



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



ASPECTOS GEODINÁMICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS DE DETRITOS EN LA QUEBRADA ZÁPARO (Distrito de Pacocha - Provincia de Ilo – Región Moquegua)

Informe Técnico N°029-2021/IGP CIENCIAS DE LA TIERRA SÓLIDA



Lima – Perú
Octubre, 2021

Instituto Geofísico del Perú

Presidente Ejecutivo: Hernando Tavera

Director Científico: Edmundo Norabuena

Informe Técnico

Aspectos Geodinámicos y Simulación Numérica de flujos de detritos en la quebrada Záparo
(Distrito de Pacocha - Provincia de Ilo – Región Moquegua)

Autores

Mariana Vivanco

Gustavo Namay

Hector Lavado

Keiko Moroccore

Mijael Berduzco

Juan Carlos Gómez

Este informe ha sido producido por el Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
Teléfono: 51-1-3172300

**ASPECTOS GEODINÁMICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE
FLUJOS DE DETRITOS EN LA QUEBRADA ZÁPARO**

(Distrito de Pacocha - Provincia de Ilo – Región Moquegua)

Lima – Perú
Octubre, 2021

RESUMEN

El 23 de enero de 2020, en el distrito de Pacocha ubicado en la provincia de Ilo, región Moquegua, ocurrió un huaico como producto de las precipitaciones pluviales excepcionales producidas en la cabecera de la quebrada Záparo. Estos flujos de detritos afectaron a la urbanización Ciudad Jardín, calles e infraestructuras de uso recreativo (piscina, áreas recreativas, canchas de gras sintético y loza deportiva) asentados en la zona de desembocadura de la quebrada.

En este escenario, se realizó la evaluación geológica en la quebrada Záparo y sus inmediaciones, llegándose a identificar y delimitar los depósitos generados por la ocurrencia de flujos de detritos antiguos y recientes. Asimismo, en la parte media y alta de la quebrada Záparo, se reconocieron volúmenes considerables de materiales disponibles y susceptibles para la generación de futuros flujos de detritos (aproximadamente 157 717 m³).

Utilizando la técnica de simulaciones teóricas y escenarios de lluvias extremas de 23.4 mm, se generaría un caudal máximo de flujo de 54.31 m³/s, que afectaría directamente a 45 hectáreas urbanizadas del distrito de Pacocha, además de las vías Av. Costanera Norte y Casuarinas.

CONTENIDO

RESUMEN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- Ubicación

1.2.- Hidrografía

1.3.- Metodología

2.- GEODINAMICA SUPERFICIAL

2.1.- Geomorfología

2.2.- Geología

2.3.- Geodinámica

2.3.1.- Procesos fluvio-aluviales

2.3.2.- Aspectos hidrológicos

3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

PLANOS

Plano 01: Ubicación

Plano 02: Geomorfología

Plano 03: Geología

Plano 04: Geodinámica

1.- INTRODUCCIÓN

La Universidad Nacional de Moquegua, en coordinación con el Instituto Geofísico del Perú (IGP), establecieron un convenio específico de colaboración para desarrollar el proyecto “Geodinámica de los flujos de detritos en la quebrada Záparo que afectan la seguridad física del distrito de Pacocha” ubicado en la provincia de Ilo, región Moquegua”. Para cumplir con los términos del convenio se realizó la inspección geodinámica en la quebrada Záparo a fin de determinar el comportamiento dinámico de los flujos de detritos y generar escenarios de inundación que permitan identificar las zonas e infraestructura física que estarían expuestas a daños o pérdidas.

Para la zona de estudio (COEN – INDECI, Reporte complementario N° 2076-10/09/2019), el 08 de setiembre del 2019 se produjo un huaico en la quebrada Záparo que causó daños a las viviendas asentadas en zonas aledañas y produciendo la pérdidas de vidas humanas (03 personas heridas, 01 persona fallecida). Este huaico que se generó producto de las fuertes precipitaciones pluviales, afectó 01 km de la carretera asfaltada vía Ilo-Arequipa (altura km 224). Asimismo, en el Informe “Evaluación de peligros geológicos por flujos de detritos (huaicos) en la quebrada Záparo” elaborado por Ingemmet en el año 2020, se indica que los factores condicionantes para la presencia de flujos son la litología de la zona, las pendientes de las laderas de las quebradas (entre 40° y 60°), la erosión que aporta material al cauce de la misma y la morfología de la zona. Asimismo, se indica que el factor desencadenante de los flujos en la quebrada Záparo son las precipitaciones extraordinarias ocurridas en la cuenca media-alta de la quebrada. En este escenario, la quebrada Záparo es considerada de Peligro Alto y zona crítica por huaicos.

El flujo de detritos ocurrido el 23 de enero del año 2020 fue generado por precipitaciones del orden de 18 mm (datos tomados de EOS – Earth Observatory System), llegando a formar flujos con un volumen de 700 mil metros cúbicos (Figura 1). Considerando que gran parte del área urbana del distrito de Pacocha se asienta en el cauce actual y antiguo de la quebrada Záparo, el huaico afectó viviendas, parques, calles, entre otros.

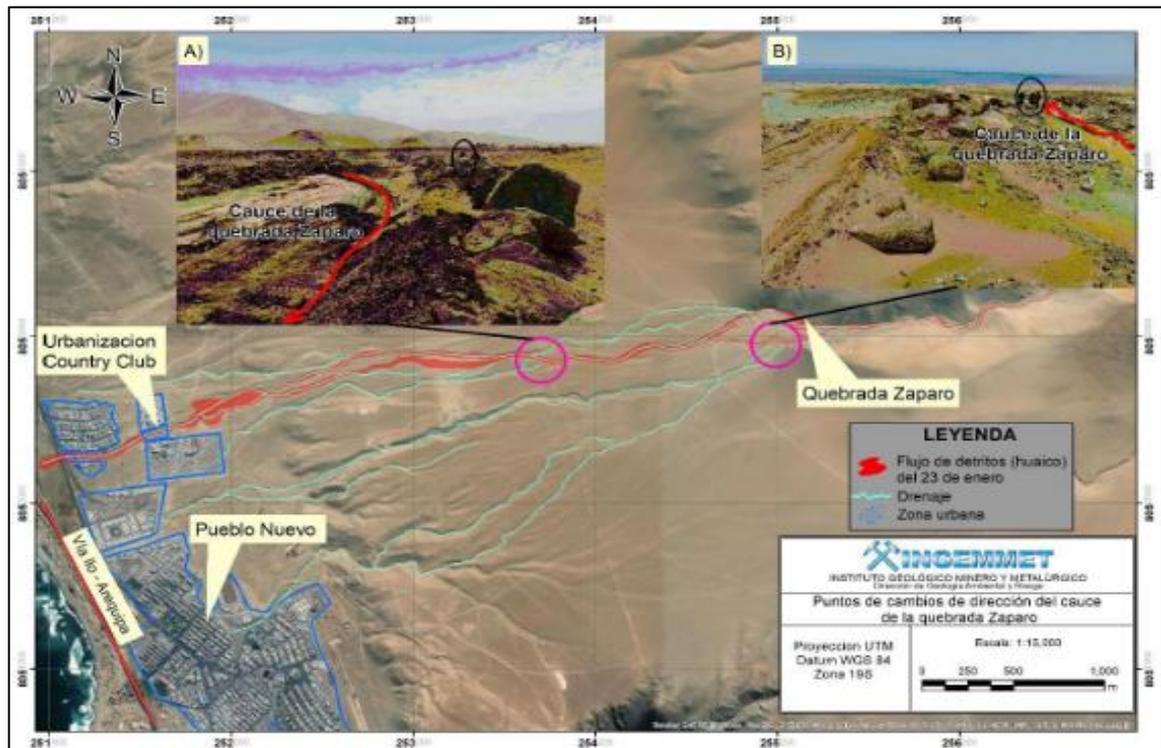


Figura 1: Flujo de detritos ocurrido el 23 de enero del 2020. Se identifican los diques provisionales (montículos de arena) en círculos morados que han cambiado la dirección del flujo (INGEMMET 2020).

