

Flood risk management in the torrent of Los Incas in the city of Arequipa – Perú

Joel Ccancapa Puma, Mg.¹, Alejandro Víctor Hidalgo Valdivia, Dr.², Guillermo Yorel Noriega Aquisé, Mg.³ and Alex Eduardo Aguilar Chávez, Ing.⁴

^{1,4}School of Civil Engineering, Catholic University of Santa María - UCSM, Arequipa - Perú
joel.ccancapa@ucsm.edu.pe, ahidalgo@ucsm.edu.pe, gnoriega@ucsm.edu.pe, aaguilarch@ucsm.edu.pe

Abstract– The city of Arequipa, the second most important in Peru, faces many extreme challenges, such as high-intensity but short-in-duration rainfalls which causes floods and the swelling of the Chili River (mud and landslides). This situation exacerbates people's condition who live on the margins of the gorges and gullies; because of little or no territorial planning from public institutions. The local news evidence negligence every year in the human and infrastructural loss. The frequency of these events has increased with the time and that is the reason why rainfall thresholds have been created with their identification together with a 41- year register (1981 - 2021). For the hydrological model, the authors used the highest 24-hour precipitation data from the SENAMHI's stations (National Service of Meteorology and Hydrology of Peru) to obtain the liquid hydrograph for different return periods. Soil mechanics studies were also carried out to determine the rheological parameters of the non-Newtonian flow and then calibrate through historical events in a hydraulic model. Finally, cartographic maps were prepared to evaluate the vulnerability and high-risk areas of flooding in the Los Incas torrent.

Keywords-- Extreme events; Rainfall thresholds; Hyper-concentrated flows; Flood; Vulnerable; Risk; Perú.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Gestión de riesgos frente a inundaciones en la torrentera Los Incas de la ciudad de Arequipa - Perú

Joel Ccancapa Puma, Mg.¹, Alejandro Víctor Hidalgo Valdivia, Dr.², Guillermo Yorel Noriega Aquis, Mg.³ and Alex Eduardo Aguilar Chávez, Ing.⁴

^{1,4}Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Santa María - UCSM, Arequipa - Perú
joel.ccancapa@ucsm.edu.pe, ahidalgo@ucsm.edu.pe, gnoriega@ucsm.edu.pe, aaguilarch@ucsm.edu.pe

Resumen– La ciudad de Arequipa, la segunda ciudad más importante del Perú, se ve enfrentada a eventos extremos como lluvias de alta intensidad, que generan inundaciones y crecidas del río Chili (avenidas de lodo y huaycos), que agravan la situación de las poblaciones asentadas en las márgenes de las quebradas posteriormente torrenteras, debido a la poca o nula planificación territorial por parte de las entidades gubernamentales reflejadas cada año en pérdidas humanas y de infraestructuras presentes. La frecuencia de estos eventos va en aumento con el tiempo y es por esta razón que se generan umbrales de precipitaciones extremas para su correspondiente caracterización con un registro de 41 años (1981-2021). Para el modelo hidrológico se utilizó datos de precipitación máxima de 24 horas de las estaciones meteorológicas del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) para de esta manera obtener el hidrograma líquido para diferentes periodos de retorno. También se realizaron estudios de mecánica de suelos para determinar los parámetros reológicos del flujo no newtoniano y luego calibrar a través de eventos históricos en un modelo hidráulico. Finalmente se elaboraron mapas cartográficos que permiten evaluar las zonas de vulnerabilidad y de alto riesgo por inundación en la torrentera Los Incas.

Palabras claves-- Eventos extremos; Umbrales de precipitación; Flujos hiperconcentrados; Inundación; Vulnerabilidad, Riesgo; Perú.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú está altamente expuesto frente al cambio climático, una situación que se ve agravada con la situación de desigualdad, pobreza y el crecimiento demográfico de la población [1].

Arequipa, alberga más de 1 millón 316 mil habitantes según el Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú [INEI] [2]. Debido a las intensas lluvias que se presentan cada año, este estudio caracteriza los eventos suscitados en época de lluvia, en lo que se denomina umbrales de precipitación máxima, constituyendo así un índice climático de lluvias extremas con un método práctico y reconocido internacionalmente que, en vez de deducir la función de densidad de probabilidad, estimar los umbrales de eventos extremos de precipitación mediante la función empírica de probabilidad.

