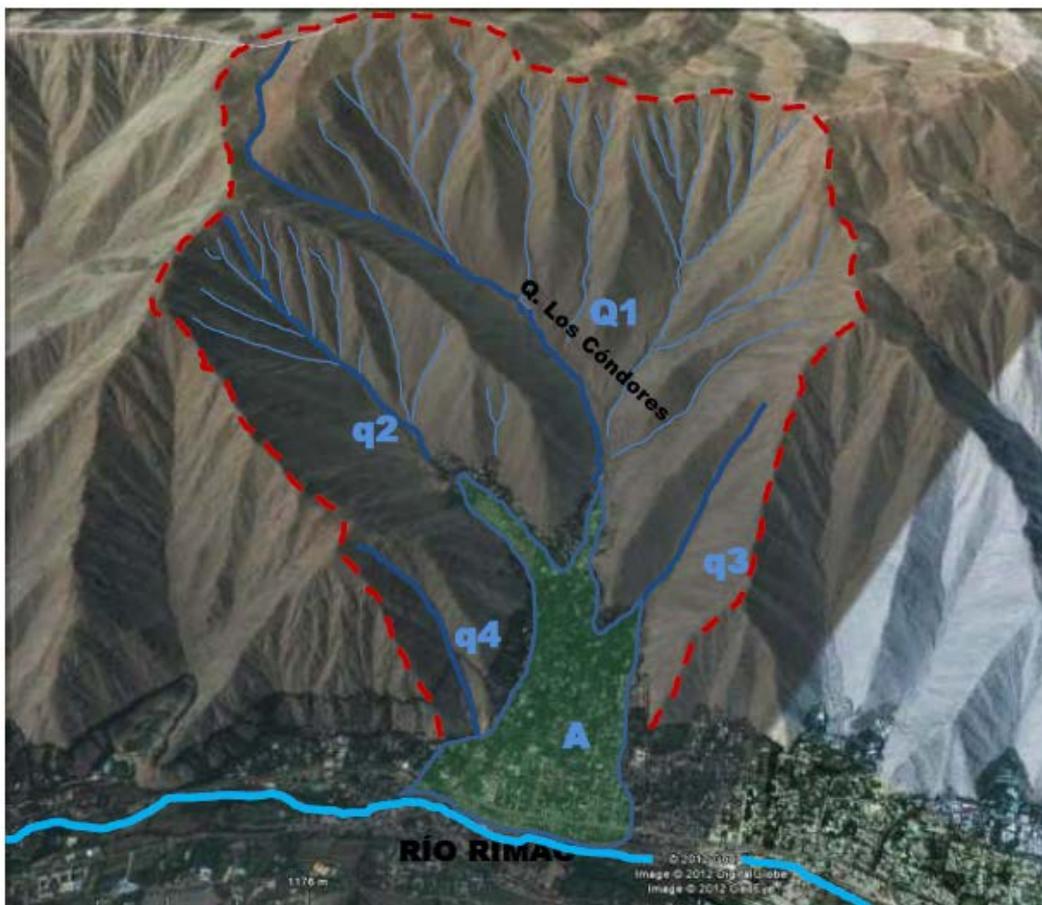


Figura 25 Quebradas presentes en la Cuenca Los Cóndores

Fuente: INGEMMET, 2011

Tipos de rocas y suelos: Del apartado dedicado al tema de suelos, se puede desprender que en la zona predominan las rocas intrusivas en parte fracturadas y alteradas. Además de que el suelo sigue sometido a un proceso de lavado de sus capas superiores, el cual es componente principal del flujo de detritos, en la siguiente figura. Además, los estudios realizados a los suelos, indican que las capas superiores son suelo fino con predominancia de arenas.



Figura 26 Vista del proceso de erosión de suelos

Fuente: Toma propia, 2018

Geodinámica: La cuenca media superior muestra depósitos de huaycos antiguos con grandes bloques que rellenan el cauce principal. La parte alta de la cuenca ha sido lavada por las lluvias intensas, por lo cual el agua llega con mayor energía a la parte media de la cuenca, donde se observa las capas de suelo fino los cuales, al ser sometidas a la fuerza del agua, cede y da paso a los flujos de detritos conocidos en las épocas de verano, desde enero hasta marzo. Estos eventos fluyen hasta la parte baja, donde el cauce ya ha sido alterado por el hombre, donde se construye canales que muchas veces no abarcan el volumen del flujo proveniente de las partes altas y medias de la cuenca.

3.5 Hidrología y climatología

El comportamiento hidrológico de la zona es el mismo que domina en las cuencas de la costa peruana, con precipitaciones estacionales entre los meses de noviembre y abril. La quebrada Los Cóndores se encuentra en la parte media baja de la cuenca del Río Rímac, que tiene sus orígenes en una cadena de montañas que tiene una dirección Noreste-Suroeste (NE-SE). La red hidrográfica, por donde circula el escurrimiento superficial de la cuenca tiene un rumbo Sureste-Noroeste (SE-NO) con dirección al río Rímac.

En este capítulo se presentan los temas desarrollados referentes al análisis pluviométrico, la generación de las precipitaciones de 24 horas para diferentes periodos de retorno y la generación de volúmenes de agua que aportan al flujo de detritos para diferentes precipitaciones máximas de 24 horas.

3.5.1 Pluviometría

La información pluviométrica existente en la cuenca Rímac, ha permitido establecer que las precipitaciones se concentran durante los meses de noviembre y abril, y el periodo de sequías ocurre entre los meses de junio y octubre.

Ya que no hay estaciones pluviométricas dentro de la zona de estudio, se utilizaron dos de las estaciones más cercanas, las cuales son las estaciones de Chosica y Santiago de Tuna, ambas son manejadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Se utilizan estas estaciones por las siguientes razones, la estación Chosica por ser la más cercana a la Cuenca y la estación Santiago de Tuna por compartir el mismo comportamiento pluviométrico con la zona de estudio pues se localiza en la misma cadena de montañas donde nace la cuenca de la quebrada Los Cóndores.

En el siguiente mapa, en la Figura 27, se presenta la ubicación de las estaciones Chosica y Santiago de Tuna en función a la ubicación de la quebrada Los Cóndores, además se muestra una línea de color naranja que simula el recorrido de la cadena de montañas a partir de la cual nacen las quebradas que aportan al río Rímac, dentro de las cuales se encuentra la quebrada Los Cóndores.

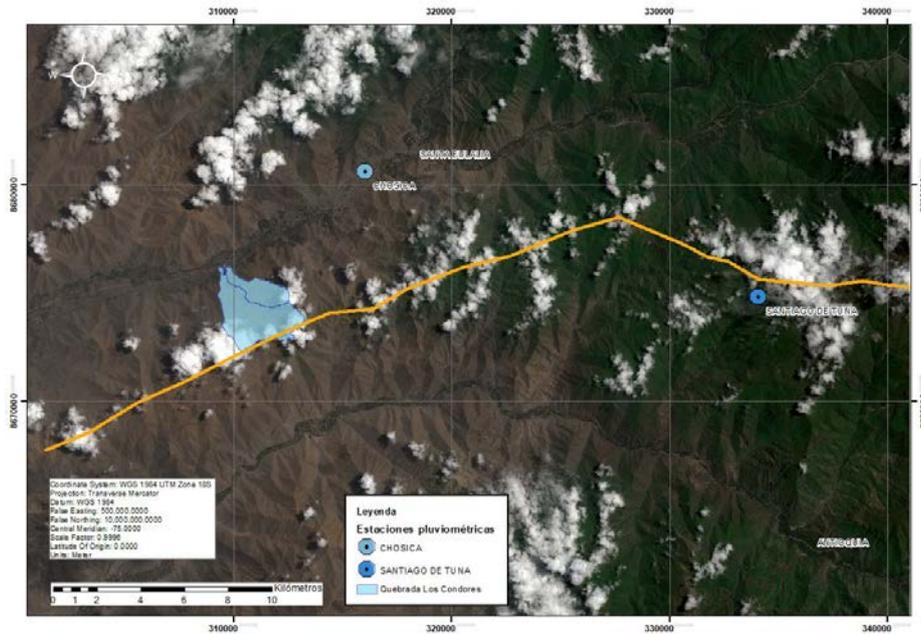


Figura 27 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio
Fuente: Elaboración propia

Durante las lluvias del verano del año 2017, se distingue dos situaciones claras, la primera es que se presentaron precipitaciones intensas de mayor valor que las que se presentó el día 16 de enero, día de ocurrencia del evento; la segunda es que hubo precipitaciones días previos a la ocurrencia del evento del 16 de enero como se puede observar en la siguiente figura que muestra las series de las precipitaciones en ambas estaciones de estudio.

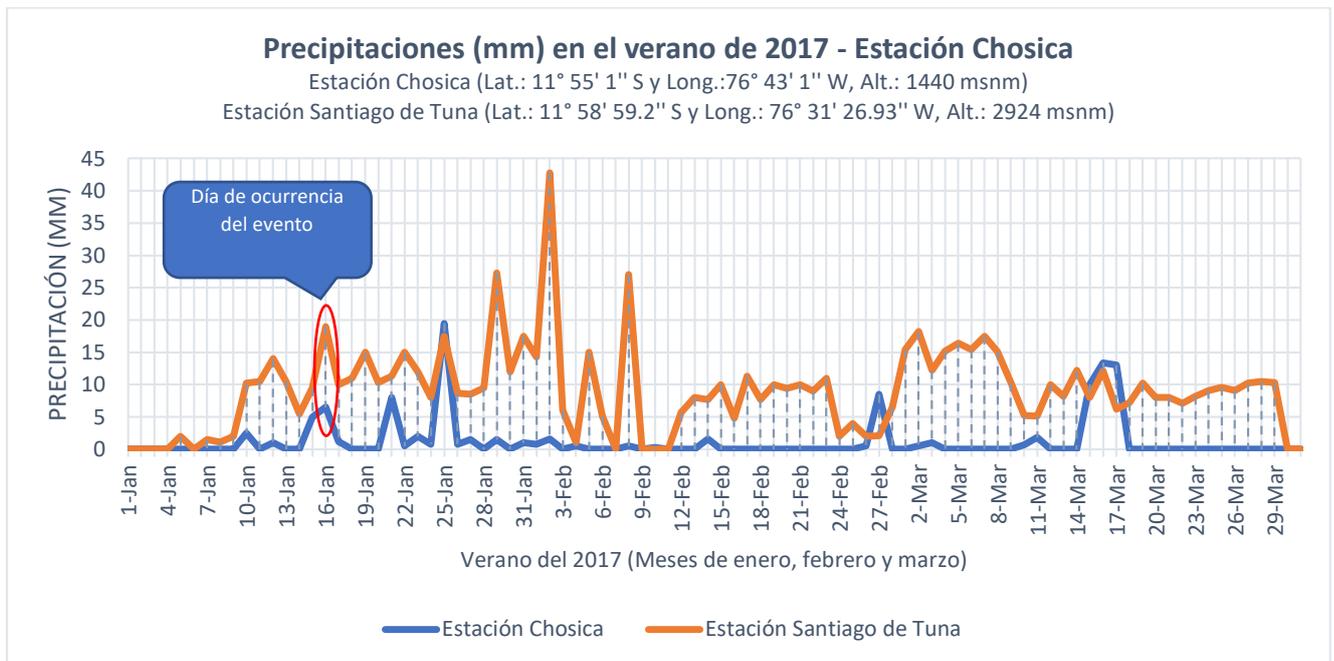


Figura 28 Precipitación de la estación Chosica en el verano del 2017

Fuente: Elaboración propia, datos de SENAMHI

3.5.2 Análisis de precipitaciones máximas en 24 horas

Para el análisis de precipitaciones máximas en 24 horas, se han seleccionado las precipitaciones máximas de cada mes, y luego se generó la serie de precipitaciones máximas anuales a partir de la información diaria de las estaciones de estudio, Chosica y Santiago de Tuna, a continuación, se presenta los análisis para dichas estaciones.

Estación Chosica

Los valores de las precipitaciones máximos mensuales y anuales se muestran en la siguiente tabla, elaborada a partir de la información diaria de la estación Chosica.