El presente estudio tiene como objetivo el determinar el máximo evento de flujo de detritos que puedan ocurrir en la quebrada Záparo, en base a la identificación de paleo eventos (eventos antiguos) y eventos actuales (flujo del 23/01/2020), que podrían afectar las infraestructuras asentadas en la desembocadura de la quebrada.

La información citada en el presente informe contribuirá en los planes y acciones de la gestión del territorio, para reducir el riesgo ante la ocurrencia

y/o activación de eventos geodinámicos tipo flujos de detritos en la quebrada Záparo.

1.1.- Ubicación

La quebrada Záparo se ubica en el distrito de Pacocha, en la provincia de Ilo y región Moquegua (Figura 2 y Plano 1). El área de estudio abarca aproximadamente 20,026 hectáreas comprendida entre las coordenadas 257749 E-8055635 N (cima de la quebrada) y 251039 E – 8052260 N (parte baja-Loza de frontón). Actualmente, el curso principal de la quebrada Záparo se encuentra dentro de áreas concesionadas por la empresa Southern Perú.

El acceso al área de estudio, se realizó desde la ciudad de Ilo en dirección al norte por vía asfaltada hasta la zona denominada como Ciudad Nueva (Pacocha), para luego ingresar por un puesto de seguridad de la empresa Southern Perú y desarrollar un recorrido aproximado de 5 km.

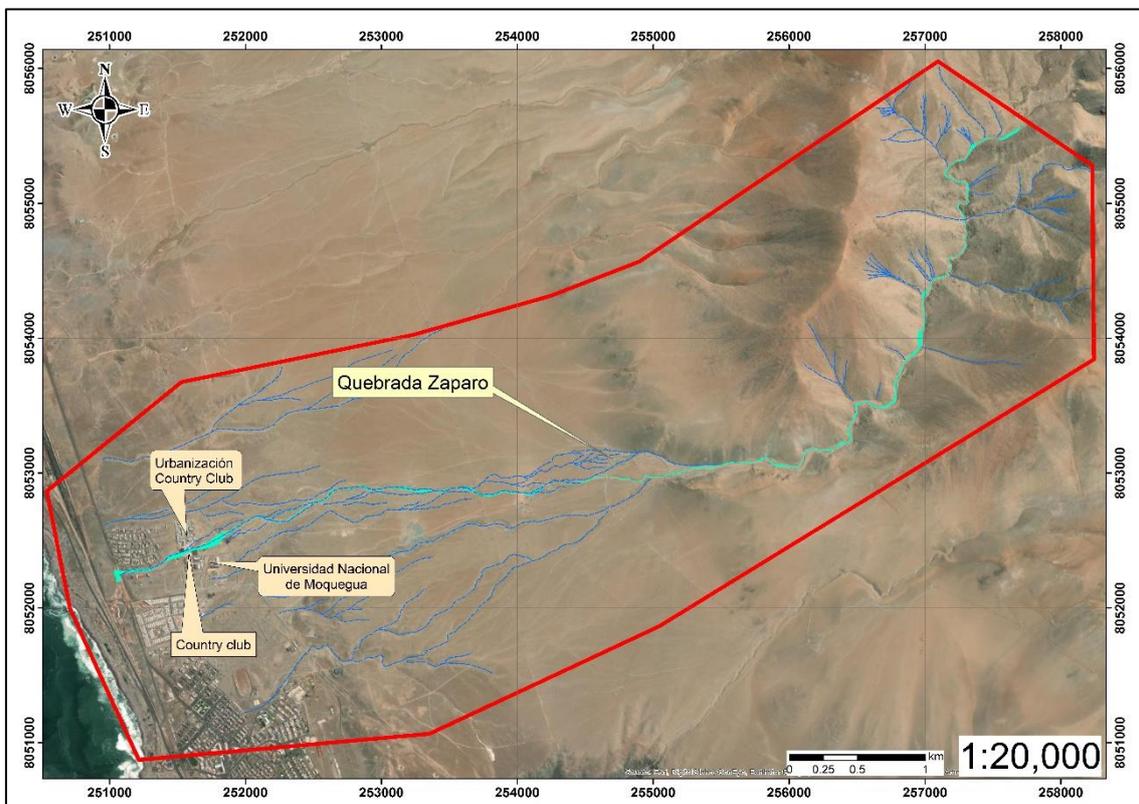


Figura 2: Área de estudio (polígono rojo) en la quebrada Záparo-Ilo, Moquegua.

1.2.- Hidrografía

La microcuenca de la quebrada Záparo se encuentra ubicada hidrológicamente en la intercuenca 13173 (ANA) con un área aproximada de 20 km² y una longitud total del cauce de 17 kilómetros. Presenta un relieve accidentado y un desnivel aproximado de 974 metros. La pendiente promedio de la cuenca es de 26.61° y una pendiente media promedio en el cauce de 9.27°, favoreciendo así, a la formación de flujos de lodo.

1.3.- Metodología

El desarrollo del presente estudio fue necesario considerar dos etapas, siendo sus características las siguientes:

Gabinete: Consistió en la ejecución de actividades que incluyeron la revisión de imágenes satelitales WorldView-2 (con resolución 0.5 m del servidor Digital Globe, año 2010) para delimitar la zona de estudio y la recopilación de información geológica regional y local existente (boletines geológicos, informes técnicos, entre otros).

Campo: Consistió en la obtención de datos topográficos usando drones y la toma de datos batimétricos en el cauce principal de la quebrada Záparo. Asimismo, exploraciones geotécnicas (calicatas) para determinar las propiedades mecánicas de los suelos, que sumados permitieron construir los mapas topográficos, geomorfológicos, geológicos y geodinámicos- Esta información es primordial para la generación de escenarios para futuros flujos de detritos

Finalmente, la información revisada en gabinete, así como la obtenida en campo y resultados de laboratorio, fueron procesadas y analizadas para la elaboración del presente informe.

2.- GEODINÁMICA SUPERFICIAL

A continuación se describen las geoformas y unidades litoestratigráficas que afloran en el área de estudio y su relación con la quebrada Záparo y las zonas que fueron afectadas por el tipo flujos de detritos en el mes de enero del 2020.

2.1.- Geomorfología

Los tipos de relieve identificados en el área de estudio, son el resultado de su evolución geológica con la ocurrencia de procesos endógenos como la orogénesis (formación de cordilleras), fragmentación, tectónica de placas, vulcanismo (principal proceso formador de las rocas y sus relieves específicos) y eventos sísmicos. Asimismo, los procesos exógenos (agua, gravedad, viento, corrientes fluviales, antrópicos) considerados como los agentes modeladores de la superficie. Las principales elementos geomorfológicos identificados en la zona de estudio son (Plano 02):

- **Ladera de Montaña:** Forma parte de las estribaciones andinas con topografía accidentada y elevaciones superiores a 1000 m. Geológicamente, están compuestas por rocas del Cretáceo de naturaleza ígnea, tales como granodioritas y dioritas, que se encuentran altamente erosionadas (fracturadas y diaclasadas), y depositadas en la ladera de las montañas; por lo tanto, constituyen un volumen de material importante disponible ante la ocurrencia de un flujo de detritos (Figura 3). En esta parte del área de estudio, la quebrada Záparo presenta encañonamiento o cauce angosto.