La ocurrencia de inundaciones en magnitud y frecuencia para una gestión de recursos hídricos es de vital importancia para conocer el comportamiento de las cuencas y mitigar el impacto, para ello se realizaron estudios topográficos,

geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos en la torrentera de estudio.

A. Área de estudio

La ciudad de Arequipa cada año sufre de desbordes e inundaciones en zonas aledañas a los cauces de las torrenteras que hacen su ingreso y que confluyen en el río Chili, colapsando alcantarillas y zonas de área de cultivo asentadas en las zonas bajas del volcán Misti, ya que se producen precipitaciones de corta duración pero de alta intensidad, de tal manera que, en los últimos 20 años las tormentas extremas se hacen cada vez más frecuentes debido al cambio climático, desencadenando en caudales más críticos hacia las torrenteras existentes. Estas lluvias extremas han evidenciado el mal dimensionamiento y destrucción de los puentes sobre la torrentera Los Incas, como también una planificación urbana inadecuada [3].

B. Eventos históricos

A continuación, se recopiló información de eventos históricos suscitados en la ciudad de Arequipa (1989 - 2021) a través de artículos, periódicos e instituciones como: la Autoridad Nacional del Agua [ANA], el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI] y el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET].

1989: 08 de febrero, se produjo una lluvia intensa (37.7 mm/h) que ocasionó que todas las torrenteras hicieran su ingreso, causando que el caudal del río Chili se incrementara.
1997: 25 de febrero, debido a las intensas lluvias se produjeron el desborde de las torrenteras San Lázaro, Miraflores, Paucarpata y Mariano Melgar que afectaron Alto Selva Alegre, P.J. Ciudad Blanca – Comité y Cercado de Arequipa. Dejo 05 muertos y muchos daños.
2000: 18 de enero, lluvias intensas causaron inundación de asentamientos humanos El Mirador, Pueblo Libre, Los Ángeles y Villa María del Triunfo (distrito de Mariano Melgar). 20 de enero, viviendas inundadas por lluvias (distrito de Paucarpata).
2001: 19 de marzo, Lluvias intensas causaron inundaciones en Cayma, Paucarpata, Socabaya, Alto Selva Alegre, José Luis Bustamante y Rivero. 20 de marzo, Inundaciones en Alto Selva Alegre y Arequipa.
2008: 09 de enero, lluvias intensas en los distritos de Alto Selva Alegre, Cayma, Hunter y Mariano Melgar.
2012: 01 de enero, lluvias fuertes en el distrito Alto Selva Alegre.
2013: 08 de febrero, se originó lluvias intensas (124.5 mm) que concentraron en las cabeceras de las torrenteras San Lázaro,

Venezuela y Los Incas. Material arrastrado aguas abajo a manera de flujos de detritos, tras 04 horas intensas de precipitación. Estos flujos afectaron pistas, viviendas, infraestructura pública y privada, además ocasionaron la muerte de personas. **2015:** 01 de enero, inundación de Arequipa después de 6 horas de lluvia. **2016:** 26 de enero, Inundaciones en los distritos de Paucarpata, José Luis Bustamante y Rivero, Alto Selva Alegre. **2017:** 13 de enero, en Alto Selva Alegre fueron afectados los sectores de Villa Ecológica Independencia y las Gardenias, 150 viviendas afectadas por los huaycos. **2020:** 26 de febrero, lluvias intensas afectaron más de 250 viviendas por desborde de inundaciones en 6 distritos, flujo de lodo en el terminal terrestre y Terrapuerto.

II. MATERIALES Y METODOS

La cuenca Quilca - Chili está ubicado en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, por lo que pertenece a la vertiente del océano Pacífico. Abarca prácticamente toda la provincia de Arequipa, al suroeste del territorio peruano, entre la Latitud Sur $15^{\circ} 37' 50''$ y $16^{\circ} 47' 10''$ y la Longitud Oeste $70^{\circ} 49' 15''$ y $72^{\circ} 26' 35''$. La ciudad de Arequipa (Fig. 1) es severamente afectada con periodicidad irregular a inundaciones por la activación de las torrenteras por la parte derecha e izquierda de la ribera del río Chili, según el diagnóstico que presenta el Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Quilca - Chili [4], la ciudad es el punto de mayor riesgo por huaycos, debido principalmente al crecimiento indiscriminado de la ciudad por una falta de planificación, un deficiente sistema de alcantarillado y la invasión de los cauces naturales.