Tabla 7 Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) – Estación Chosica

ESTACIÓN: CHOSICA		ALTITUD: 906 m.s.n.m.		DPTO: LIMA									
CUENCA: RÍMAC		LONGITUD: 76°41'23.8"		PROV: LIMA									
PROPIETARIO: SENAMHI/202906/HLG		LATITUD: 11°55'48.5"		DIST: CHACLACAYO									
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pp max anual
1990	2.80	0	2.2	0	0.8	0.1	0	0	0	0.2	1	3.2	3.2
1991	0.20	2	3.7	0.7	0.3	0	0	0	0	1	0	0.5	3.7
1992	0.30	2.3	0.6	0.3	0.8	0	0	0.4	0	0	0	1	2.3
1993	0.00	0.8	1.8	2.4	0	0	0	0	0.2	0	1.2	1.2	2.4
1994	16.00	2.5	3	1.8	0.4	0	0	0	1	0	0.4	1.5	16
1995	3.00	0.5	2.5	1.2	2.2	0	0	0	0.5	0.3	1.4	0	3
1996	5.00	5	5.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	5.8
1997	0.50	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5
1998	13.20	6.5	2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5
1999	3.50	6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.5
2000	6.00	4.5	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
2001	5.20	5	3	1	0	0	0	0	0	0	0.6	0	5.2
2002	1.00	30.7	1	0	0	0	0.6	0	0.5	0	0	0	30.7
2003	1.50	2.5	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	2.8	2.8
2004	0.80	0.5	0.7	0.5	0	0	0	0	0	0	0	1.6	1.6
2005	1.20	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1.2
2006	5.60	4	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5.6
2007	2.20	3	1.8	7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	7.7
2008	3.60	4	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
2009	3.00	6.6	8	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	8
2010	0.00	0.3	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8
2011	4.70	5.7	1	1.1	0	0	0	0	0	0	2.5	5.1	5.7
2012	6.40	9.6	2.1	37	0	0	0	0	0	1	0.5		37
2013	0.00	2.3	2.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	2.3
2014	2.10	1.5	6.2	0.5	0	0	0	0	0	0	0	1.4	6.2
2015	1.20	9.5	18.3	1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	18.3
2016	1.00	5.3	0.5	4	0	0	0	0	0	0	0	0.2	5.3
2017	19.50	8.5	13.4	0	0	0	0	0	0	0	0		19.5
Nº Datos	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28	26	28
Promedio	3.91	4.66	3.30	2.19	0.16	0.00	0.02	0.01	0.08	0.09	0.27	0.90	7.78
Desv. Est.	4.76	5.73	4.01	6.89	0.45	0.02	0.11	0.07	0.22	0.26	0.58	1.28	8.66
Máxima	19.50	30.70	18.30	37.00	2.20	0.10	0.60	0.40	1.00	1.00	2.50	5.10	37.00
Mínima	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50

Los datos de color azul fueron completados
Fuente: ANA y SENAMHI

En el registro de la estación Chosica, se aprecia que la precipitación máxima histórica registrada fue de 37 mm que ocurrió el día 4 del mes de abril del 2012, y la precipitación máxima del verano del 2017 ocurrió el día 25 de enero con una intensidad de 19.5 mm.

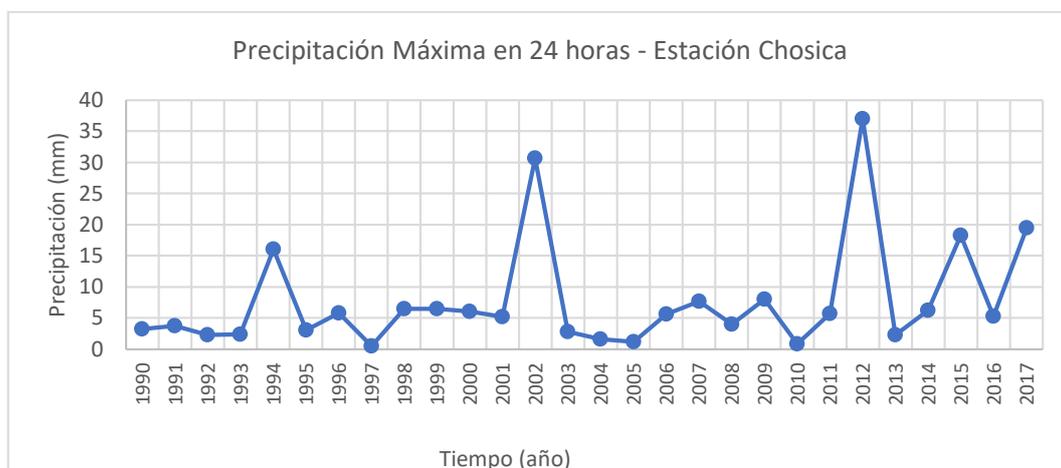


Figura 29 Serie anual de Precipitación Máxima en 24 horas - Estación Chosica
Fuente: Elaboración propia

Estación Santiago de Tuna

Los valores de las precipitaciones máximos mensuales y anuales se muestran en la siguiente tabla, elaborada a partir de la información diaria de la estación Santiago de Tuna.

Tabla 8 Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) – Estación Santiago de Tuna

ESTACIÓN:		SANTIAGO DE TUNA		ALTITUD:		2924 m.s.n.m.		DPTO:		LIMA			
CUENCA:		RÍMAC		LONGITUD:		76° 31' 26.93"		PROV:		LIMA			
PROPIETARIO:		SENAMHI		LATITUD:		11° 58' 59.2"		DIST:		SANTIAGO DE TUNA			
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Pp máx anual
1964	2.5	6.45	4	4	0	0	0	0	0	0	3	5	6.4
1965	8.89	15.96	26.7	7.5	1.3	0	0.3	0	0.3	9.3	0.2	0.2	26.7
1966	11.5	9.3	42	2.1	4.1	0	0	0	0	14.2	0.1	5	42
1967	33.4	78.1	23.4	3.1	1	0	0.8	0	0	5.6	3.4	13.2	78.1
1968	0.1	5.2	7.8	13.5	5.1	0.2	0	0	0.1	1.3	2.1	3	13.5
1969	8.4	25.1	20.2	2.2	0	0	0	0	0	6.3	3.2	10.5	25.1
1970	89.9	81	5.8	5.1	0	0	0	0	4.5	4	8	5.9	89.9
1971	12.5	36.2	22.2	3.1	0	0	0	0	0	0.2	0	6.3	36.2
1972	13.9	35.7	37	0	0	0	0	0	0	1	0	4.7	37
1973	17.8	17	49.7	6	0	0	0	0	3.1	2	2.9	5.2	49.7
1974	3.3	23.9	27.7	0	0	0	0	0	0	0	2.7	10.7	27.7
1975	9.6	11	24	0	0	0	0	0	0	0	0	18.3	24
1976	16	20.5	10.1	2.1	0	0	0	0	0	0	0	1.1	20.5
1977	9.8	40	42.1	7.1	0	0	0	0	0	0	4.3	17.4	42.1
1978	8.3	7.1	25.3	0	0	0	0	0	0	2.1	0.8	2.7	25.3
1979	1.3	3.1	31.1	2.1	0	0	0	0	0	0	0	1	31.1
1980	10.8	8.5	20.6	13.3	0	0	0	0	0	3.5	2.1	2.1	20.6
1981	18.7	27.4	46.5	4.1	0.4	0	0	0	0	0	1.7	18.3	46.5
1982	9.3	35.8	15.8	11.8	0	0	0.7	0.9	0.46	0.4	9.1	0	35.8
1983	22.4	19.1	46.3	1.8	3.1	0	0	0	0	0.3	5.8	28.1	46.3
1984	27.1	38.6	23.4	3.1	0.1	0	0	0	0	0.8	11.7	14.3	38.6
1985	7.4	9	14.6	2.1	3.3	0	0	0.2	0	0	9.2	18.6	18.6
1986	16.5	30.7	27.9	9.3	0	0	0	0	0	0	0	26.4	30.7
1987	12	8.1	22	5.54	0	0	0	0	0	0	0.4	20.3	22
1988	28.2	17.1	10	10.4	4.1	0	0	0	0	2.1	0	24.5	28.2
1989	33.5	31.9	31.6	16.1	0	0	0	0	0	4.1	0	2.3	33.5
1990	4.4	3.7	14	0.3	0	0	0	0	0	2.1	8.7	36.8	36.8
1991	14	2.3	33.2	2	0.3	0	0	0	0	2.3	20.5	0.4	33.2
1992	5.3	3	5.8	0	0	0	0	0.8	0	0	0	3.3	5.8
1993	4	38.7	13.1	9.5	0.8	0	0	0	0	0	0.2	12.6	38.7
1994	12.5	10	12.4	3.1	1.2	0	0	0	0	0	4.2	14.9	14.9
1995	8.1	8.5	12.2	4.9	0	0	0	0	0	1.9	8.2	7.8	12.2
1996	12.1	15.7	10.2	8.2	3.2	0	0	0	0	0	1.4	3.2	15.7
1997	5.7	12.3	4.3	8	0	0	0	1.5	7	5	5.7	15.1	15.1
1998	13	30.2	20.5	3.2	0.8	0	0	0	0	0	1.5	15.6	30.2
1999	7.5	19.6	11	6.5	3.2	0	0	0	0.6	4.1	6.5	5.5	19.6
2000	8.6	17.9	13.8	9.4	0	0	0	0	1.4	3.9	4	4.2	17.9
2001	12.6	13.5	10.5	10.4	0	0	0	0	0	0.6	4.8	1	13.5
2002	5	15.4	10.5	6.5	4.3	0	0	0	0	8.6	8.7	6.2	15.4
2003	6.8	8	6.8	0	0	0	2.8	0	0	1.7	0.7	14	14
2004	4	11.7	7.5	6.7	0	0	0	0	1.2	0.4	2	9.1	11.7
2005	7.3	14.3	13.10	1.8	0	0	0	0	0	0.92	0	11.7	14.3
2006	15.1	12.5	11	14	0.6	0	0	0	0.34	0.8	0	7	15.1
2007	5.7	9.5	10.5	9.3	0	0	0	0	0	1.2	6.4	10.2	10.5
2008	8	30	30.8	13.4	0	0	0	0.12	0.45	2.16	4.54	11.74	30.8
2009	14.3	35	38	16.5	0.4	0	0	0	0	6.5	2.5	5.5	38
2010	9	7	11	11.1	0	0	0	0	1	0	2.6	4	11.1
2011	11.5	13.8	9.5	3.5	0	0	3.2	0	0	0	6.3	3	13.8
2012	17.5	31	13.5	22.5	2.8	0	0	0	1.5	7.5	3.6	9.2	31
2013	5	35.6	12	1.7	4.2	0	0	0	0	0	2.1	1.5	35.6
2014	6.7	12.8	23.7	1.2	0	0	0	0	0	0	12.2	8	23.7
2015	15.4	17.2	37	5.5	0	0	0	0	0	2.6	1.5	1.5	37
2016	8.8	24	13.3	12	0	0	0	0	0	0	0	4	24
2017	27.3	42.8	18.2	0	0	0	0	0	0	0	3	0	42.8
N° Datos	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	
Promedio	13.86	21.07	20.10	6.05	0.82	0.00	0.14	0.07	0.41	2.03	3.57	9.11	
Desv. Est.	12.91	16.09	11.98	5.12	1.46	0.03	0.58	0.26	1.20	2.92	4.00	7.99	
Máxima	89.9	81	49.7	22.5	5.1	0.2	3.2	1.5	7	14.2	20.5	36.8	
Mínima	0.10	2.30	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Los datos de color azul fueron completados

Fuente: ANA y SENAMHI

En el registro de la estación Santiago de Tuna, se aprecia que la precipitación máxima histórica registrada fue de 89.9 mm que ocurrió el día 15 de enero de 1970, y la precipitación máxima del verano del 2017 ocurrió el día 02 de febrero con una intensidad de 42.8 mm.

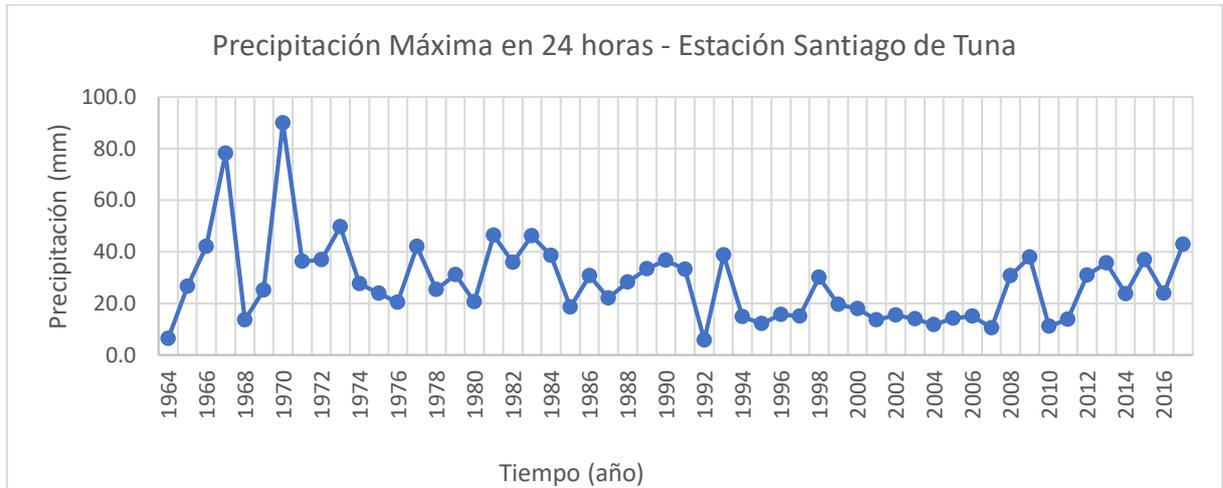


Figura 30 Serie anual de Precipitación Máxima en 24 horas - Estación Chosica
Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Generación de precipitaciones máximas probables de 24 horas

En este apartado se presenta los análisis de precipitaciones máximas a través de análisis estadísticos a las series históricas de las precipitaciones máximas de 24 horas para determinar los valores de lluvias a diferentes periodos de retorno en ambas estaciones para luego generar una transposición de las tormentas relacionando la precipitación-altura.