- **Abanico aluvial:** Esta geoforma es el resultado de la acumulación de escombros conformados por bloques, clastos y gravas de origen ígneo en matriz areno-limosa transportados por un torrente estacional. Su dinámica está relacionada por el arrastre en un medio acuoso y la gradiente por la cual se desplazan (Figura 4).



Figura 3: Laderas de montaña (interlineado amarillo) donde se observa la presencia de un alto grado de meteorización.



Figura 4: Abanico aluvial en la quebrada Záparo.

En el área de estudio, el abanico aluvial presente en la zona de baja pendiente (zona semi-plana) se encuentra disectado por cauces antiguos inactivos y cauces recientes estacionales (se activan en épocas de precipitaciones). En Enero del 2020, el curso principal de estos cauces se activó afectando instalaciones del Country Club y una losa deportiva; ambos ubicados en el mismo cauce.

- **Terraza aluvial:** Son plataformas que presentan desnivel con respecto al lecho fluvial (cauce) y que abarcan de manera continua poca a gran longitud. Las terrazas son formadas por la dinámica

erosional y depositacional de un flujo acuoso y/o semi acuoso que transportan sólidos y/o bloques en suspensión en un cauce,

En la quebrada Záparo, se han delimitado terrazas aluviales en la parte alta que deben su origen a procesos de denudación (erosión) y deposición de suelos producto de la ocurrencia de flujos detritos (Figura 5). Asimismo, en la parte media-baja de la quebrada, estas geofomas constituyen el abanico aluvial descrito líneas arriba con desniveles de 1 a 5 metros.

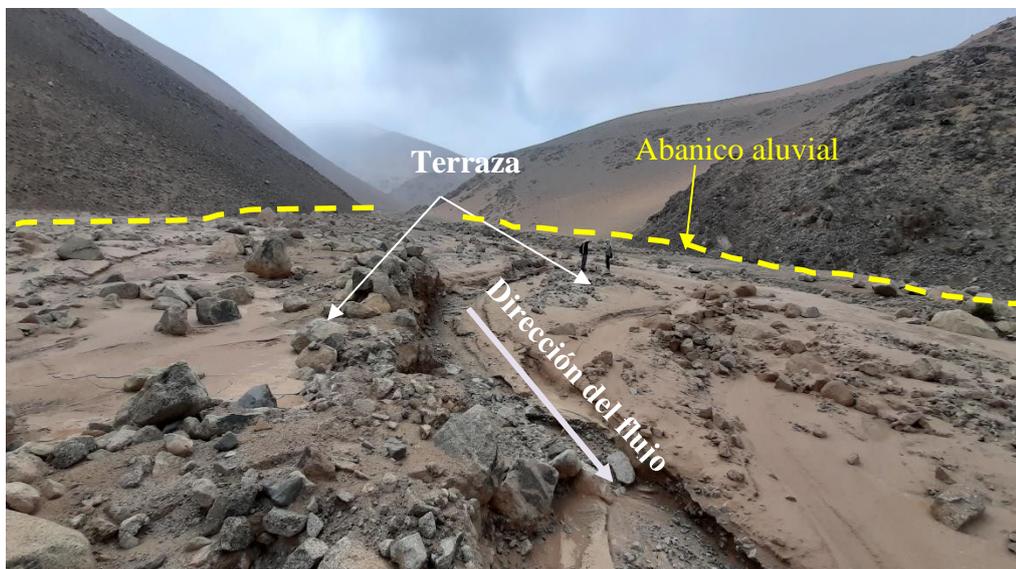


Figura 5: Las terrazas en la quebrada Záparo forman parte del abanico aluvial en el área de estudio.

- **Lecho (cauce) aluvial:** Es el canal natural por el cual discurren y/o transportan flujos de detritos en épocas de precipitaciones estacionales. En la quebrada Záparo se ha identificado un cauce principal en dirección Este – Oeste de recorrido semi-recto y cauce angosto que no llega a desembocar al mar (Figura 6). En esta geofoma, se encontró evidencias del paso del último flujo de detritos ocurrido en enero del 2020 y que afectó la infraestructura física del Country Club y su losa de deportiva.



Figura 06: Lecho aluvial identificado en la quebrada Záparo.

- **Paleo cauces (cauces inactivos):** Es el canal natural por el cual discurren y/o transportan flujos de detritos que tuvieron actividad en épocas pasadas. En el área de estudio se ha identificado que estas geoformas se encuentran disectando gran parte del abanico aluvial y que no presentan registro de flujos recientes y por ello, sus cauces están cubiertos por arenas eólicas.

2.2.- Geología

La geología estudia la tierra, los materiales que la componen, las estructuras y procesos que actúan sobre y debajo de la superficie a lo largo de millones de años desde su origen hasta la actualidad. La litología como parte de la geología, estudia las características físicas de las rocas y los depósitos de materiales que constituyen una unidad lito-estratigráfica. En general, los tipos de rocas han sido originados por procesos internos (tectónica de placas, ascenso de magma, entre otros), la erosión, transporte y depositación de rocas preexistentes (proceso de meteorización).

Las rocas aflorantes que conforman el basamento rocoso en el área de estudio, son granodioritas con contenido de horblendas pertenecientes al Jurásico Superior y están presentes aguas arriba de la quebrada Záparo. Suprayaciendo a estas, se encuentran los depósitos cuaternarios de edad

Holocena y Pleistocena, conformados por materiales de origen aluvial (Plano 3).

.- Súper Unidad Ilo: Son rocas de origen ígneo conformados por granodioritas con horblenda y dioritas que presentan una edad aproximada de 112 millones de años (Beckinsale et al, 1985). En la quebrada Záparo, las rocas de esta unidad están presentes en la parte alta del área de estudio, específicamente en la zona de ladera de montaña con un alto grado de fractura y diaclasamiento (Figura 7).



Figura 7: Rocas tipo granodiorita pertenecientes a la Super Unidad Ilo, identificadas aguas arriba de la quebrada Záparo.

Depósitos aluviales: Están conformados por gravas, clastos, subangulosos a subredondeados de origen ígneo envueltos en matriz arenosa de grano medio a grueso. Estos materiales se encuentran conformando el abanico aluvial presente en la quebrada Záparo con espesores de hasta 6 metros. Sobre estos depósitos se asientan nuevas infraestructuras físicas como la Urbanización Country club, Country Club e instalaciones de la Universidad Nacional de Moquegua (Figura 8).



Figura 8: Depósitos aluviales producto de la dinámica de los flujos de detritos anteriores.

2.3.- Geodinámica

Comprende todos aquellos eventos producto de la interacción de procesos geológicos (internos y externos) que originan cambios físicos, químicos y/o morfológicos y que dan como producto eventos que modifican el actual relieve. Es importante indicar que el análisis de factores como la litología permite explicar el origen de los materiales que constituyen las geoformas (colina, lomas, entre otras) y en las cuales se generan procesos como la meteorización y erosión, ya que ambos contribuyen a la ocurrencia de eventos geodinámicos. Estos procesos se dividen en: Procesos de geodinámica interna (relacionado a la ocurrencia de sismos, principales detonantes de caídas de rocas, derrumbes y deslizamientos) y procesos de geodinámica externa (relacionados a la meteorización y erosión). La acción conjunta o por separado de estos eventos, dan origen a los procesos externos que favorecen a la ocurrencia de los eventos geodinámicos que, según su rigen, se dividen en fluvio-aluvial e hidrogravitacional.