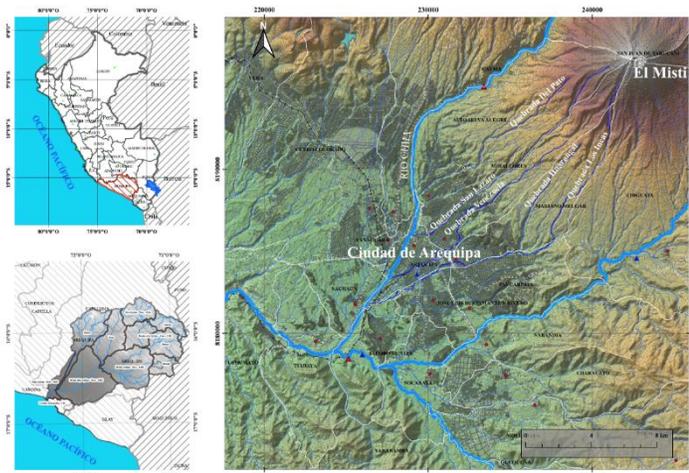


Fig. 1 Ubicación de la ciudad de Arequipa y torrenteras bajo el volcán Misti.
Fuente: Elaboración Propia

La ANA, como ente rector del sistema nacional de gestión de recursos hídricos, elaboro un estudio denominado Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos [5], con el objetivo de asegurar la continuidad a través de un desarrollo sostenible y responsable del recurso hídrico, basándose en criterios e indicadores. Uno de estos indicadores

establece que la cuenca Quilca - Chili, como la de mayor vulnerabilidad, considerando de alta prioridad (en el primer nivel) predominando el aspecto hidrológico (Estrés Hídrico) como también la presencia de puntos críticos ante eventos extremos (Inundaciones).

Otro indicador básico para una adecuada planificación y programación de actividades económicas, socio económicas, socio ambientales y de intervención territorial es conocer los diferentes regímenes climáticos presentes. El SENAMHI el año 2020, elaboro el estudio Climas del Perú: Mapa de clasificación Climática Nacional y fue actualizado el año 2021 por el método de Thornthwaite, como una herramienta para conocer los diferentes tipos de climas en el Perú, para la toma de decisiones y reducción de riesgo de desastres, predominando en la ciudad de Arequipa un clima árido y templado **E(d)B'** con deficiencia de humedad en todas las estaciones del año [6].

Los eventos extremos en la ciudad de Arequipa desencadenan en inundaciones asociadas por procesos de erosión fluvial, donde su fuerza erosiva es originada muchas veces por la carga de sedimentos (flujos de lodo o detritos), estas condiciones en las torrenteras Del Pato, San Lázaro, Venezuela y Los Incas hacen que esté presente un riesgo alto a inundaciones y erosión fluvial (Fig. 2), según el análisis heurístico – cualitativo elaborado por el INGEMMET [7].