Este análisis fue efectuado con el software Hydrognomon, el cual es usado en el análisis de series de tiempo, mediante las funciones de distribución de probabilidades usados en la hidrología.

a) Prueba de bondad de ajuste

Con la información disponible de los registros anuales de precipitación máxima en 24 horas, se determinó las distribuciones de ajuste que presentan una mejor correlacion para cada estación de registro. Esto se logra mediante el test de Kolmogorov-Smirnov

Estación Chosica

En la estación Chosica se determinó que se usará las distribuciones Log Normal (ajuste al 72.29 %), Log Pearson III (ajuste al 85.28 %) y GEV-Max / L-Moments (ajuste al 95.13 %), en la Figura 31 se presenta los resultados obtenidos de Hydrognomon para la serie de la estación Chosica, en la cual se evaluó todas las distribuciones más usadas en este tipo de análisis.

Statistics					
File Edit View Options Forecasts P&C Intervals Parameters MLE Tests					
Distribution functions plots Histogram - Density functions plots Parameter values - Forecasts					
Kolmogorov-Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	REJECT	REJECT	1.72104%	0.28309
Normal (L-Moments)	ACCEPT	REJECT	REJECT	1.18270%	0.29437
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	72.2857%	0.12265
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	31.7587%	0.17276
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	46.8989%	0.15186
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.8125%	0.15448
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	57.0354%	0.13985
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	56.0206%	0.14101
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	85.2805%	0.10668
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	12.0810%	0.21555
EV2-Max	REJECT	REJECT	REJECT	0.93263%	0.30129
EV1-Min (Gumbel)	REJECT	REJECT	REJECT	0.13314%	0.35310
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64.0259%	0.13195
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.9418%	0.18630
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	55.7628%	0.14131
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51.9747%	0.14573
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.1343%	0.08956
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.5626%	0.11285
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.12774%	0.22647
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.5555%	0.15481
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0.09778%	0.36064
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	54.6047%	0.14265
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	71.7270%	0.12329
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	26.8067%	0.18101
GEV-Min (kappa specified)	REJECT	REJECT	REJECT	0.55746%	0.31580
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.9028%	0.18637
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	REJECT	REJECT	REJECT	0.40991%	0.32416

Figura 31 Test de Kolmogorov-Smirnov
Fuente: Hydrognomon

Estación Santiago de Tuna

En la estación Santiago de Tuna se determinó que se usará las distribuciones Gamma (ajuste al 97.30%), GEV-Min (L-Moments) (ajuste al 95.17%) y EV3-Min (Weibull, L-Moments) (ajuste al 92.80%), en la Figura 32 se presenta los resultados obtenidos de Hydrognomon para la serie de la estación Santiago de Tuna, en la cual se evaluó todas las distribuciones más usadas en este tipo de análisis.

Statistics					
File Edit View Options Forecasts P&C Intervals Parameters MLE Tests					
Distribution functions plots		Histogram - Density functions plots		Parameter values - Forecasts	
Kolmogorov-Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	77.5442%	0.09161
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	76.0599%	0.09290
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	70.3209%	0.09774
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	79.0374%	0.09029
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	43.1980%	0.12098
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	44.7042%	0.11956
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.3013%	0.06719
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	68.3400%	0.09938
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.2481%	0.09359
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.3582%	0.07877
EV2-Max	REJECT	REJECT	REJECT	0.50664%	0.23976
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	25.7759%	0.14029
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.5512%	0.07853
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74.6907%	0.09407
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	65.3246%	0.10186
Pareto	REJECT	REJECT	REJECT	0.00002%	0.39595
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	75.2487%	0.09359
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95.1735%	0.07175
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	78.2576%	0.09098
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	9.72869%	0.17049
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	23.8164%	0.14298
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	92.8048%	0.07554
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	11.7775%	0.16502
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	40.9174%	0.12318
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	57.9809%	0.10793
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60.3276%	0.10598
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	58.7279%	0.10731

Figura 32 Test de Kolmogorov-Smirnov

Fuente: Hydrognomon

b) Precipitación a diferentes periodos de retorno

Una vez determinado las tres funciones de distribución de probabilidades que se ajustan más a las series, se procedió a hacer el análisis para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años y se utilizó el promedio de las tres distribuciones determinadas en el paso anterior, los resultados generados se presentan para cada estación.

Estación Chosica

Las precipitaciones máximas en 24 horas generadas para la estación Chosica se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9 Precipitación máxima en 24 horas (mm) para diferentes periodos de retorno – Estación Chosica

Distribución	Precipitación máxima (Pp max) por periodo de retorno				
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Log-Normal	5.14	11.06	16.50	33.30	42.67
Log Pearson III	4.81	11.24	17.53	38.21	50.31
GEV-Max (L-Moments)	4.79	10.23	15.67	33.67	51.00
Promedio	4.91	10.84	16.57	35.06	47.99

Fuente: Elaboración propia

Estación Santiago de Tuna

Las precipitaciones máximas en 24 horas generadas para la estación Santiago de Tuna se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10 Precipitación máxima en 24 horas (mm) para diferentes periodos de retorno – Estación Santiago de Tuna

Distribución	Precipitación máxima (Pp max) por periodo de retorno				
	T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Gamma	25.69	40.37	49.83	69.63	77.63
GEV-Min (L-Moments)	25.43	40.13	49.48	68.34	75.67
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	26.91	40.77	48.65	63.18	68.48
Promedio	26.01	40.42	49.32	67.05	73.93

Fuente: Elaboración propia

c) Análisis de la precipitación el día de ocurrencia del flujo de detritos

El día 16 de enero del 2017, fecha en la que se presentó el flujo de detritos estudiado, se presentó una precipitación con una intensidad de 6.5 mm en la estación Chosica y de 19 mm en la estación Santiago de Tuna, por lo que, a partir del análisis de precipitaciones máxima en 24 horas, se identificó los periodos de retorno para cada lluvia.

En la estación Chosica, la lluvia de 6.5 mm tiene un periodo de retorno de 2.62 años, ver la Tabla 11.

Tabla 11 Periodos de retorno para una lluvia de 6.5 mm

Distribución	Pp max = 6.5 mm
	Tr
Log-Normal	2.51
Log Pearson III	2.61
GEV-Max (L-Moments)	2.74
Promedio	2.62

Fuente: Elaboración propia

En la estación Santiago de Tuna, la lluvia de 19 mm tiene un periodo de retorno de 1.44 años, ver la Tabla 12.

Tabla 12 Periodos de retorno para una lluvia de 6.5 mm

Distribución	Pp max = 19 mm
	Tr
Gamma	1.45
GEV-Min (L-Moments)	1.46
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	1.41
Promedio	1.44

Fuente: Elaboración propia

d) Quebrada los Cóndores

Las cuencas de la costa peruana que pertenecen a la vertiente del pacífico, según la información de las estaciones pluviométricas, muestran que las lluvias son de naturaleza orográfica, lo cual establece que la intensidad de las precipitaciones está relacionado directamente a la altura de la zona (ver mapa SENAMHI).



Figura 33 Mapa climático del Perú

Fuente: SENAMHI

Por lo que, a partir de las estaciones estudiadas, se estableció un gradiente lineal entre las estaciones Chosica y Santiago de Tuna, para generar las lluvias para diferentes periodos de retorno en la zona de estudio, para una altura representativa de 1500 msnm de la parte alta de la cuenca.

Tabla 13 Precipitación máxima representativa para la quebrada Los Cóndores

Estación	Altura (m)	Precipitación máxima (Pp max) por periodo de retorno				
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Chosica	906	4.91	10.84	16.57	35.06	47.99
Santiago de Tuna	2924	26.01	40.42	49.32	67.05	73.93
Los Cóndores	1500	11.19	19.61	26.16	44.55	55.70

Fuente: Elaboración propia

Además, a partir de las precipitaciones registradas en ambas estaciones: 6.5 mm en la estación Chosica con un periodo de retorno de 2.62 años y 19 mm en la estación Santiago de Tuna con un periodo de retorno de 1.44 años; se generó la precipitación relacionada a la zona de estudio, que tuvo una intensidad de 10.19 mm con un periodo de retorno de 2.03 años.

Es necesario señalar que en la misma temporada de verano del año 2017 se presentaron lluvias de mayor intensidad que las del 16 de enero, pero ninguna de estas lluvias, generaron un huayco similar al de la lluvia relacionada al huayco del día 16 de enero. Esto se debe a dos razones:

- Las estaciones Chosica y Santiago de Tuna no se encuentran en la zona de estudio, lo que implica que la información de precipitación es de carácter referencial.
- Las lluvias previas al día 16 de enero saturaron las capas superiores del suelo lo cual debilitó los depósitos de detritos ubicados en la parte media de la cuenca, generando el huayco de referencia al estudio.

3.5.4 Generación de volúmenes de flujo de detritos para diferentes escenarios

Los flujos de detritos están formados por dos fases, la sólida que es aportada por los materiales de detritos y la líquida del agua de lluvia. Los escenarios analizados en la presente investigación toman como referencia el evento ocurrido el 16 de enero del 2017 en la zona de estudio. Para lo cual, primeramente, se generan los volúmenes de agua de lluvia producida por las precipitaciones máximas probables en 24 horas para diferentes periodos de retorno, a lo cual se suma el volumen sólido del flujo de detritos, el cual fue estimado en el evento de referencia y calibración.

Generalmente, los caudales en un flujo de detritos son muy superiores a los caudales generados solo por las precipitaciones, ya que a medida que se van incorporando nuevos materiales sólidos y el agua de los poros saturados por lluvias anteriores al de la precipitación que genera el flujo de detritos, el caudal del flujo aumenta a lo largo de su curso. Takahashi (1991) reporta flujos de detritos en las cuales la descarga pico fue de 60 veces el pico estimado de inundación asumiendo solo el caudal producido por las lluvias. En una *avalancha de tierra* (se denomina así al flujo de detritos en Colombia) observada en Rusia, el caudal relacionado a la precipitación resultó ser la décima parte del caudal de flujo de detritos, en dicho evento las partículas sólidas constituían un 54 % y el agua 46 % respectivamente (Suarez, Colombia).

A partir de esto, el modelo se calibró con el caudal estimado del flujo de detritos del 16 de enero del 2017, que está asociado a la precipitación de 10.19 mm, que tuvo un caudal de flujo de detritos de 11.9 m³/s; a partir del cual se considera el caudal de agua de lluvia como un 50 % del caudal de flujo de detritos, resultando 5.95 m³/s.

Con la información de las lluvias para diferentes periodos de retorno generados en los análisis previos, se generó los volúmenes de agua para los flujos de detritos a través de la modelación hidrológica de la cuenca de estudio, para lo cual se usó el software Hec-HMS, usando el modelo Curva numero e Hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos. Los parámetros utilizados son el Área de 6.5 m² aguas arriba del punto de calibración, curva número de valor 70 asociada al tipo de suelo de la cuenca Rímac, un factor de frecuencia máxima 600, impermeabilidad de 55 % en un suelo saturado. Se obtuvo los volúmenes para diferentes periodos de retorno, sumando el volumen de agua generado por diferentes lluvias para diferentes periodos de retorno y se le adicionó el volumen de detritos obtenido del evento de referencia, el cual asciende a 95460.23 m³.

Tabla 14 Volúmenes de flujo de detritos para diferentes periodos de retorno

Parámetros	Unidad	Volumen de flujos de detritos en diferentes periodos de retorno					
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años	Evento de referencia
Caudal pico de agua	m ³ /s	6.50	11.40	15.40	29.90	39.90	5.95
Volumen de agua	m ³	40000.00	70300.00	96200.00	179100.00	234700.00	33100.00
Volumen de detritos	m ³	95460.23	95460.23	95460.23	95460.23	95460.23	95460.23
Volumen de flujo de detritos	m ³	135460.23	165760.23	191660.23	274560.23	330160.23	128560.23
Caudal de flujo de detritos	m ³ /s	13.00	22.80	30.80	59.80	79.80	11.90

Fuente: Elaboración propia

Estos volúmenes, fueron usados para estimar los escenarios del riesgo por flujo de detritos en la zona de estudio.

3.6 Generación del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) PeruSAT-1

El modelo digital de elevaciones es uno de los insumos principales para el análisis de flujo de detritos, necesita tener una adecuada resolución que represente las alturas del relieve de la zona de estudio.