2.3.1.- Procesos Fluvio-aluviales

Los procesos de erosión (carcaveo, incisión y desgaste laminar) son originados por las precipitaciones que se presentan en la cuenca fluvial dando origen a las escorrentías superficiales que arrastran progresivamente

los materiales a posiciones de menor pendiente. La carga de sedimentos transportados por la quebrada o río incrementan la acción erosiva y son capaces de producir remoción de los materiales (Brusi, 2013) como los flujos de detritos e inundación. Los eventos geodinámicos originados por procesos pluviales y que podrían afectar y podrían volver a afectar la zona de estudio, son descritos a continuación:

Flujos de detritos (huaycos): Son movimientos de materiales sin cohesión (materiales sueltos) que se comportan como fluidos a causa del agua (provoca pérdida total de la resistencia de estos materiales) y por ello, se desplazan sin presentar superficies de rotura definida, en algunos casos depositan sus materiales en forma de conos de deyección (Figura 9).

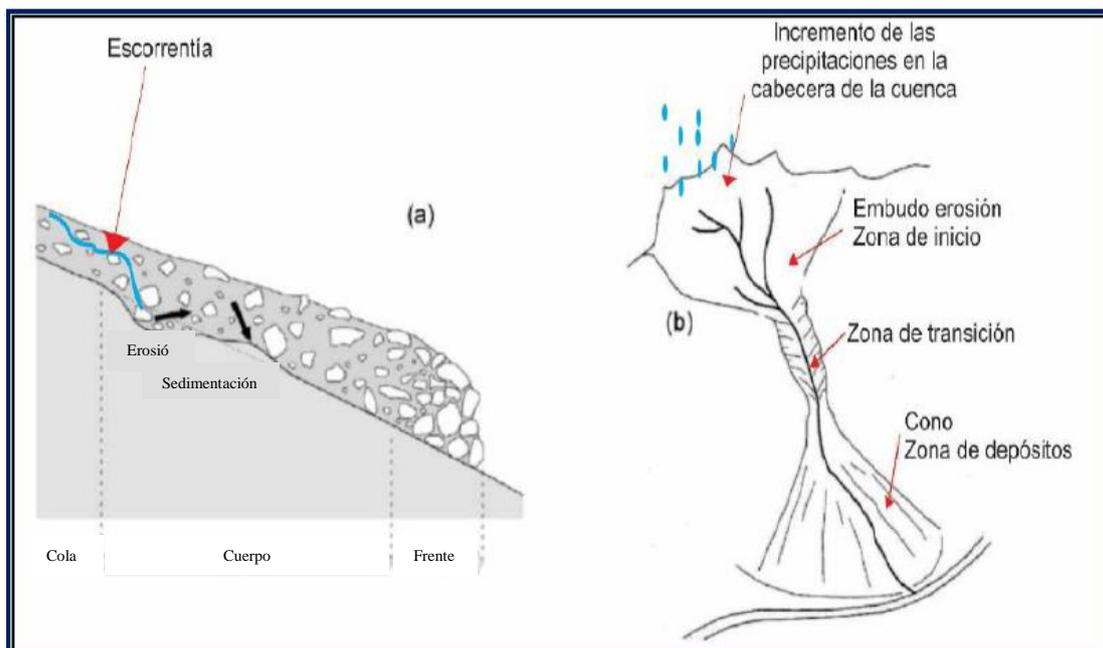


Figura 09: a) Proceso de erosión por las aguas de escorrentía y acumulación de materiales. b) Vista frontal de la cuenca y desarrollo del evento en la cabecera de la cuenca por incremento de las precipitaciones, zona de transición de material y la depositación de material. Modificado de Bateman et al. (2006).

Estos eventos ocurren, principalmente, confinado a un canal o cauce con pendiente pronunciada. Se inician como uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce de canales de pendientes fuertes.

Los flujos de detritos incorporan gran cantidad de material saturado en su trayectoria al descender por el canal, finalmente los materiales se depositan en forma de abanicos.

En la microcuenca de la quebrada Záparo, se han identificado flujos de detritos antiguos y recientes (enero 2020) como producto de las concentraciones de las precipitaciones en la parte alta de la quebrada Záparo (Figura 10, Plano 4).

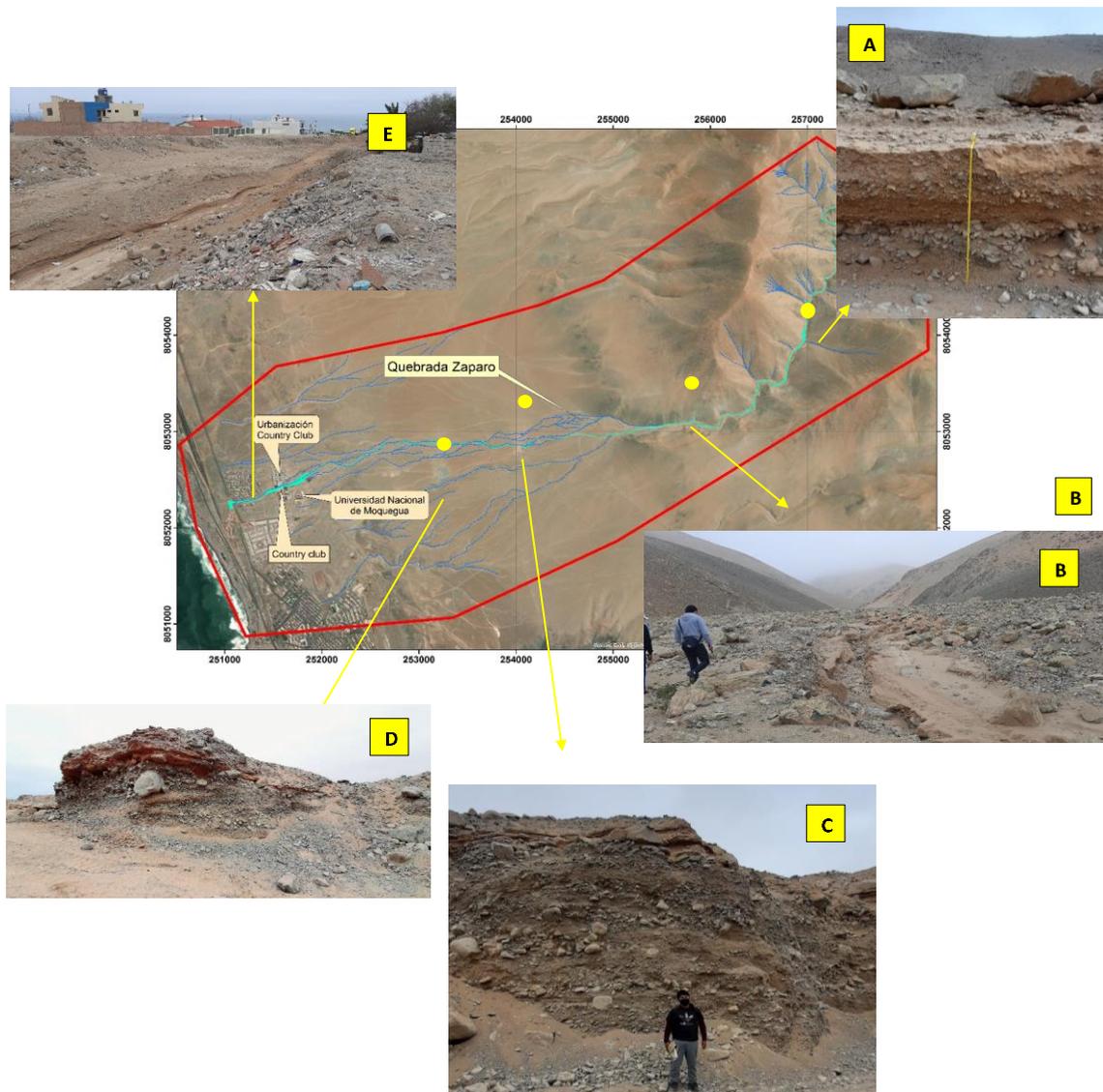


Figura 10: Identificación de flujos recientes y antiguos en la quebrada Záparo.