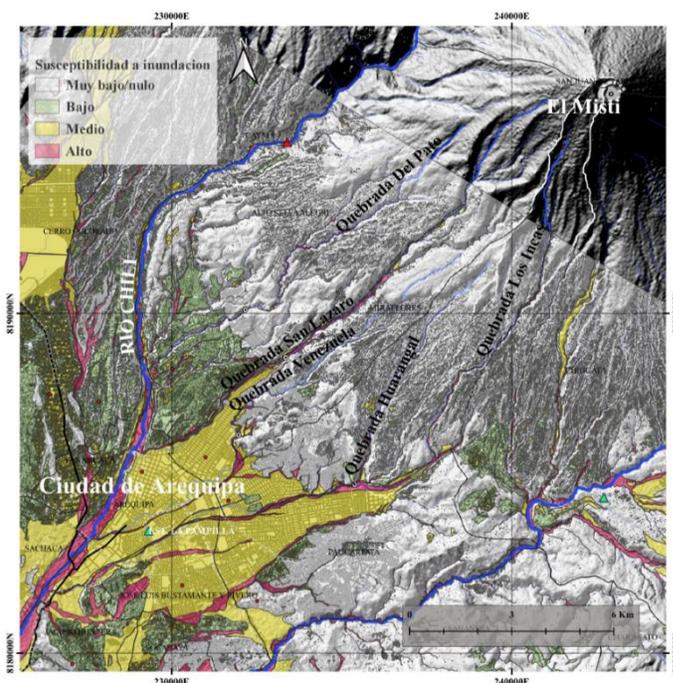


Fig. 2 Adaptación propia de la base de datos Susceptibilidad a Inundación y Erosión Fluvial, INGEMMET (2021).

A. Umbrales de precipitación máxima

Los umbrales son indicadores que van en relación con la peligrosidad ya sea de precipitación, nivel del agua o caudal. Para una caracterización de lluvias extremas (Tabla 1) un criterio común es establecer umbrales de precipitación como índices climáticos. La determinación de umbrales de precipitación máxima para este estudio se siguió el procedimiento descrito por norma técnica de el SENAMHI [8]. La base de información necesaria para estimar los umbrales son la de precipitación diaria de una estación climatológica de largo registro, también se menciona que la utilización de estos índices se justifica porque hay más información disponible de acumulados de precipitación (lluvia diaria) en 24 horas que intensidades de precipitación.

Tabla 1. Caracterización de extremos de precipitación

Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
RR/día > 99p	Extremadamente Lluvioso
95p < RR/día ≤ 99p	Muy Lluvioso
90p < RR/día ≤ 95p	Lluvioso
75p < RR/día ≤ 90p	Moderadamente Lluvioso

*RR/día es la cantidad acumulada de precipitación en 24 horas.
 *99p, 95p, 90p, 75p, son los percentiles expresados en %.

Para el caculo de los percentiles, el procedimiento que se debe tener en cuenta es lo siguiente: **(i)** Excluir del cálculo el valor más alto de la serie. **(ii)** Cuando en la serie histórica se observan “Outliers” es necesario verificar su impacto en los parámetros estadísticos de la serie debido a su presencia. **(iii)** Excluir del cálculo todos los días con trazas. **(iv)** Considerar como día con precipitación cuando $RR > 0.1 \text{ mm}$ **(v)** Si se trabaja con Excel usar la función PERCENTIL.INC **(vi)** En lo posible utilizar el periodo de referencia establecido por el SENAMHI para la caracterización climática (1981 – en adelante), si no es así, referir explícitamente el periodo analizado. **(vii)** La longitud de la serie es muy importante ya que ello afecta la determinación de los umbrales, por ello se recomienda tomar como referencia aquellas estaciones donde los datos empiecen en 1981. **(viii)** La longitud de la serie ideal es la establecida para la caracterización climática, si no fuera posible hacer esto, se recomienda que explícitamente se advierta al lector, ser cuidadosos con el uso de estos resultados y no considerarlos como umbrales climáticos, si no umbrales deducidos de la muestra utilizada (se sugiere muestras no menores a 10 años). **(ix)** Los resultados obtenidos deben ser cuidadosamente utilizados si se pretende hacer extrapolaciones especiales, dada la alta variabilidad espacial de la lluvia. **(x)** Para la utilización de los datos se debe evaluar la calidad de los datos de las estaciones.

B. Geología

Según el Ministerio del Ambiente [MINAM] [9], la ciudad de Arequipa presenta al noreste coladas volcánicas provenientes del Chachani y Misti (**NpQ-ba-s**) cortadas por el cañón del río Chili, la ciudad y alrededores corresponden a depósitos de abanicos aluviales (**Qp-al**), al oeste por tufos volcánicos, por el este flujo de lodos y al sur por el batolito de la caldera (Fig. 3).