H. Hirschmüller (2005) determinó una metodología que usa la información obtenida por los sensores de imagen de satélites de alta resolución (VHRS) para generar estos MDE basado en el algoritmo de Emparejamiento Semi-Global (Semi Global Matching).

Para generar el Modelo Digital de Elevaciones se usó el software PCI Geomatic, que incluye una herramienta de generación de MDE basado en la metodología de H. Hirschmüller, además de las imágenes de alta resolución del satélite PeruSAT-1, distribuidas por la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA).

Se usaron tres imágenes satelitales PeruSAT-1, con fechas del 05, 07 y 19 de febrero de 2017, las cuales son las más cercanas a la fecha del evento.

La metodología seguida para la generación del MDE, se presenta en la Figura 34, luego se describe cada paso para la obtención del Modelo Digital de Elevaciones.

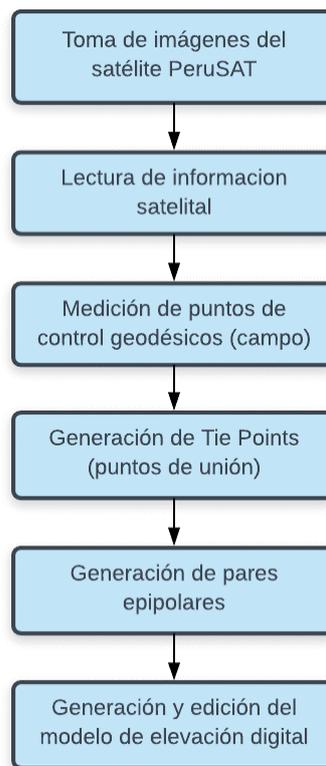


Figura 34 Flujograma metodológico para la generación del Modelo Digital de Elevaciones PeruSAT-

1

Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Lectura de información satelital

En primer lugar, se cargan las imágenes PeruSAT-1 provistas por la CONIDA, en la siguiente figura se observan las imágenes cargadas en el software PCI Geomatic.

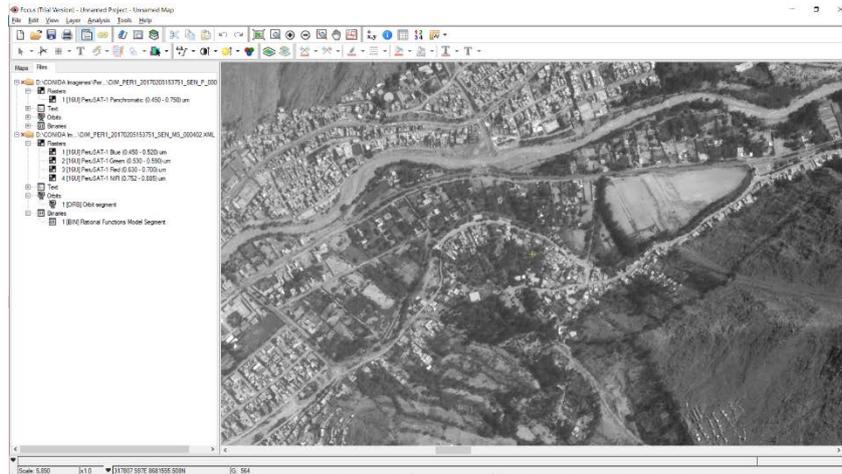


Figura 35 Visualización de una imagen del satélite PeruSAT-1

Fuente: Imágenes de @CONIDA (2017), Distribución CONIDA, República de Perú, todos los derechos reservados.

3.6.2 Corrección con los puntos de control y tie points (TP)

Con los puntos de control determinados en campo con los receptores GNSS, se realizó la corrección de las imágenes satelitales. Y a continuación, se encontraron los *tie points* o puntos de unión (TP), los cuales son puntos con características que puede identificarse claramente en dos o más imágenes y que pueden seleccionarse como puntos de referencia para integrar las imágenes satelitales, ver la siguiente figura de la pantalla de resultados de este proceso.

3.6.3 Generación de pares epipolares

Los epipolares son imágenes generadas a partir de pares estereoscópicos (imágenes con la información colectada por los sensores del satélite PeruSAT-1), estos epipolares se utilizan para la generación automática del modelo digital de elevación. En el presente caso de estudio al contar con tres imágenes satelitales, se generaron tres pares epipolares.

3.6.4 Generación y edición del modelo de elevación digital

En este apartado se obtuvo el modelo digital de elevaciones, a partir de la información colectada en los pasos previos, en la siguiente figura se visualiza el DEM generado de la cuenca de estudio.

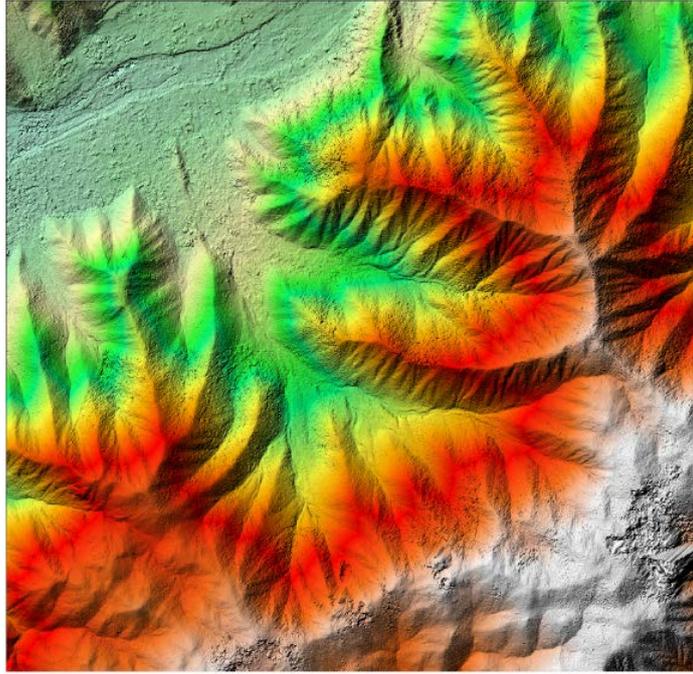


Figura 36 DEM generado a partir de Imágenes PeruSAT-1
Fuente: Elaboración Propia

3.7 Identificación de zonas pobladas en la quebrada Los Cóndores

En la parte baja de la quebrada Los Cóndores, existen zonas urbanas que son las que son afectadas por los flujos de detritos, por lo cual se identificaron dichas áreas pobladas, las cuales, serán contrastadas con la información de zonas afectadas generadas por el modelo RAMMS para flujo de detritos.

Esta área ha sido identificada usando una imagen satelital de PeruSAT-1 y una herramienta de geoprocésamiento llamada *Clasificación no supervisada de información Raster* del software ArcGIS, que clasifica las zonas según sus firmas espectrales.

A continuación, se muestra el área ubicada en la cuenca de estudio, las zonas incluyen las áreas desde la parte media, y toda la zona de salida de la cuenca, por donde se prevé pasarán los huaycos en la zona.



Figura 37 Población vulnerable ante la presencia de flujo de detritos Cuenca Los Cóndores

Fuente: Elaboración Propia

3.8 Parámetros de calibración del modelo

La calibración del modelo de fricción Voellmy es uno de los pasos más importantes para obtener resultados realistas y útiles. Bartelt et al. (2017) indicaron que para la calibración del modelo se requiere un evento histórico bien documentado, idealmente, la información debe incluir alturas de flujo y velocidades en diferentes lugares en el torrente, así como también la composición del material, información concerniente a diferentes rutas de flujo y las condiciones iniciales tales como el volumen total y el volumen inicial. Sin embargo, continúan precisando que, en la práctica, es difícil recopilar datos a este nivel de precisión, sin embargo, los datos de campo pueden proporcionar estimaciones del volumen total, las trayectorias de flujo, las alturas de flujo y la composición del material, e incluso las velocidades de flujo.

Cornejo et al. (2018) realizaron un estudio experimental de la dinámica de flujos de huaycos en una quebrada de alta pendiente donde midieron la velocidad del flujo de detritos a través de un sistema de circuito cerrado de televisión (sistema CCTV) que les permitió filmar y registrar el proceso de tránsito de la onda de flujo de huayco para el canal experimental de la quebrada. Estas cámaras de filmación fueron colocadas cada cierta distancia permitiéndoles determinar las velocidades del flujo.

La cuenca de estudio, y de forma general, las cuencas del Perú no cuentan con un sistema de monitoreo de este; pero a partir de dicha experiencia, la estimación del valor del volumen de flujo de detritos se llevó a cabo con la información proporcionada por una filmación del flujo de detritos del 16 de enero de 2017, esta filmación fue tomada con una cámara de celular por parte de un habitante de la zona.



Figura 38 Imagen del video del flujo de detritos del 16 de enero de 2017
Fuente: YouTube, 2017

Además de esta filmación, para la calibración del modelo se realizó entrevistas a pobladores que observaron el evento mencionado, y se llevó a cabo trabajos de campo para determinar la velocidad y volumen del flujo de detritos del 16 de enero de 2017. A continuación, se presenta la metodología usada para dar con la velocidad y el volumen del flujo de detritos.

Los valores necesarios para determinar el volumen del flujo de detritos se determinan de la siguiente ecuación general de caudales

$$Q = v * A$$

y

$$V = Q * t$$

donde,

Q es el caudal, en m³/s;

v es la velocidad media del flujo, en m/s;

A es el área de la sección transversal del cauca, en m²;

V es el volumen del flujo;

t es el tiempo que dura el flujo con el caudal Q, en s.

3.8.1 Análisis de fotogramas

Este paso consiste en el análisis de cada una de las imágenes que conforman un video o filmación, estas imágenes son denominadas fotogramas. Como se mencionó previamente, la fuente de mayor fiabilidad del evento es la filmación captada por una habitante, en el cual se visualiza el movimiento del flujo.

Esta filmación, fue analizada con el editor de videos Vegas Pro, donde se identificaron los fotogramas que corresponden al recorrido de un tramo del flujo de detritos, para determinar el tiempo que se demora un “objeto flotante” en recorrer un tramo de la calle por donde discurrió el huayco, y así determinar la velocidad promedio del flujo.

En los fotogramas de la Figura 39, se eligió un tramo por donde pasa un elemento desconocido que resalta a la vista, el cual servirá como nuestro elemento de análisis, al cual será denominado “Objeto Flotante”, este objeto flotante empieza a sobresalir al inicio del tramo a la altura del primer poste, en el fotograma 3249 que tiene un tiempo de 01’48.833’’; y termina su recorrido a la altura de donde se encuentra los carros, punto donde se pierde de

vista, esto sucede en el fotograma 3310 que tiene un tiempo de 01'50.9''. Resultando la diferencia de este lapso de tiempo, entre fotograma y fotograma, 2.067 segundos.