Para describir las evidencias de flujos de detritos identificadas en campo (Figura 10), se ha tomado en cuenta la relación del flujo de lodo en función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 1985), Tabla 1.

Tabla 1: Relación del flujo de lodo en función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 1985).

| Descripción del Tipo de Flujo | Concentración de Sedimentos | | Características del Flujo |
|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|---|
| | En Volumen | En Peso | |
| Deslizamientos | 0.65 – 0.80 | 0.83 – 0.91 | No hay flujo, falla por deslizamiento de bloques. |
| | 0.55 – 0.65 | 0.76 – 0.86 | Derrumbe bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar. |
| Flujos de lodo (<i>Mudflow</i>) | 0.48 – 0.55 | 0.72 – 0.76 | Flujo evidente, deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie. |
| | 0.45 – 0.48 | 0.69 – 0.72 | Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla. |
| Avenida de lodo (<i>Mud Flood</i>) | 0.40 – 0.45 | 0.65 – 0.69 | El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente. |
| | 0.35 – 0.40 | 0.59 – 0.65 | Deposición marcada de gravas y cantos rodados; expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie. |
| | 0.30 – 0.35 | 0.54 – 0.59 | Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo. |
| | 0.20 – 0.30 | 0.41 – 0.54 | Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición inmóvil. |
| Inundación de agua | <0.20 | <0.41 | Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo. |

De acuerdo a la Figura 10, las características de los flujos identificados en la quebrada Záparo son:

Imagen (A): La imagen fue obtenida en la parte media alta de la quebrada Záparo y en ella, se diferencian dos flujos ocurridos en diferentes periodos: el de la base corresponde al más antiguo con una altura de 0.50 m, está conformado por clastos subangulosos a angulosos de origen ígneo soportados en matriz arenosa (escasa) debido a una avenida de lodo en medio acuoso. El estrato superior corresponde a un flujo de lodo más reciente (espesor de 0.90 m) debido al predominio de material fino limo-arena-arcillas como matriz y en menor proporción se denotan los clastos subangulosos a angulosos sostenido en la matriz antes descrita.

Imagen (B): Se evidencia la ocurrencia de un flujo de lodo reciente (enero 2020) conformado por materiales finos (arenas, limos y arcillas) y evidencias de poca presencia de clastos (grava sub angulosa a angulosa). Desde el fondo del cauce presenta una altura de 0.60 m.

Imagen (C): Obtenida en la parte media del cauce principal de la quebrada Záparo y en donde se evidencia la presencia del depósito de flujo corresponde a zona de canteras. Asimismo, se observa una sucesión de flujos de lodos intercalados con avenidas de lodos y presencia de gravas sub angulosas a angulosas sostenidos en matriz arenosa-limosa.

Imagen (D): Corresponde a la zona media baja de la quebrada Záparo por la zona de cantera y en ella, se evidencia la presencia de una sucesión de flujos de lodos (parte superior) conformados por materiales finos en mayor cantidad y presencia de gravas angulosas y avenidas de lodo en menor cantidad (parte inferior). Se observa bloques de diámetro aproximado de 1m suspendidos en matriz gravosa-arenosa.

Imagen (E): Obtenida de la parte final del cauce principal de la quebrada Záparo (desembocadura) y en ella, se evidencia la presencia de un flujo de lodo reciente (enero 2020) conformada por materiales finos arenas-limos-arcillas. Este flujo presenta una altura de 0.20 m desde el fondo del cauce. En este tramo, el cauce de la quebrada ha sido modificado (descolmatado y ensanchado) debido a que en enero del 2020 se produjo un flujo de lodos que afectó al Country Cclub y losa de frontón.

2.3.2.- Aspectos hidrológicos

A consecuencia de las intensas precipitaciones ocurrida en la zona de estudio el 23 de enero de 2020, se activó la quebrada Záparo con la formación de flujos de lodo en su cauce. Ese mismo día, la estación UNAM registro un valor de precipitación de 4.8 mm., siendo próximo al valor obtenido en la estación Ilo durante el periodo 1965 – 2017; es decir, de 5 mm. Considerando que esta estación se encuentra a 4 Km de la microcuenca Záparo, los valores de precipitaciones por ella registrada son usados en el analisis. Tomando una muestra temporal, el valor medio de precipitación es de 1.4 mm, aunque fue necesario considerar valores máximos probables para distintos periodos de retorno (Tabla 2).

Tabla 2: Valores máximos de precipitación probable.

| T (años) | P_{MAX} (corregida) mm |
|---------------------|---|
| 2 | 0.5 |
| 3 | 0.9 |
| 5 | 1.6 |
| 10 | 2.9 |
| 20 | 4.6 |
| 25 | 5.3 |
| 50 | 7.9 |
| 100 | 11.4 |
| 200 | 15.8 |
| 300 | 18.9 |
| 500 | 23.4 |
| 1000 | 30.9 |

Asimismo, para estimar los caudales máximos producidos en la quebrada Záparo, es necesario conocer algunas características físicas de esta, como son su área, longitud máxima del cauce y su desnivel. A continuación, los principales parámetros morfométricos utilizados para el cálculo de caudales máximos son mostrados en la Figura 11 y Tabla 3.