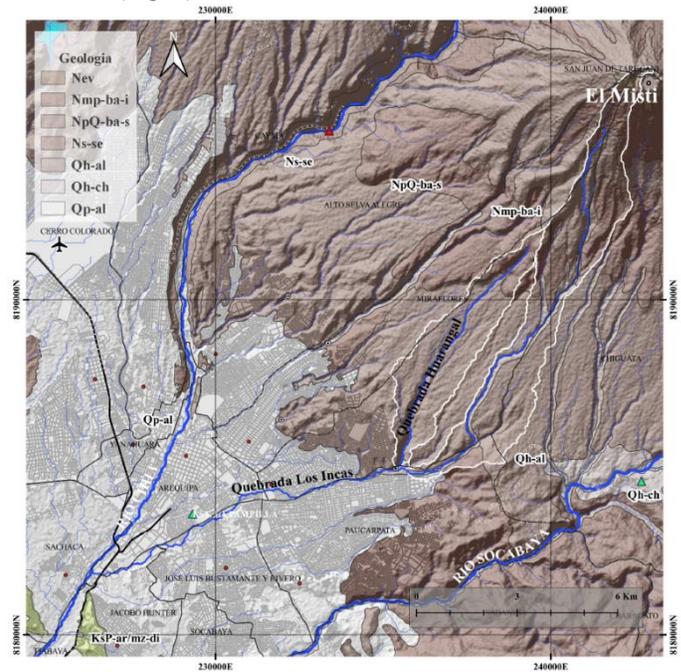


Fig. 3 Adaptación propia de la base de datos Geología, MINAM (2018).

El desplazamiento o remoción de masas rocosas (fracturadas y/o meteorizadas), depósitos inconsolidados o ambos por efecto de la gravedad, están estrechamente vinculadas a las intensas lluvias, sismos y modificaciones antrópicas (factores detonantes), que responden también a factores condicionantes o intrínsecos como la pendiente, morfología, cobertura vegetal, etc. La caracterización litológica realizada por el INGEMMET el año 2021, identifico unidades y subunidades de depósitos inconsolidados fluviales (**I-2**), aluviales (**I-3**), proluviales (**I-4**), coluviales (**I-6**), lacustrinos (**I-7**), glaciar (**I-8**) y volcanoclasticos (**I-9**) como factores condicionantes a movimientos de masa. Las inundaciones repentinas son comunes en zonas semiáridas, como Arequipa, donde se presentan lluvias fuertes anualmente entre los meses de enero, febrero y marzo, teniendo efectos devastadores en términos geomorfológicos y de vidas humanas [10].

C. Topografía

El levantamiento topográfico de las principales torrenteras se realizó utilizando un dron DJI Phantom 4 RTK, con curvas de nivel de cada metro, georreferenciado desde un punto de

control proporcionado por el Instituto Geofísico del Perú (IGN) en el Sistema Geodésico Mundial WGS84/UTM Zona 19S.

D. Hidrología

El mapeo y la cartografía como fuente de apoyo para el peligro y riesgo frente a inundaciones repentinas y lahars (flujos de lodo volcánico) de las quebradas San Lázaro y Huarangal basado en la morfología de los cauces es de utilidad [11], sin embargo, se requiere de un análisis precipitación – escorrentía para determinar los caudales máximos a través de un modelo hidrológico en base a datos observados (Estación La Pampilla). La delimitación de las cuencas (Fig. 4) se realizó siguiendo las buenas prácticas desarrolladas en Qgis [12], determinando las características fisiográficas y geomorfológicas por cada quebrada de estudio en base al modelo digital de elevación (MDE) ALOS - PALSAR, con resolución de 12.5 m.

El hidrograma líquido se obtuvo a partir de datos de precipitación máxima de 24 horas de las estaciones: La Pampilla y Chiguata, con un registro de 41 años (1981 - 2021), descartando la estación Huasacache por el área de influencia sobre las torrenteras, por el método de los polígonos de Thiessen. Se realizó el análisis de frecuencia sobre los datos a través de la prueba no paramétrica de bondad y ajuste Smirnov - Kolmogorov con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, para diferentes funciones de distribución de probabilidad y conocer cual se ajusta mejor a la serie de datos máximos, se tuvo en cuenta la teoría de valores extremos para caracterizar los eventos de precipitación extrema [13], distribución de valor extremo generalizado (GEV). Luego, para determinar el hidrograma, se utilizó el modelo hidrológico del HEC - HMS, con la metodología del Servicio de Conservación de Suelos para conocer la lluvia neta con el número de curva y el método de transformación precipitación escorrentía por el hidrograma unitario. Para el presente estudio se utilizó la distribución de tormenta SCS - Tipo II que calcula los hidrogramas de avenida para precipitación de 24 horas y la distribución Tipo II por tratarse de cuencas altoandinas, los parámetros de entrada al modelo HEC - HMS son las que se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de las quebradas de estudio