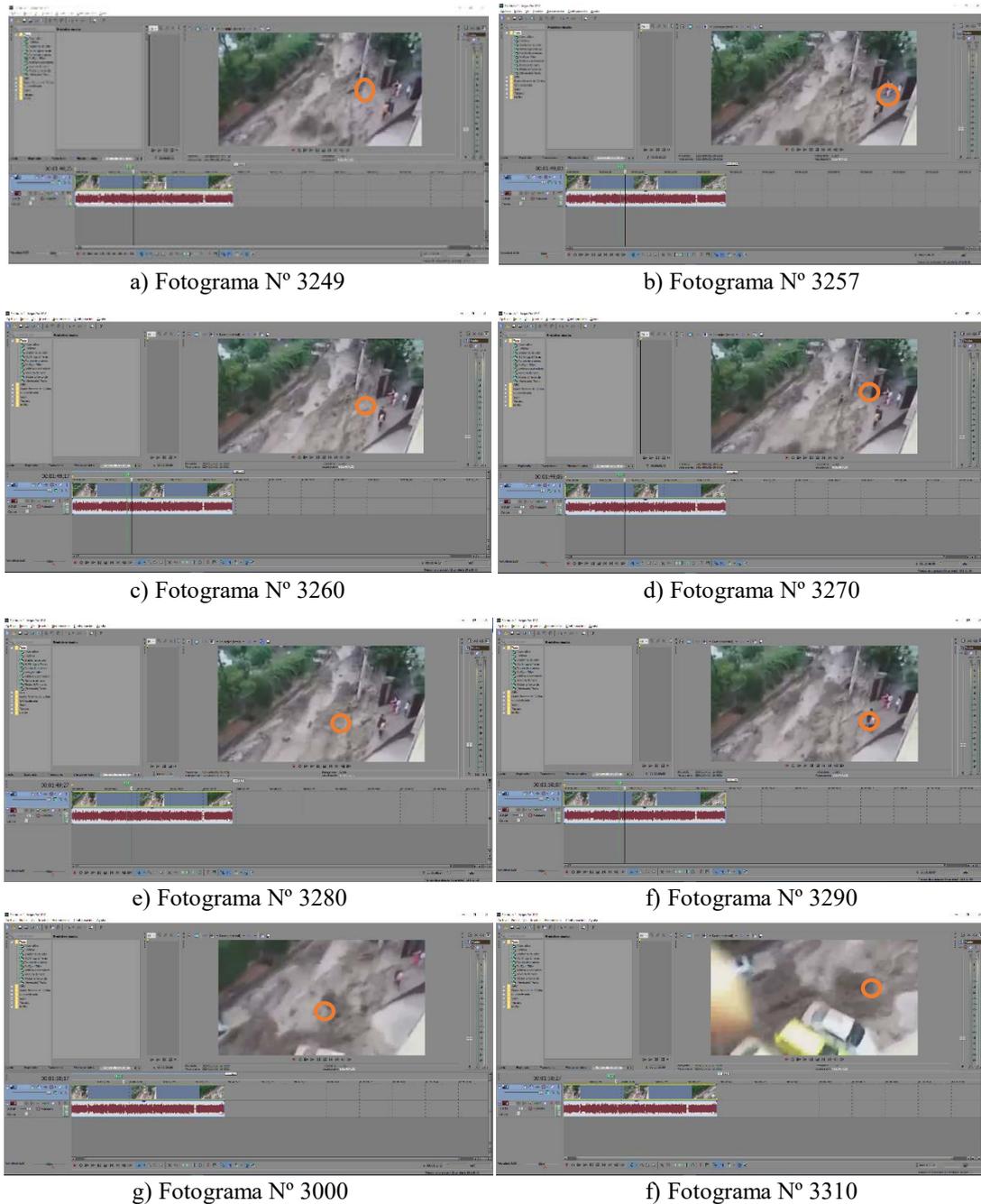


Figura 39 Fotogramas del video del huayco del 16-01-2017

Fuente: Elaboración Propia

3.8.2 Determinación de las longitudes del tramo y pendiente en campo

Para determinar las medidas del tramo recorrido por el bote flotante, se realizó trabajos de campo, donde se tomaron las medidas de dicho tramo elegido. Sus dimensiones son las siguientes: largo 13.3 metros y de ancho 3.7 metros. La altura del fluido asciende a 0.50

metros, esto fue identificado contrastando el flujo con los alerones de las llantas del carro plomo presente en la filmación, los cuales tienen 0.60 metros de altura.



Figura 40 Tramo final escogido del video
Fuente: Elaboración Propia



Figura 41 Salida a campo - Vista aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha) del tramo analizado
Fuente: Elaboración Propia

3.8.3 Volumen de calibración

Luego de la finalización de los análisis previos, se obtuvieron los datos necesarios para obtener el volumen del evento del 16 de enero de 2017.

Como resultado se obtuvo que el flujo de detritos tuvo una velocidad de 6.43 m/s y un caudal de flujo de detritos de 11.9 m³/s. Además, el tiempo de duración de este evento fue de tres horas (10800 s).

De los datos mostrados anteriormente se tiene que el volumen del flujo de detritos asciende a 128 560.23 m³.

3.9 Modelamiento de flujo de detritos con RAMMS::Debris Flow

El módulo Debris Flow del software RAMMS, está diseñado para modelar los flujos de detritos, comúnmente conocido como huaycos, haciendo uso la ley de fricción de Voellmy para fluidos viscosos.

A continuación, se presenta la metodología utilizada para el modelamiento de flujo de detritos en la cuenca Los Cóndores:

3.9.1 Entrada del Modelo Digital de Elevaciones:

Se inserta la información base del modelo el cual es la información de alturas del terreno, en forma de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM por sus siglas en ingles). En este paso la modelación se realizó con un DEM generado a partir de imágenes satelitales provenientes del satélite del gobierno peruano PeruSAT-1 operado por la agencia espacial Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), mediante el cual se obtiene información del terreno con una resolución de hasta 70 centímetros; se utiliza este DEM pues el modelo RAMMS::Debris Flow indica que se debe realizar la modelación con información de terreno con una resolución espacial mínima de 5 metros para obtener valores que se ajusten a la realidad.

Adicionalmente, para comparar el modelamiento, se generó un modelo de flujo de detritos con el DEM con mayor resolución libre en el mercado, el cual es el proveniente del satélite ALOS PALSAR de la misión de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA por sus siglas en ingles), el cual tiene una resolución de 12.5 metros.

En la siguiente figura se visualiza la rasterización de ambos Modelos Digitales de Elevaciones, donde se diferencia que el DEM del satélite peruano tiene una mayor resolución espacial que el DEM del satélite japonés.

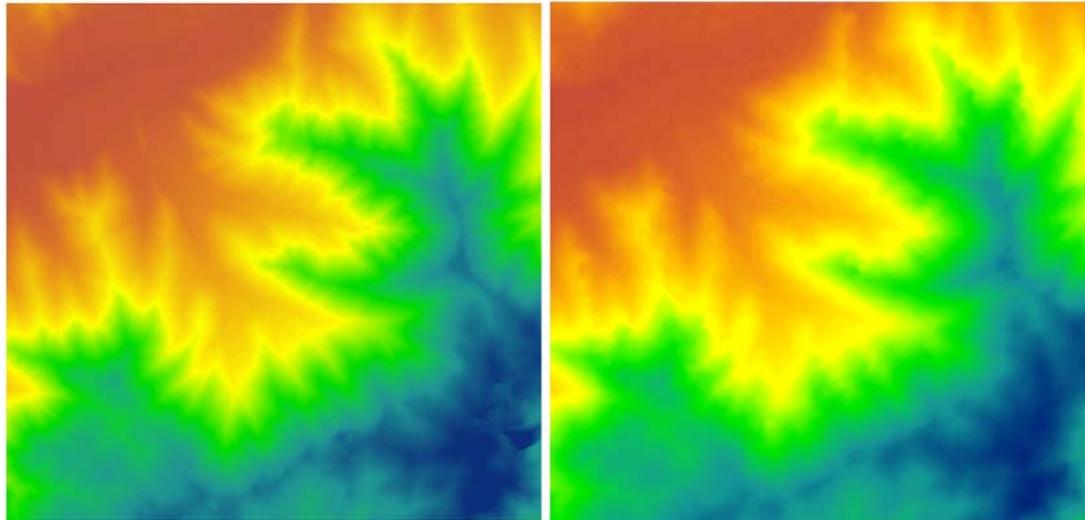


Figura 42 Rasterizado del DEM del satélite PeruSAT-1 (izquierda) y del DEM del satélite ALOS-Palsar (derecha)
Fuente: Elaboración Propia

3.9.2 Entrada del Área de liberación:

El área de liberación, en inglés *Release Area*, es el terreno que contiene el material de suelo que alimenta al flujo de detritos.

Para establecer esta área, se realizó un trabajo en campo, donde se ubicó depósitos de material sueltos, los cuales permitieron atribuir ciertas características a las zonas, i) se ubican en la cuenca media del área de estudio, por encima de los 900 msnm, ii) tienen una pendiente menor a 20 grados.

Mediante el uso de las herramientas de geoprocésamiento, se identificó las áreas que cumplen con estos atributos, las cuales se visualizan en la siguiente figura, resaltadas de color verde.

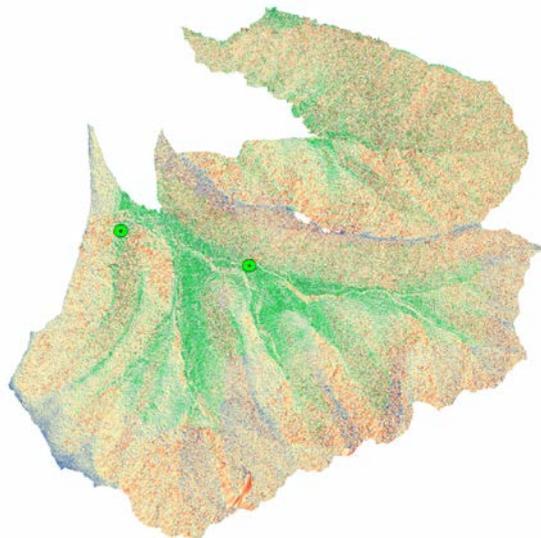


Figura 43 Resultado de geoprocésamiento para identificar las Áreas de liberación
Fuente: Elaboración Propia

3.9.3 Área de dominio

El área de dominio o “Domain Area” es el área que restringe la zona de desarrollo del evento, existe la posibilidad de que tome la misma forma del DEM o delinear esta área de forma manual. En el gráfico siguiente se visualiza el área de dominio, delineada de color verde, para el modelo de la cuenca en estudio.

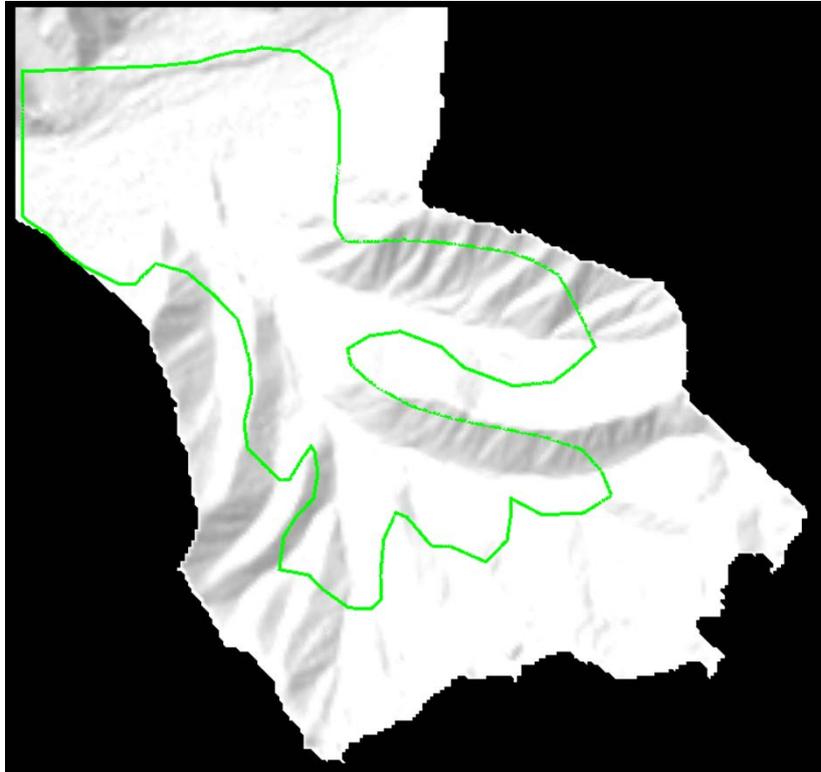


Figura 44 Área de dominio del moldeo “Domain area”
Fuente: Elaboración Propia

3.9.4 Hidrograma de entrada

Adicional al área de liberación, para obtener un modelo con mayor nivel de confianza, se ingresa un hidrograma de entrada, el hidrograma de entrada se usa cuando se cuenta con información de la cantidad de material de descarga que fluye en un lugar determinado captado por estaciones de monitoreo u otros medios.

En el caso de la presente tesis de investigación, no se cuenta con una estación de monitoreo, pero si con la filmación que captó el flujo de detritos al igual que lo haría una estación de monitoreo; a partir de dicho video como ya se especificó en capítulos anteriores, se determinó la información de volumen total del flujo de detritos (239979.5 m^3), caudal ($19.05 \text{ m}^3/\text{s}$) y velocidad del flujo (6.4 m/s), los cuales se visualizan en la siguiente figura.

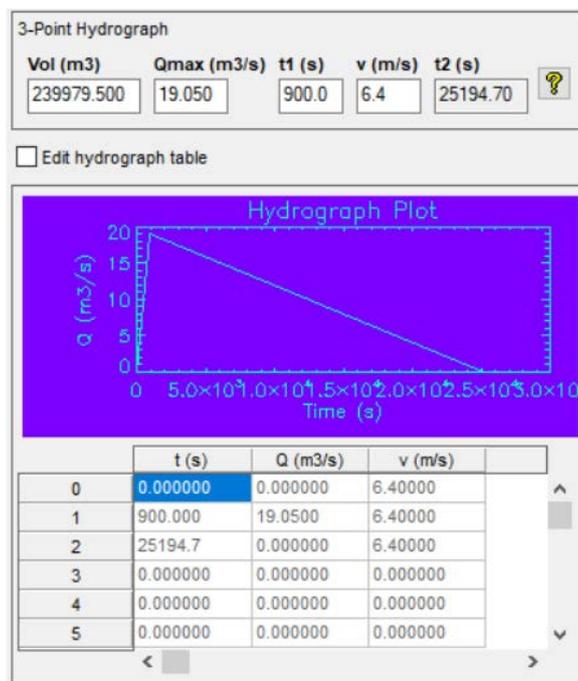


Figura 45 Hidrograma de ingreso del flujo de detritos
Fuente: Modelo RAMMS::Debris Flow, 2018

3.9.5 Entrada de parámetros

Los parámetros que requiere el modelo son la densidad del material del flujo; y los coeficientes de fricción de Voellmy: fricción de tipo Coulomb seca μ y la fricción viscosa turbulenta ξ .