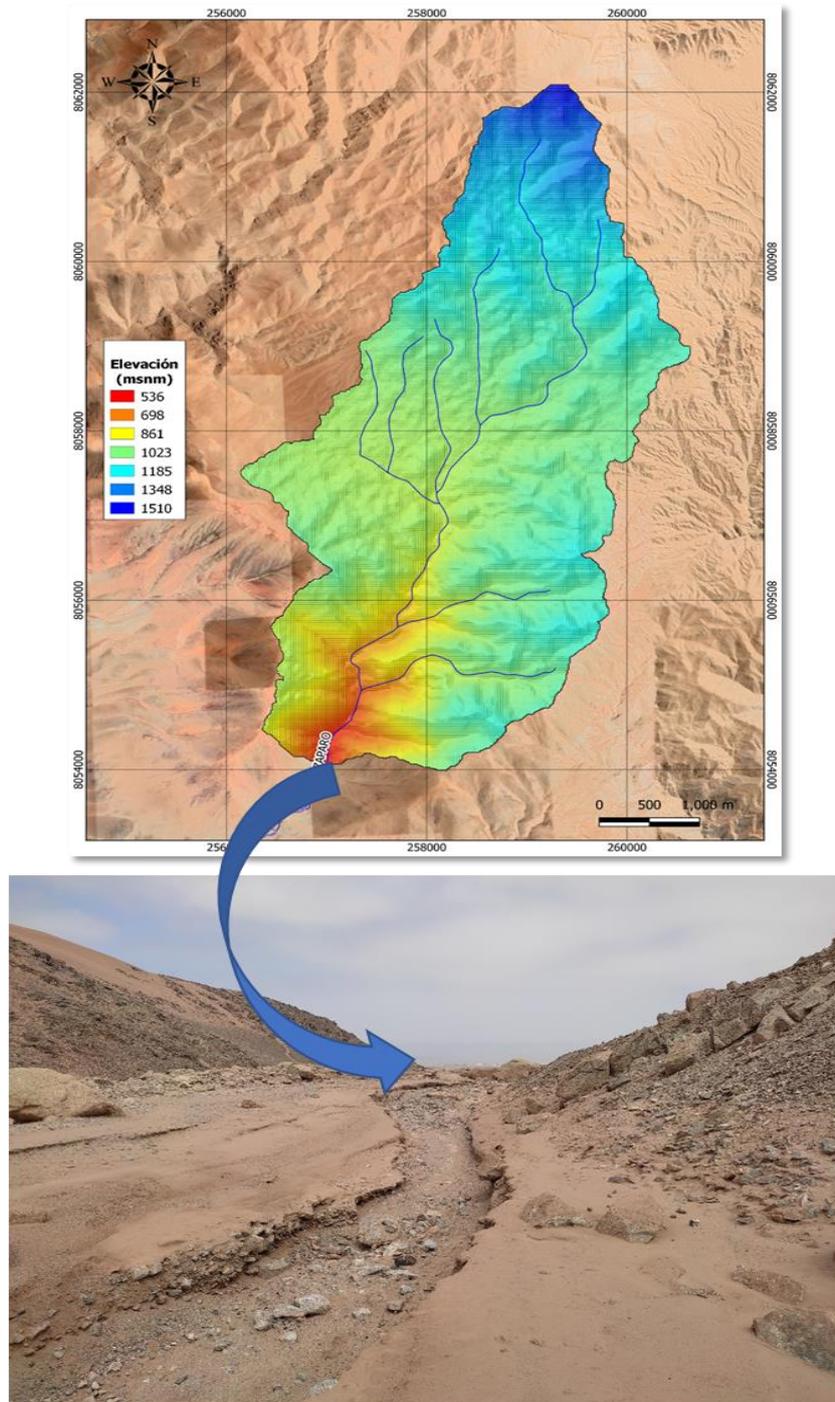


Figura 11: Elevaciones en la microcuenca Záparo y punto de descarga donde se han calculado los caudales máximos.

Tabla 3: Principales parámetros morfométricos de la microcuenca Záparo

| DESCRIPCIÓN | UND | VALOR |
|---|----------|----------|
| ÁREA | Km.2 | 20.03 |
| COTA MÁXIMA | msnm. | 1510 |
| COTA MÍNIMA | msnm. | 536 |
| LONGITUD DEL CURSO PRINCIPAL | metros. | 10706.49 |
| TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T _c) | minutos. | 62.18 |
| TIEMPO DE RETARDO (T lag) | minutos. | 37.31 |

A partir de la información morfométrica, se ha determinado valores de caudal psara periodos de retorno de 25, 300 y 500 años. El primero porque es similar al acontecido en enero del 2020 y los otros dos, porque permitirán interpretar el comportamiento de los flujos en la quebrada Záparo en escenarios de ocurrencia de eventos extremos. Asimismo, debido a la falta de información obtenida al momento de ocurrir el evento, no se ha podido determinar con exactitud la concentración volumétrica con la cual se generaron los flujos en la quebrada Záparo, sin embargo, a partir del análisis en campo de los depósitos dejados por el ultimo evento, la revisión de fotografías e interpretación de la literatura, se puede considerar que la concentración volumétrica llego a variar adimensionalmente entre 0.35 a 0.45 m³/s con respecto al volumen de flujo total (Tabla 4).

Tabla 4: Caudales máximos probable, Quebrada Záparo.

| Precipitación Desencadenante (mm) | Caudal liquido (m ³ /s) | Caudal total (m ³ /s) |
|---|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 5.3 | 7.5 | 13.63 |
| 18.9 | 26.6 | 40.92 |
| 23.4 | 35.3 | 54.31 |

3.- SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJOS

En la quebrada Záparo se realizó la simulación numérica de la dinámica de flujos hiperconcentrados sobre un tramo de 6.55 kilómetros medidos, desde la zona de desembocadura de la quebrada. Para realizar la simulación ha sido necesario considerar la siguiente información:

- Base Topográfica: La topografía utilizada en esta simulación ha sido obtenida a partir de un vuelo aerofotogramétrico con drones, llegándose a obtener una resolución espacial de 0.5 metros, es decir, existe un dato de elevación cada 0.5x0.5 metros cuadrados.
- Caudales máximos: Los caudales máximos utilizados han sido determinados a partir del uso del método de curva del SCS, utilizando como principal insumo valores de precipitación provenientes de la estación Ilo ubicada a 4 Km de la microcuenca Záparo.
- Valores de rugosidad de Manning: Los valores de rugosidad de Manning se han determinado a partir de la interpretación de imágenes satelitales y su posterior comparación con tablas propuestas por Ven Te Chow (1984).
- Parámetros Reológicos: Los parámetros reológicos como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad, fueron obtenidos de la comparación de los resultados obtenidos del análisis granulométrico de las muestras recogidas en campo, con los obtenidos por O'Brien (1984). En este caso las muestras en campo se asemejan a las correspondientes a la muestra teórica *Gleewood Sample 4*.

Para las simulaciones se consideró el software de modelamiento FLO2D, el mismo que permite resolver las ecuaciones que gobiernan la dinámica de los flujos no newtonianos. Finalmente, fue necesario establecer

condiciones de control para las simulaciones numéricas, así como los siguientes escenarios:

- *Escenario I: Simulación numérica de flujos hiperconcentrados sobre una malla computacional de resolución espacial de 2 metros, un tiempo de simulación total de 8 horas y un caudal pico de 13.63 m³/s generado con la ocurrencia de precipitaciones extremas de 5.3 mm.*
- *Escenario II: Simulación numérica de flujos hiperconcentrados sobre una malla computacional de resolución espacial de 2 metros, un tiempo de simulación total de 16 horas y un caudal pico de 54.31 m³/s con la ocurrencia de precipitaciones extremas de 23.4 mm.*

Los resultados obtenidos en la modelización son presentados en la Figura 12 y Tabla 5, siendo sus los aportes más importantes los siguientes:

- El área de inundación correspondiente a caudales máximos de 13.63 m³/s (arriba) es de 18.04 hectáreas sobre el área urbana
- El área de inundación correspondiente a caudales máximos de 54.31 m³/s (abajo) es de 45.608 hectáreas sobre el área urbana.
- En ambos casos, la afectación es mayor en vías importantes como la Av. Casuarinas y Costanera Norte.

Debido a que el Escenario I considera una precipitación de 5.3 mm, valor similar al que generó la activación de la quebrada en enero de 2020 y cercano al valor máximo registrado en los últimos 50 años por la estación Ilo (5 milímetros de lámina de agua); a continuación se realiza un análisis más detallado del escenario teórico construido para la zona



Figura 11: Alturas máximas de flujo y mancha de inundación. Escenario I: Caudal pico 13.63 m³/s (Arriba). Escenario II: Caudal pico de 54.31 m³/s (Abajo). Quebrada Záparo

Tabla 5: Cuadro resumen de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas.

| DESCRIPCIÓN | PRECIPITACIÓN DESENCADENANTE | CAUDAL (m ³ /s) | ÁREA URBANA AFECTADA | VÍAS DE COMUNICACIÓN AFECTADAS |
|--------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|--|
| Escenario I | 5.3 mm | 13.63 | 18.04 Hectáreas | <ul style="list-style-type: none"> • 374 metros en la Av. Casuarinas • 512 metros en la Av. Costanera Norte • Alturas de flujo máximas entre 8 y 17 cm |
| Escenario II | 23.4 mm | 54.31 | 45.608 hectáreas | <ul style="list-style-type: none"> • 980 metros en la Av. Casuarinas • 762 metros en la Av. Costanera Norte • Alturas de flujo máximas entre 12 y 24 cm |

En la Figura 13 se muestra una vista ampliada de las alturas máximas del flujo en las inmediaciones del Country Club de Ilo, las mismas que varían desde los 0.23 a 1.39 m afectando principalmente el campo de fútbol.

En la Figura 14, se muestra la zona próxima a la desembocadura y a los tramos viales de 512 m y 374 m, correspondientes a las Avenidas Costanera Norte y Casuarinas respectivamente, ambas afectadas por la ocurrencia de flujos.