Microcuenca	Área de la Cuenca (Km ²)	Pendiente Media (%)	Numero de Curva (CN)	Tiempo de Concentración (Tc)
Los Incas (i)	9.8	18.4	81.7	53.5
Los Incas (ii)	4.0	16.5	81.7	49.2
Los Incas (iii)	17.8	30.1	83.5	67.3

*Tiempo de concentración en minutos.

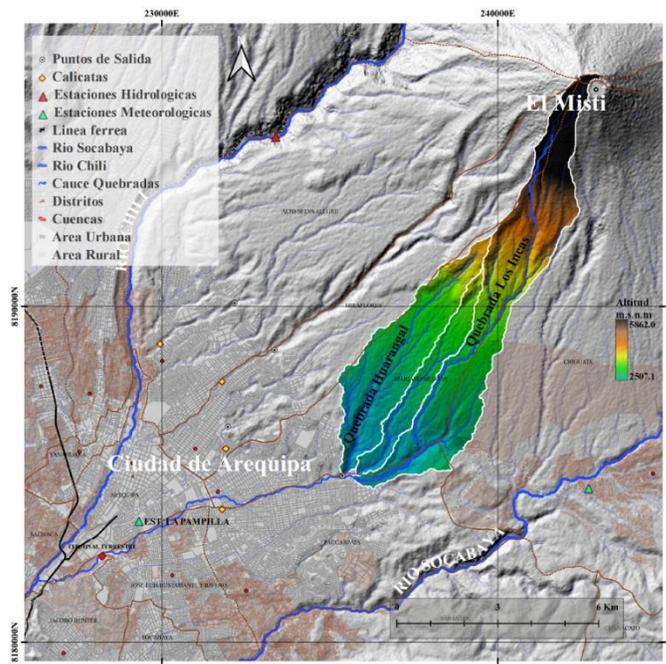


Fig. 4 Delimitación de las cuencas en estudio. Fuente: Elaboración Propia.

La torrentera que se encuentran a la margen izquierda del río Chili (Los Incas) y que confluyen hacia él, presenta una pendiente del cauce principal de 12% (Fig. 5).

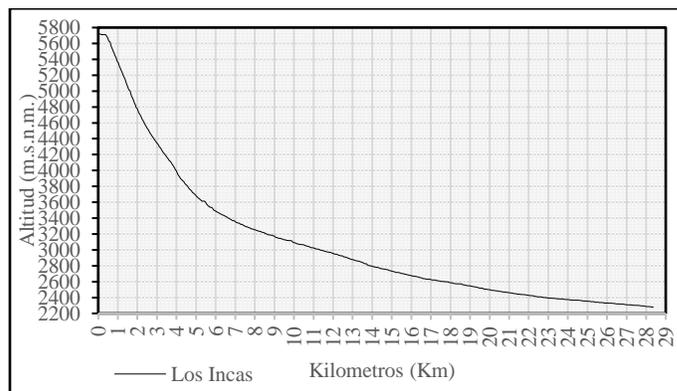


Fig. 5 Perfil longitudinal de la quebrada Los Incas, hasta la confluencia del río Chili. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3. Caudales máximos líquidos estimados

Micro Cuenca	Caudal (m ³ /s) para diferentes periodos de retorno (años)				
	TR=5	TR=25	TR=50	TR=100	TR=200
Los Incas	22.2	69.6	93.1	117.7	143.1

*TR: Periodo de retorno.

E. Mecánica de suelos

Se realizaron muestras a través de calicatas en puntos críticos en la entrada de la ciudad de Arequipa (Fig. 4) para la torrentera Los Incas, de esta manera se determinaron las características geotécnicas mediante ensayos en laboratorio.

Obteniendo resencia predominante de granulometría extendida (rocas, cantos rodados, gravas, arenas y finos).