El modelo recomienda los parámetros por defecto, cuando no se cuenta con información inicial, los cuales son 2000 kg/m^3 de densidad, $\mu = 0.2$ y $\xi = 200 \text{ m/s}^2$. Estos parámetros se van calibrando según el tipo de suelos granulares o con mayor presencia de arcillas.

En el caso de la cuenca de estudio, se hallaron los parámetros de densidad y la fricción del suelo, con muestras recolectadas en campo de los dos principales depósitos identificados. La densidad de suelo en ambos depósitos es 1.73 y 1.7 g/cm^3 respectivamente, los cuales se promediaron para obtener el valor de ingreso al modelo, obteniendo 1.715 g/cm^3 (1715 kg/m^3). La fricción del suelo fueron 0.2 y 0.13 , el cual se promedió para obtener el valor de ingreso al modelo, obteniendo $\mu = 0.165$.

3.10 Calibración del modelo

Valdés et al. (2017) realizaron la modelación de crecidas aluvionales (flujos de detrito) en la Cuenca del Río Copiapó en Chile, donde indicaron que para la calibración realizaron múltiples simulaciones con el objetivo de determinar la mejor combinación de parámetros

para el modelo en las zonas de estudio. Utilizaron once puntos con valores observados de altura del flujo de detritos pertenecientes a dos zonas de estudio. Los parámetros se variaron sistemáticamente de manera positiva y negativa, así como los datos de entrada asociados al hidrograma de la crecida.

Para la modelación del flujo de detritos en la quebrada Los Condores, se utilizó el punto con valor observado de altura del flujo de detritos obtenido del registro en la filmación de referencia. Para obtener dicha igualdad se realizaron múltiples simulaciones en las cuales se modificó el valor del parámetro de la fricción viscosa turbulenta ξ , así como los datos de entrada asociados al hidrograma de la crecida.

Bartelt et al. (2017) indican que la calibración de la fricción turbulenta ξ debe comenzar como $\xi = 200 \text{ m/s}^2$. Este valor se modifica según el tipo de fluido: i) si el fluido se comporta más como fangos, el modelo sugiere subir su valor entre 200 y 1000; ii) si se comporta como un flujo granular, el cual es el caso de la zona de investigación, el modelo sugiere modificar este valor entre 200 y 100.

Como se visualiza en la siguiente figura, los resultados del modelo muestran que en la zona donde se registró el flujo de detritos, las alturas rondan los valores de 0.3 y 1 metro, el video muestra que la altura del flujo es de 0.5 m, que se encuentra en dentro del rango de los resultados del modelo.

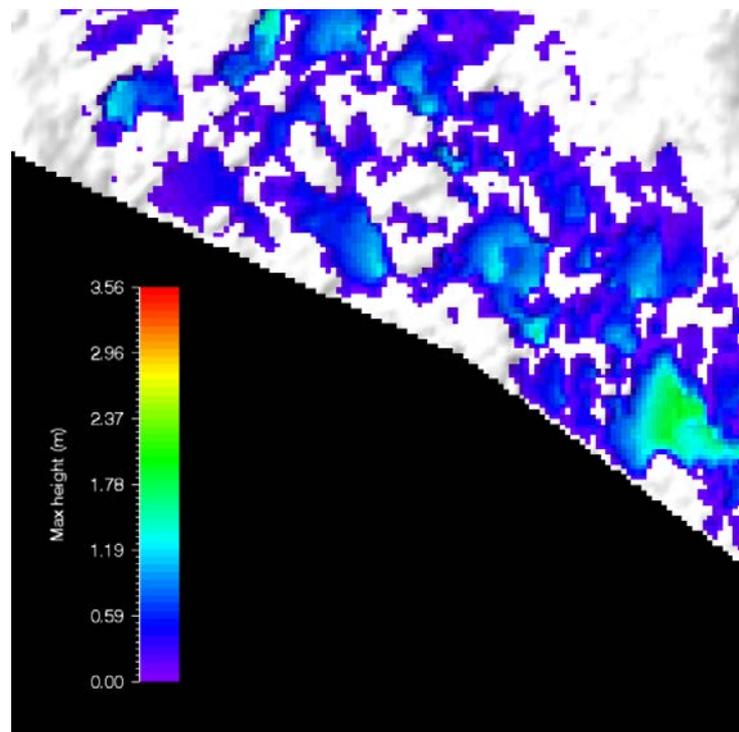


Figura 46 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de presiones
Fuente: Elaboración Propia

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Modelo RAMMS::Debris Flow – DEM PeruSAT-1

Con la información recolectada y generada, se modeló el flujo de detritos que se presentó el día 16 de enero de 2017 en la quebrada Los Cóndores, en la figura siguiente se presenta el esquema grafico del modelo, de color rojo el área de liberación, de color verde el área de dominio.

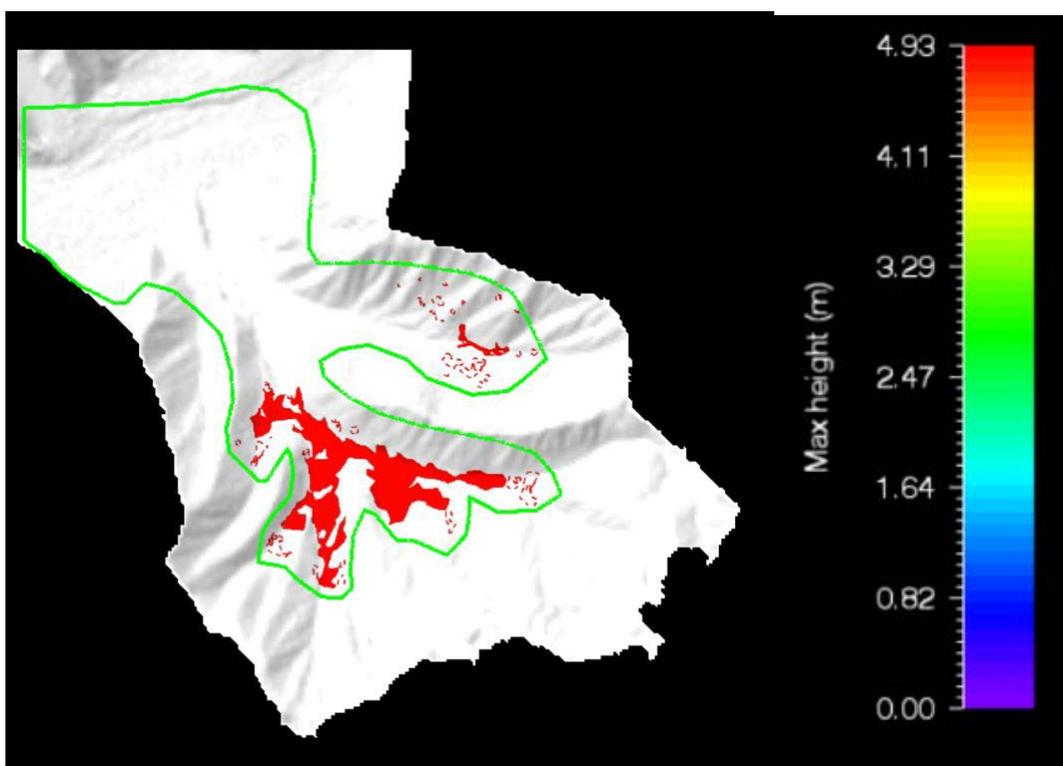


Figura 47 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1
Fuente: Elaboración Propia

El modelo muestra las áreas afectadas con respecto al nivel de altura máxima que alcanza el flujo a lo largo de su recorrido, además muestra las máximas velocidades y máximas presiones del flujo, las cuales son presentados a continuación.

En la siguiente figura se visualiza las zonas afectadas por el huayco, donde las zonas con mayor altura del flujo están ubicadas en el cauce del río antes de ser canalizados y entrar a las calles donde se estrecha el recorrido del flujo. El área afectada fue de 69.23 ha.

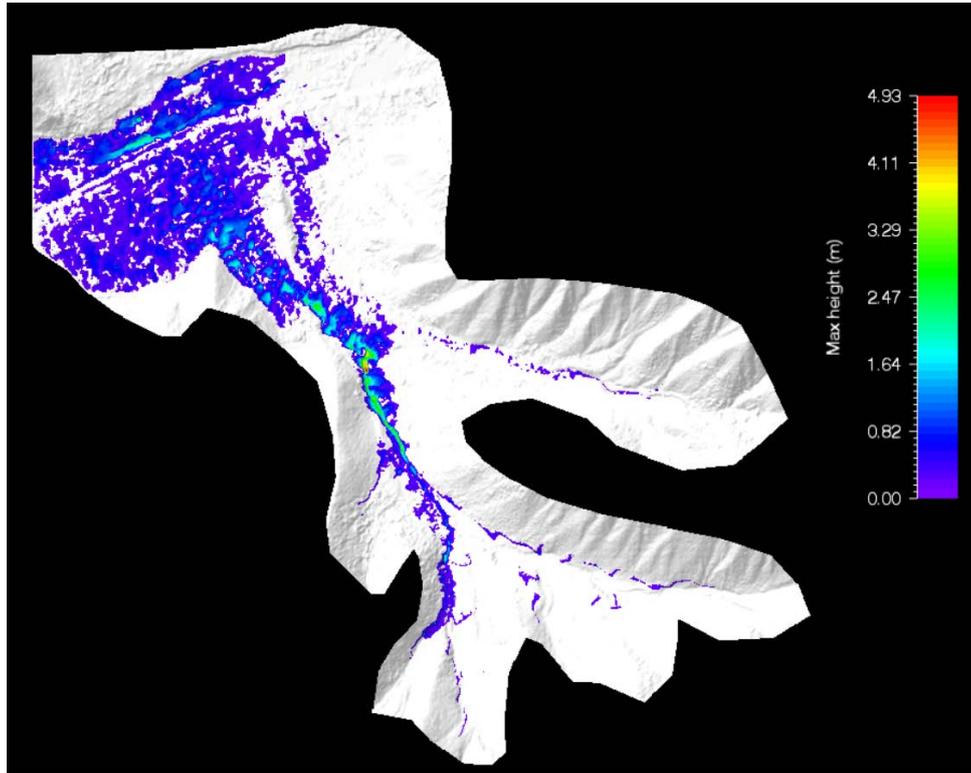


Figura 48 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de velocidades máximas se presentan en la siguiente figura, donde las velocidades más altas están en la parte media alta de la cuenca, hasta estabilizarse en la parte media de la cuenca bordeando una velocidad promedio de 2.1, y ya en la parte baja es menor a 1 m/s.

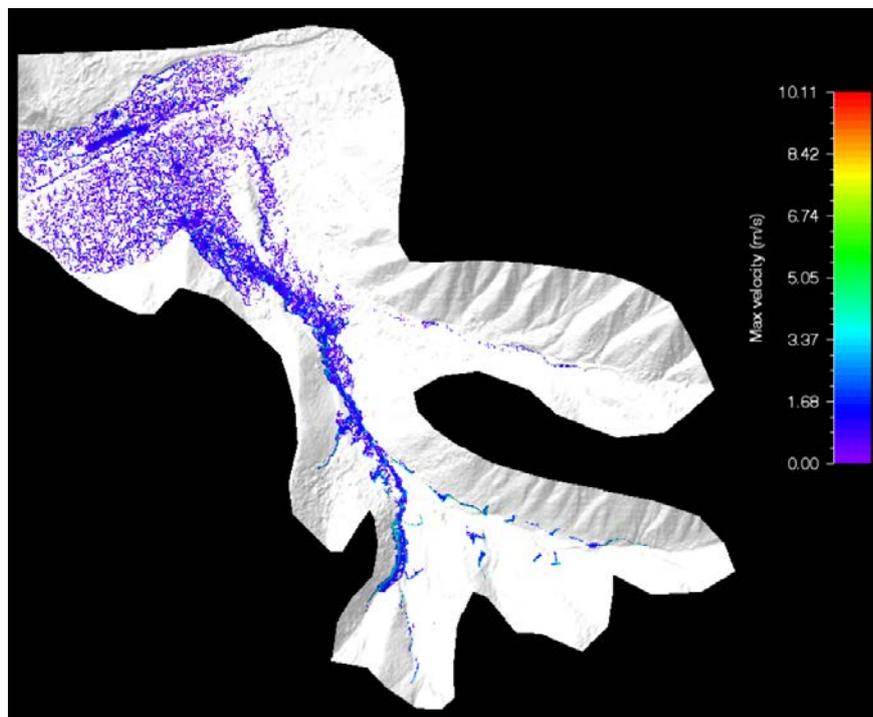


Figura 49 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de velocidades
Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de presiones máximas son presentados en la siguiente figura, sus unidades son los kilopáscales. Este grafico permite visualizar las zonas en las cuales hay mayor peligro sobre las infraestructuras debido a las presiones generadas por el huayco. Se identifica que en la parte media baja de la quebrada es donde hay mayor presión en el mapa, con presiones que llegan hasta 173.69 kpa.