En la Figura 15, se muestra un tramo encauzado longitudinalmente en 100 m aproximadamente (coordenadas 254910 E – 8052915 N) y en donde el escenario de inundación por flujo de detritos, sugiere la presencia de una zona de desborde hacia un cauce secundario preexistente.

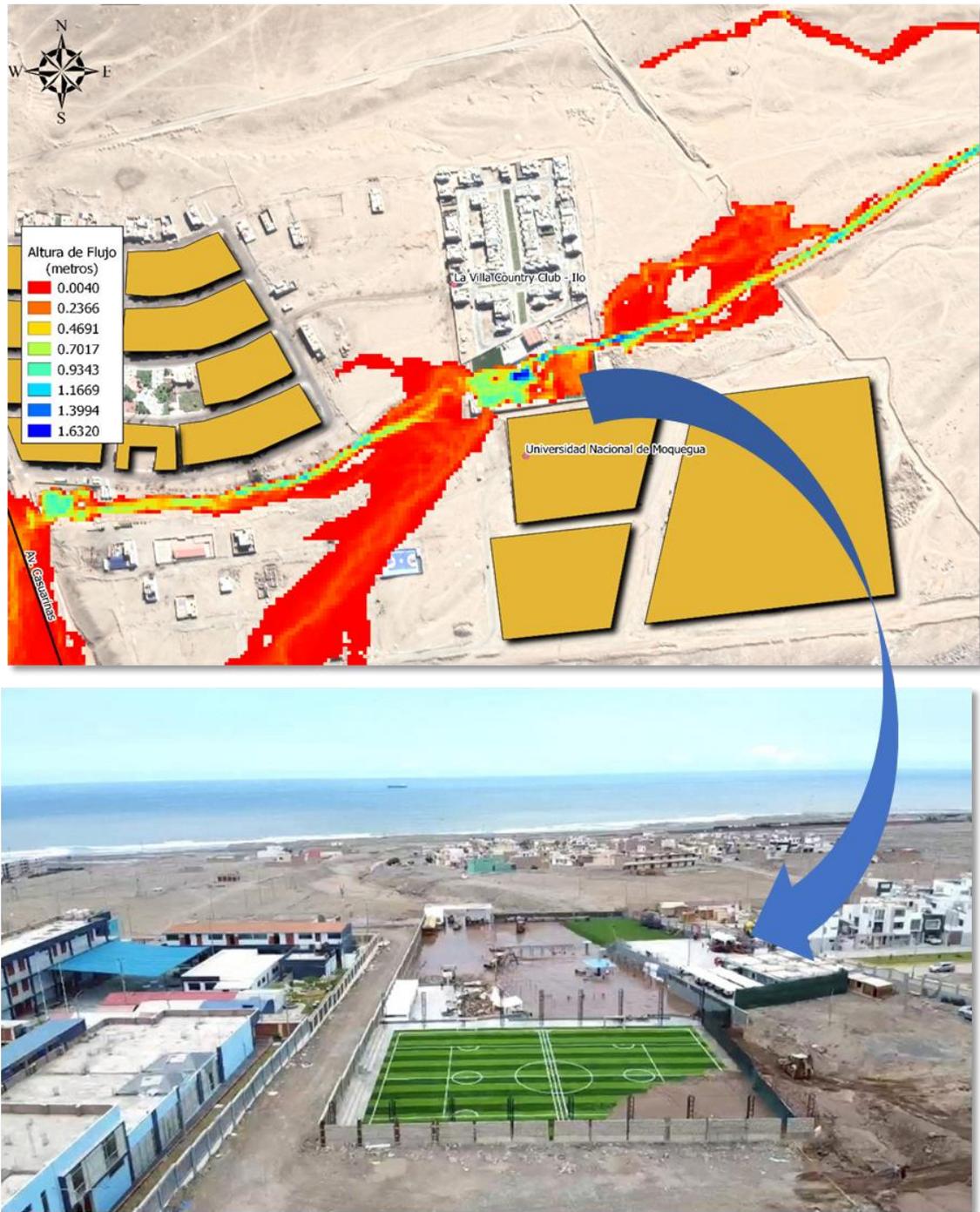


Figura 12: Vista ampliada de las alturas máximas de flujo en las inmediaciones del Country Club, Ilo.

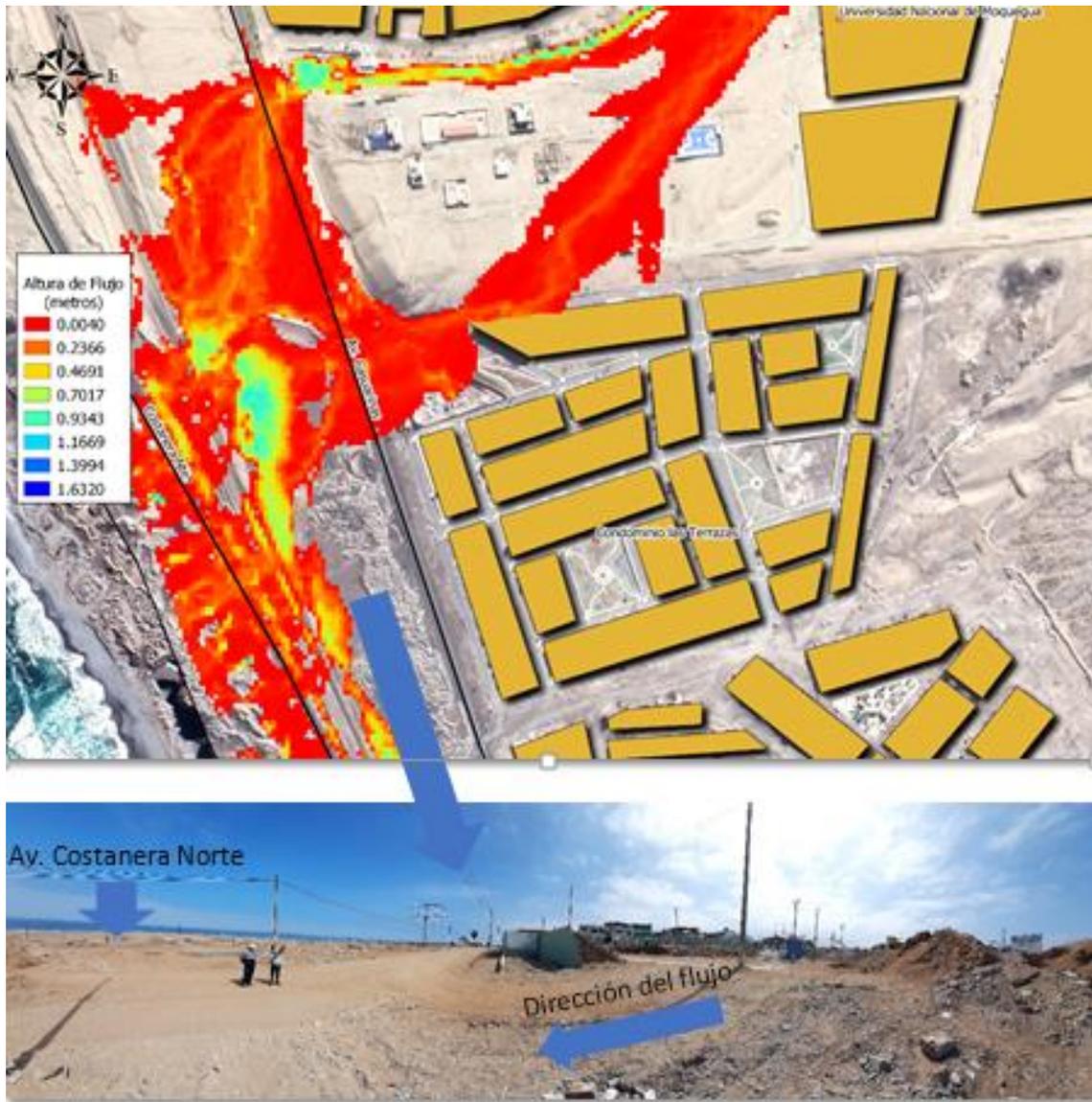


Figura 14: Vista ampliada de las alturas máximas del flujo en las inmediaciones de las Av. Casuarinas y Costanera Norte.