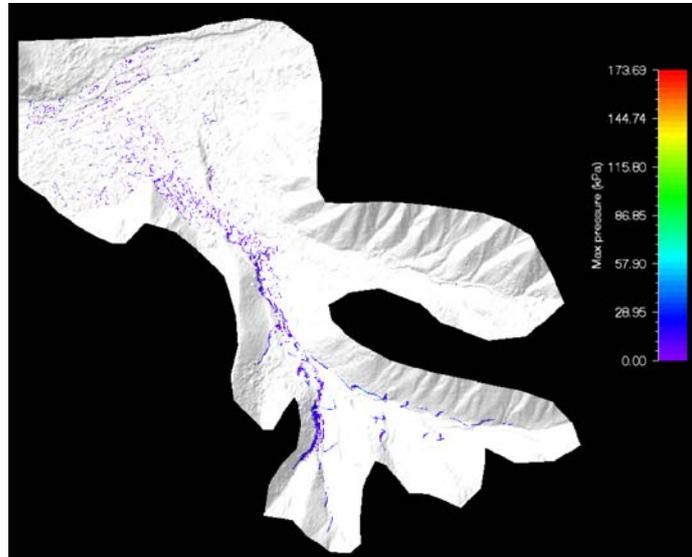


Figura 50 Modelo RAMMS::Debris Flow – PeruSAT-1: Mapa de presiones
Fuente: Elaboración Propia

4.2 Comparación de modelos PeruSAT-1 vs ALOS Palsar

Esta comparativa tiene como objetivo contrastar los resultados de un modelo digital de elevaciones de alta resolución del satélite peruano PeruSAT-1 y el modelo digital de elevaciones de mayor resolución posible libre que se encuentra en el mercado, el cual pertenece al satélite japonés ALOS Palsar.

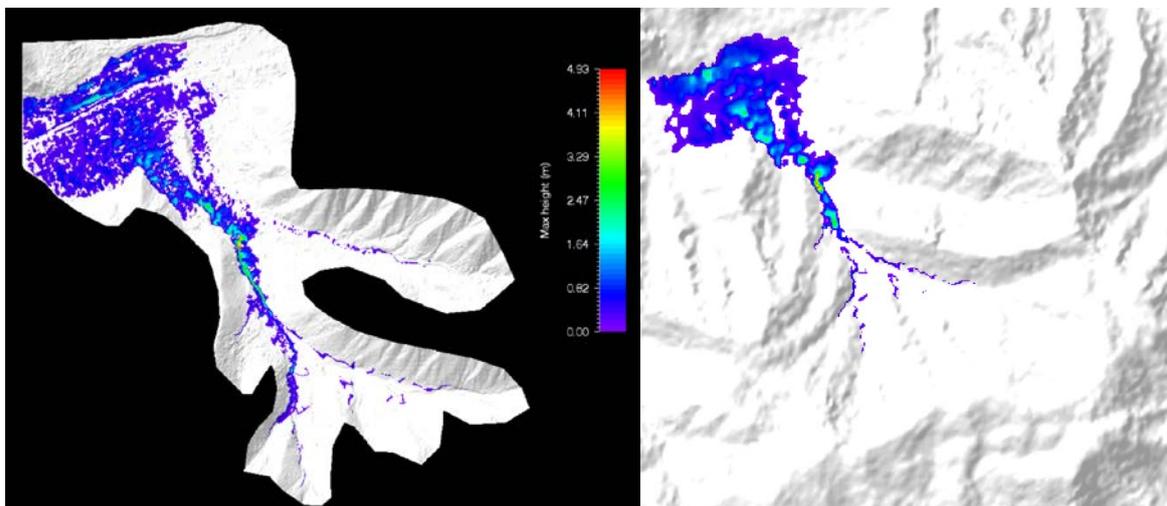


Figura 51 Modelo RAMMS PeruSAT-1 (der.) – ALOS Palsar (izq.)

La primera impresión de la comparación es que el modelo digital de elevaciones ALOS Palsar es del tipo Modelo Digital del Terreno (MDT), que solo representa la superficie terrestre sin la presencia de edificios, edificaciones, árboles, arbustos, etc.; ya que se observa que las áreas afectadas por el huayco (de color azul) es homogénea en su extensión mostrando que no hay diferencia por las edificaciones en el recorrido del huayco.

La otra observación es que el modelo digital de elevaciones del satélite PeruSAT-1 es del tipo Modelo Digital de Superficie (MDS), que representa el terreno con todos los elementos existentes presentes en la superficie, esto se determina al observar que el flujo no es homogéneo en su extensión, sino que es desviado por las diferentes edificaciones de la zona de estudio. Los estudios de modelamiento de huaycos para análisis de riesgos necesitan de modelos digitales de elevaciones del tipo MDS, pues es necesario saber su recorrido en el área de estudio a través de las edificaciones presentes en la zona.

4.3 Análisis de riesgos de flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores

La modelación de flujo de detritos dio como resultado que las zonas expuestas al riesgo en un escenario igual al que se dio el 16 de enero de 2017, alcanzarán un área de 69.23 hectáreas (ver la Figura 52).

Dentro de la zona de riesgo se encuentran cinco colegios y un centro de salud; además este escenario afecta 1128.75 metros de las vías del Ferrocarril Central y 1013.61 metros de la Carretera Central (ruta nacional PE-22). Estas vías son las principales conexiones entre la costa central y la sierra-selva central, lo cual significa la pérdida cuantiosa no solo para la cuenca de estudio sino para el país.

Tabla 15 Estructuras expuestas al riesgo por flujo de detritos en el área de estudio

Estructuras expuestas al riesgo por flujo de detritos – Quebrada Los Cóndores		
Estructura	Unidad	Valor
Áreas Urbanas	Ha	69.23
Carretera Central	m	1013.61
Ferrocarril central	m	1128.75
Instituciones educativas	-	5
Establecimientos de salud	-	1

Fuente: Elaboración Propia

Las áreas afectadas para los diferentes escenarios son los que se presentan en la siguiente tabla, además en el Anexo 1 se presentan los mapas de riesgo para cada escenario de riesgo, generados a partir de las tormentas a diferentes periodos de retorno. En los mapas de escenarios de riesgo, se clasificó el riesgo en tres escalas, la primera escala es la de Nivel Bajo, que corresponde a áreas afectadas por el flujo de detritos hasta una altura de 0.5 metros; la segunda es la escala Media para áreas afectadas por el flujo de detritos desde 0.5 hasta 1.5 metros de altura; y la tercera escala es la de Nivel Alto para alturas mayores a 1.5 metros.

Tabla 16 Áreas bajo riesgo por flujo de detritos

	Unidad	Áreas bajo riesgo por flujo de detritos				
		Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5
		T=2 años	T=5 años	T=10 años	T=50 años	T=100 años
Área de riesgo	ha	65.55	90.26	108.48	116.5	119.07

Fuente: Elaboración Propia

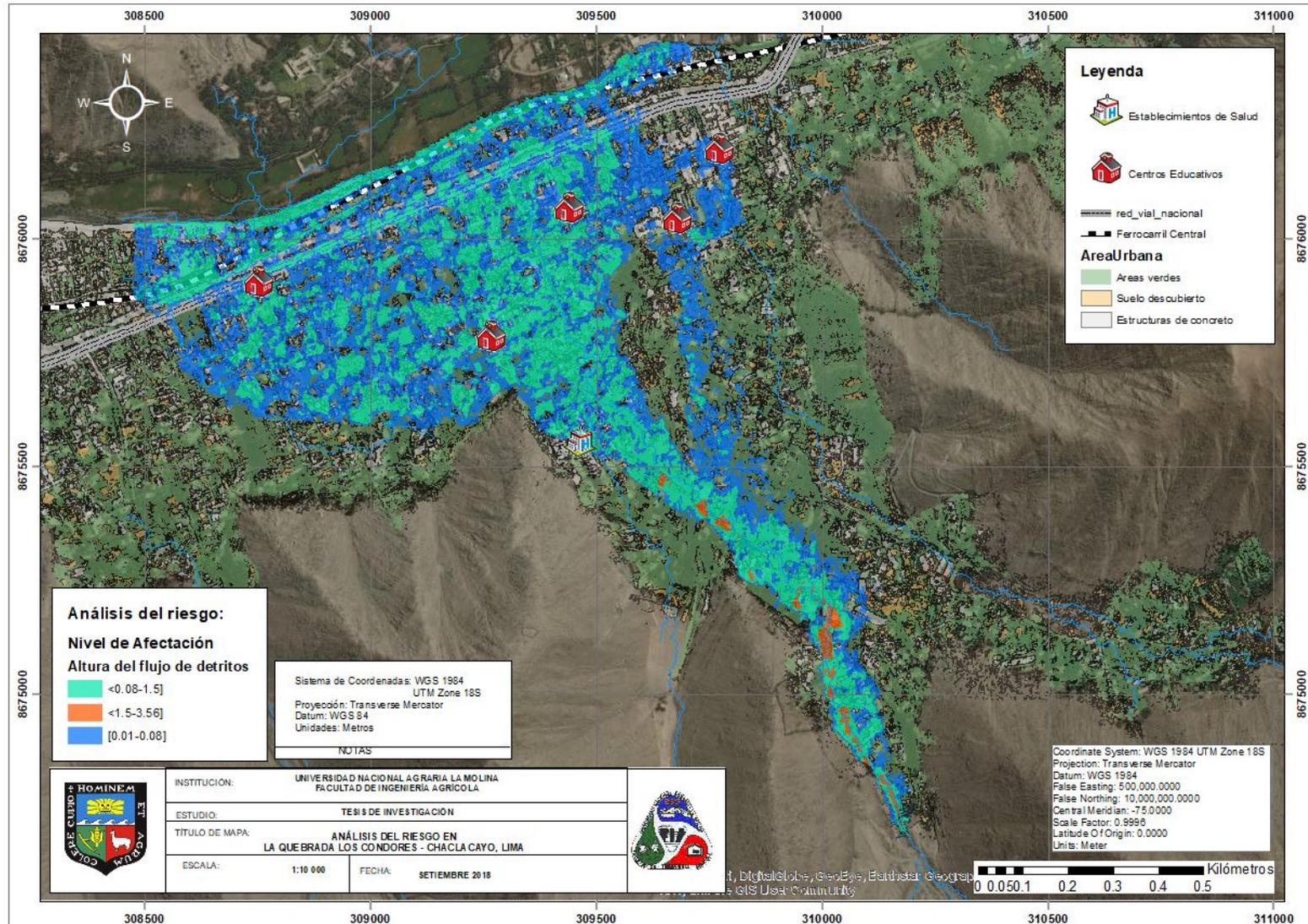


Figura 52 Flujo de detritos del 16 de enero del 2017
 Fuente: Elaboración Propia

4.4 Flujograma metodológico

En la siguiente figura se presenta el procedimiento metodológico desarrollado en el modelamiento de flujo de detritos para el análisis del riesgo.