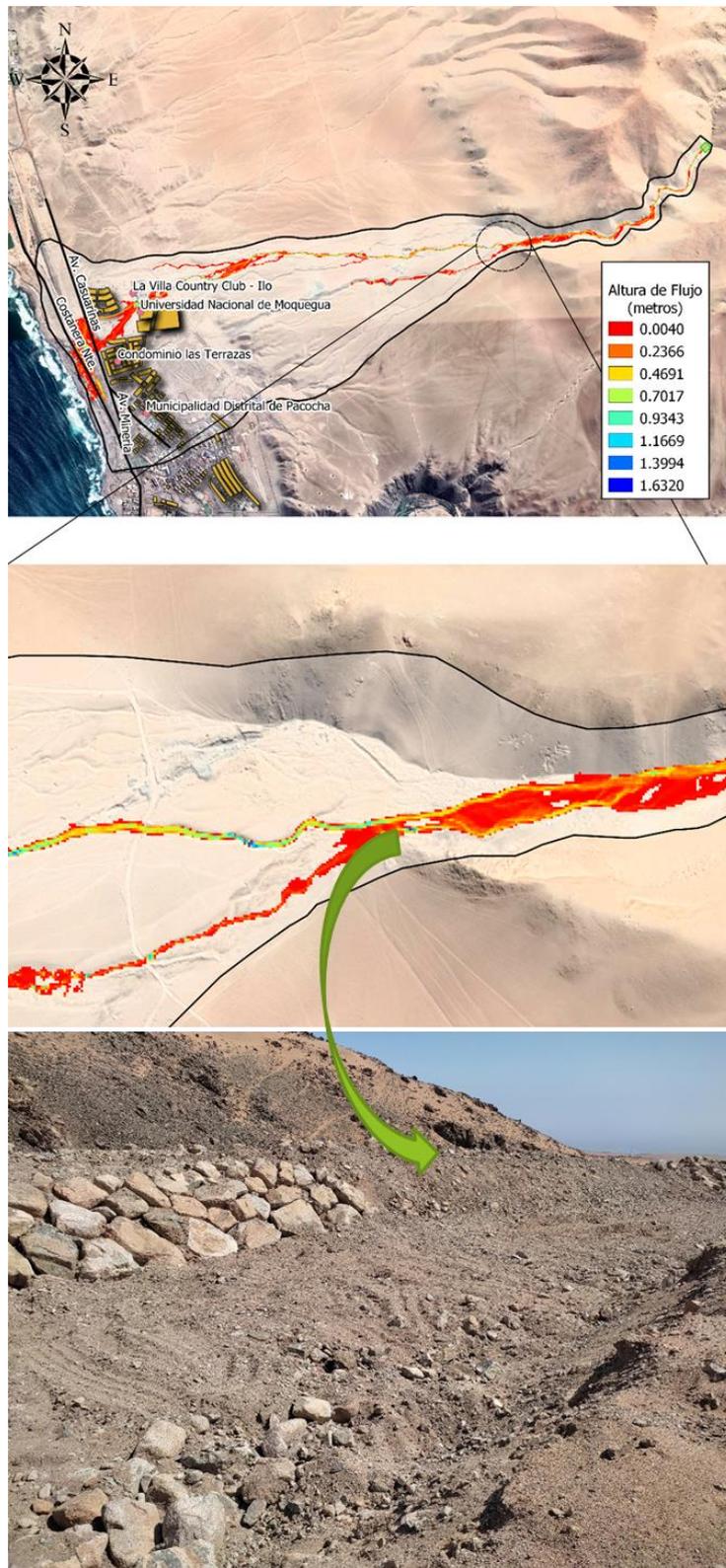


Figura 15: Vista ampliada de zona de desborde por presencia de encauzamiento artesanal en la quebrada Záparo

CONCLUSIONES

- La quebrada Záparo está conformada por cauces aluviales estacionales (activados en épocas de precipitaciones) e inactivos (paleo cauces), estos últimos cubiertos por arenas eólicas. En la parte alta de la quebrada afloran rocas de composición ígnea muy antiguas que presentan alto grado de meteorización (fracturamiento, diaclasamiento) y cuyo material se dispone en las laderas de la montaña y ante la ocurrencia de lluvias extremas, condiciona a la ocurrencia de flujos de detritos.
- La zona baja del área de estudio, donde se asientan parte de la infraestructura física del distrito de Záparo, está conformada por depósitos aluviales producto de la acumulación de materiales acarreados por los flujos de detritos antiguos. Los flujos recientes afectan a las viviendas y zonas recreacionales asentadas en la zona de estudio.
- Se estimó que el material disponible para la generación de flujos de detritos ubicados en las laderas y en el cauce de la quebrada Záparo corresponde a aproximadamente 157 717 m³.
- Ante la ocurrencia de un evento de lluvia extrema de 5.3 mm se generarían caudales máximos de flujo de 13.63 m³/s. En estas condiciones se esperarían áreas afectadas de 18.04 hectáreas en el sector urbano. Asimismo, se verían afectadas las vías Av. Costera Norte y Casuarinas en tramos de 512 y 374 metros con flujos cuyas alturas variarían entre 8 y 17 cm respectivamente.
- La ocurrencia de lluvias extremas de 23.4 mm, generaría caudales máximos de flujo de 54.31 m³/s. En estas condiciones se esperarían áreas afectadas de hasta 45.608 hectáreas en el sector urbano. Asimismo, se verían afectadas las vías Av. Costanera Norte y Casuarinas en tramos de 762 y 980 metros con flujos de alturas entre 12 y 24 cm respectivamente.

RECOMENDACIONES

- Es importante la instalación de pluviómetros automáticos que recojan información a escala horaria a fin de monitorear el comportamiento de las lluvias en la zona de estudio.

- Coordinar con el Instituto Geofísico del Perú, la instalación de un sistema de detección automática de flujo de detritos en la quebrada como medida para la reducción del riesgo por la ocurrencia de flujos en épocas de lluvias.

BIBLIOGRAFÍA

Beckinsale, R., Sanchez, A., Brook, M., Cobbing, E., Taylor, W. & Moore, N. (1985). Rb-Sr whole-rock isochron and K-Ar age determinations for the Coastal Batholith of Perú. In *Magmatism at a plate edge. The peruvian Andes*. Edited by W. Pitcher, M. Atherton, E. Cobbing, R. Beckinsale. John Wiley and Sons Inc. New York. p 177- 202.

FLO-2D Software. (2011). "FLO-2D Model Validation". Arizona, Nutrioso.

FLO-2D. (2017). "FLO-2D Reference Manual". FLO-2D Software, Inc.

Gonzales, Noemi. (2014). "Descripción de la teoría para la simulación de flujos de sedimentos hiper-concentrados (flujos de lodo y escombros) en el FLO-2D". [Webinar]. FLO-2D Software, Inc.

O'Brien, J. S., and Julien, P. Y. (1985). "Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows." Proc, ASCE Specialty Conf. on Delineations of Landslide, Flashflood, and Debris Flow Hazards in Utah, D. S. Bowles, ed., Logan, Utah.