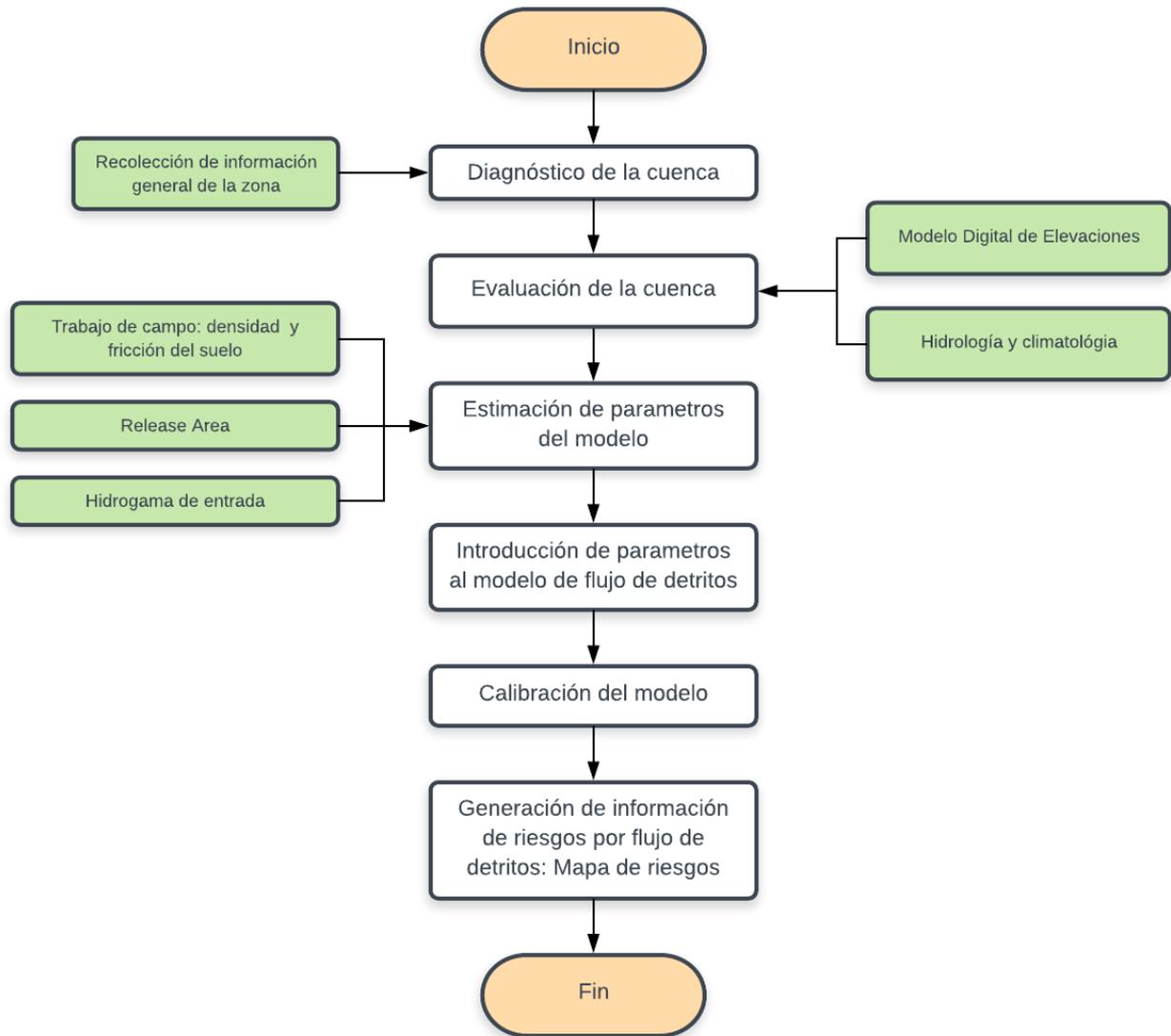


Figura 53 Flujograma metodológico para el modelamiento de flujo de detritos para el análisis del riesgo

Fuente: Elaboración Propia

V. CONCLUSIONES

Objetivo principal: Realizar el análisis del riesgo por flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores.

1. El trabajo de tesis realizado permitió realizar el análisis del riesgo por flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores, mostrando que las áreas expuestas a este tipo de riesgo son 69.23 hectáreas para un evento de igual magnitud al flujo de detritos presentado el día 16 de enero del 2017, además permitió identificar las principales estructuras sometidas a riesgo, las cuales son de gran utilidad en la gestión del riesgo para aminorar la vulnerabilidad asociada a este riesgo.
2. Este tipo de estudio y análisis es de gran valor en la toma de decisiones para la correcta gestión prospectiva del riesgo por flujo de detritos, pues brinda información detallada de cómo se presentarán los eventos futuros en la zona de estudio.
3. En la mayoría de las cuencas del río Rímac existen zonas de riesgo por flujo de detritos, las cuales serán inundadas ante la presencia de este tipo de eventos, lo cual atenta principalmente a las personas, a su entorno y desarrollo, además de generar pérdidas económicas, el software RAMMS tiene la capacidad de determinar las zonas de riesgo para tomar las medidas preventivas necesarias en otras cuencas.
4. En la cuenca de estudio, no fue necesario la presencia de una precipitación máxima con altos periodos de retorno para la generación del flujo de detritos. Otro factor influyente fue la presencia de lluvias que precedieron a la lluvia causante del evento, que debilitaron y saturaron los sustratos superiores del suelo.

Objetivo secundario 1: Calibrar los parámetros de ingreso del modelo RAMMS: Debris Flow.

5. Mediante el estudio de investigación se logró identificar los parámetros de la cuenca necesarios para el modelo RAMMS, esto se logró mediante el análisis de muestras de suelos obtenidos en campo para los parámetros de densidad (1715 kg/m^3) y fricción de suelo de tipo Coulomb seca ($\mu = 0.165$); y el parámetro de fricción viscosa turbulenta se estimó mediante la calibración del modelo ($\xi = 135 \text{ m/s}^2$).

6. La calibración del modelo RAMMS para flujo de detritos se puede realizar exitosamente a partir de una filmación de un evento histórico, en el caso del presente trabajo se utilizó un video que captó el descenso del huayco en un tramo de su recorrido. Además de este tipo de información la calibración se realiza a partir de datos tomados en campo; los cuales permitieron generar los datos de la altura de calado del huayco, caudal del flujo y el volumen de material transportado por el huayco.
7. Los depósitos de materiales localizados en la parte media de la cuenca, tienen características similares en cuanto a su densidad (1.7 y 1.73 g/cm^3) y fricción de corte directo (0.2 y 0.13).

Objetivo secundario 2: Simular eventos de flujo de detritos a través del modelo RAMMS: Debris Flow en la quebrada los Cóndores para diversos periodos de retorno.

8. Se simuló los flujos de detritos mediante el modelo RAMMS: Debris Flow en la quebrada Los Cóndores, para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 50 y 100 años, para los cuales se determinaron las áreas de afectación en hectáreas de 65.55, 90.26, 108.48, 116.5 y 119.07 respectivamente.
9. El modelo RAMMS:Debris Flow, se confirma como una herramienta capaz de simular con notable precisión los flujos de detritos.
10. Para que el modelo brinde información precisa y ajustada a la realidad también necesita de información precisa, especialmente el Modelo Digital de Elevaciones, el cual debe tener una resolución espacial mayor a 5 metros.
11. Las imágenes del satélite PeruSAT-1, del gobierno peruano se confirman como una herramienta de gran utilidad para la obtención de información de alturas en un Modelo Digital de Elevaciones con una resolución de hasta 0.7 metros.

Objetivo secundario 3: Proponer una metodología para realizar el análisis del riesgo del flujo de detritos en la quebrada Los Cóndores.

12. La investigación permitió delinear una metodología para el análisis del riesgo por flujo de detritos mediante el modelo RAMMS: Debris Flow. Esta metodología es aplicable en las quebradas que tienen riesgo por flujo de detritos.

VI. RECOMENDACIONES

1. Usar este análisis del riesgo por flujo de detritos para la gestión del riesgo en la zona de estudio, actualizando los cambios que se hayan dado en la cuenca después del presente estudio, tales como la consideración de muros de contención en la parte alta o una futura urbanización.
2. En las cuencas que tienen el riesgo por flujo de detritos, se recomienda la instalación de un sistema de monitoreo de flujo de detritos que funcionen durante los meses de ocurrencia de lluvias, entre enero y abril; para tener información para la calibración de los modelos de huaycos.
3. Usar modelos digitales de elevación de alta resolución en el modelo RAMMS::Debris Flow para generar información confiable. En este sentido, se recomienda utilizar la información del satélite PeruSAT-1 que es totalmente libre para las investigaciones en las universidades e instituciones públicas, para lo cual es recomendable elegir las imágenes con menor nubosidad captada.
4. Seguir investigaciones en esta línea de estudio, para tener un banco de información de referencia regional en las cuencas del Perú, y así realizar una correlación entre el volumen del flujo de detritos, el caudal del flujo de detritos, el valor de la lluvia relacionada a dicho flujo de detritos, y así tener un estudio más robusto en las cuencas que cada año sufren los estragos de este tipo de eventos.
5. Los parámetros hallados no son necesariamente aplicables a otras cuencas aledañas a la zona de estudio, estos deben ser determinados para cada cuenca y para cada depósito encontrado dentro de la cuenca de estudio; pues incluso los depósitos de detritos pueden variar dentro de la misma cuenca.
6. Para la toma de muestras de suelo para los ensayos de la mecánica del suelo, realizarlas dentro del estrato superior del terreno, hasta una profundidad recomendable de 30 centímetros; esto pues el material que conforma el flujo de detritos proviene de los estratos superiores del terreno.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Autoridad Nacional del Agua. 2010. Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac. Volumen I. 185-200.
2. Bartelt, P; Buehler, Y; Christen, M; Deubelbeiss, Y; Graf, C; McArdell, B; Salz, M. 2013. User Manual v1.5 Debris Flow. A numerical model for debris flows in research and practice. WSL
3. COEN. 2017. Boletines informativos de emergencias del N° 45 al 100.
4. Cornejo, D.; Gómez, M.; Narro, A.; Hidalgo, R.; Sanchez, M.; Quisca, S. 2018. Estudio experimental de la dinámica de flujos de huaycos en una quebrada de alta pendiente. XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica Buenos Aires, Argentina, septiembre de 2018. Trabajos Completos. 2173-2180
5. Coronel, A., Cumsille, P., Quezada, R. 2010. Un método numérico híbrido para capturar los choques en leyes de conservación escalares. Revista Integración [en línea], 28 [Fecha de consulta: 22 de octubre de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=327028436003>> ISSN 0120-419X
6. Dataset: ALOS, 2011-03-31, Hi-Res Terrain Corrected (297.29 MB); Includes Material © JAXA/METI 2011-03-31. Accessed through ASF DAAC, <https://www.asf.alaska.edu> 25/01/2018. DOI: 10.5067/Z97HFCNKR6VA
7. Duque Escobar, G., 2016. Manual de geología para ingenieros, Cap. 16
8. Fonseca, R. 2010. Aplicación de Membranas Flexibles para la Prevención de Riesgos Naturales. Cap. 3. 55-70.
9. Frank, F., McArdell, B. W., Oggier, N., Baer, P., Christen, M., & Vieli, A. 2017. Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model. Natural Hazards and Earth System Science, 17(5), 801-815. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-801-2017>
10. Gutiérrez, M. 2008. Geomorfología. Pearson Educacion. 1-17.

11. Highland, L. 2004. Landslide Types and Processes. USGS.
12. Hirschmuller, H. 2007. Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE. 328 – 341. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166
13. Jakob, M.; Hungr, O. 2005. Debris-flow hazards and related phenomena. Springer-Praxis books in geophysical sciences.
14. Municipalidad de Chaclacayo. 2012. Informe del huayco ocurrido el 05 de abril en la quebrada Los Condores, Chaclacayo, y acciones realizadas.
15. Nuñez, S., Villacorta, S., HUarez, C. 2015. Informe técnico N° A 6680 Evaluación Geodinámica de los flujos de detritos del 23/03/2015 entre las quebradas Rayos de Sol y Quirio (Chosica) y Cashahuacra (Santa Eulalia). INGEMMET.
16. Oto Mir, A. 2007. Estudio experimental de corrientes detríticas. Universidad Politécnica de Cataluña.
17. Raïmat, C., Riera, E., Graf, C., Lusi Fonseca, R., Fañanas, C., Hürlimann, M. 2013. Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el Barranc de Portainé. A: Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. "VIII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables". Palma de Mallorca: Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). 1131-1144.
18. Rickenmann, D. 1999. Empirical Relationships for Debris Flows. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
19. SENAMHI. 2017. Avisos hidrológicos.
20. Suarez, J. s.f. Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico (en línea). Bucaramanga, Colombia. 173-208. Consultado 25 set. 2018. Disponible en <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
21. Sepúlveda, A., Patiño, J. y Rodríguez, C. 2016. Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia: caso Útica, Cundinamarca, Colombia. Obras y Proyectos 20. 31-43.
22. Schraml, K., Thomschitz, B., McArdeell, B., Graf, C., Hungr, O., & Kaitna, R. 2015. Modeling Debris-Flow Runout Pattern on a Forested Alpine Fan with Different Dynamic Simulation Models. In G. Lollino, M. Arattano, M. Rinaldi, O. Giustolisi, J.

C. Marechal, & G. E. Grant (Eds.), Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3. River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources (pp. 1673-1676). https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_297

23. Takahashi, T. 2014. Debris Flow. Mechanics, prediction and countermeasures. 2da edición. Taylor & Francis Group. 1-36.
24. Tarbuck, E., Lutgens, F. 2005. Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. 8va edición. Pearson Education. 5-9
25. Valdés-Pineda, R., Valdés, J. B., García-Chevesich, P. 2017. Mudflow Modeling in the Copiapó Basin, Chile. Ingeniería del agua, 21(2), 135-152.
26. Villacorta, S., Nuñez, S., Huarez, C. 2015. Evaluación geodinámica de los flujos de detritos del 23-03-15 en el distrito de Lurigancho – Chosica. INGEMMET. 157-160.
27. Wendeler, C. 2016. Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents – Basic Principles for Planning and Calculation of Flexible Barriers. WSL Ber. 44: 279 pp.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Mapas de escenarios de riesgo

1.1 Escenario 1

1.2 Escenario 2

1.3 Escenario 3

1.4 Escenario 4

1.5 Escenario 5