F. Flujos hiperconcentrados

La mezcla de sedimentos y agua que discurren en un cauce, en el Perú son conocidos “como huaycos” [14]. El registro de inundaciones y flujos de detritos (huaycos) es común en zonas semiáridas como es Arequipa, generalmente asociados a lluvias intensas que discurren por las quebradas posteriormente torrenteras que nacen en el volcán misti [15].

Los perfiles longitudinales de canales para diferentes tipos de flujo (flujos de lodo, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos) son de suma utilidad, porque puede verse la relación directa entre la pendiente y la longitud del cauce principal para cada evento dado [16]. De acuerdo con el tipo de flujo y las características de la pendiente de la torrentera Los Incas (Fig. 5) se caracterizó el tipo de flujo por la presencia de lodo durante el evento del año 2020, a través de reportes audiovisuales como también de informes técnicos [17].

La obtención del hidrograma (Fig. 6), representa la parte líquida (precipitación), la parte sólida es representada por altas concentraciones de piedras, gravas, arenas y finos que transporta el flujo aluvial. Para conocer esta parte sólida ya sea en volumen o en peso [18], se determina la concentración volumétrica de los sólidos con parámetros reológicos estimados con valores empíricos dados por Rickenman [19], de 1600 kg/m³ a 2000 kg/m³ para flujos de barro o lodos (mud flow) y de 1900 kg/m³ a 2300 kg/m³ para flujos de huaycos (debris flow). De esta manera, para determinar estas concentraciones volumétricas de sólidos, se aplicaron las fórmulas propuestas por Takahashi [20], (ecuación 1), asumiendo un flujo estable en movimiento [21].

$$C_v = \frac{\gamma_b S}{(\gamma_s - \gamma_b)(tg\phi - S)} \quad (1)$$

γ_b : Peso específico del barro (1.0 - 1.6 ton/m³); γ_s : Peso específico del material sólido (2.6 ton/m³); S: Pendiente media del cauce de la quebrada y ϕ Angulo de fricción interna del material sólido (30° - 35°).

El caudal máximo de flujo de barro respecto al caudal de agua y material en suspensión es la ecuación 2:

$$Q_b = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s - \gamma_b} Q_1 \quad (2)$$

Donde:

γ : Peso específico del agua (1.0 ton/m³); Q_1 : Caudal máximo del agua (m³/s) y Q_b : Caudal máximo de barro (m³/s)

El caudal máximo de flujo de huayco en condición saturada resulta con la ecuación 3:

$$Q_h = \frac{C^*}{C^* - C_v} Q_1 \quad (3)$$

Donde:

C^* : Concentración máxima de material sólido en reposo (0.6)

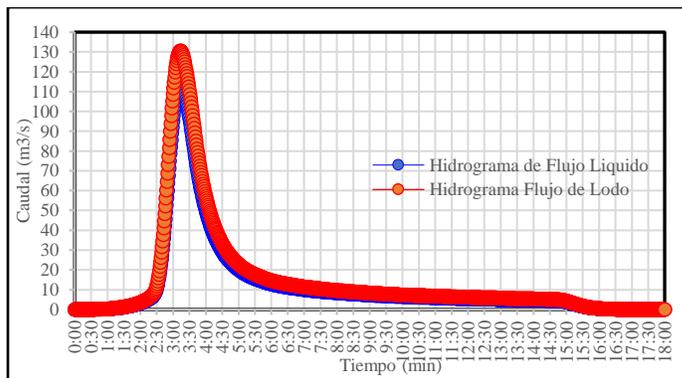


Fig. 6 Hidrograma de flujo líquido y lodo de la quebrada Los Incas, TR=100 años.

II. RESULTADOS Y DISCUSION

Tabla 4. estaciones meteorológicas

Estaciones Meteorológicas	Longitud (°)	Latitud (°)	Altitud (m.s.n.m.)
Estación La Pampilla	-71.534	-16.413	2326
Estación Chiguata	-71.409	-16.406	2902

Tabla 5. Registro histórico

Estaciones Meteorológicas	Periodo	Nro. De años	Nro. De Datos
Estación La Pampilla	1981 - 2021	41	14,975
Estación Chiguata	1981 - 2021	41	14,975

*Se recabo información de precipitación máxima diaria del SENAMHI.

Tabla 6. Fecha de precipitación máxima de las estaciones meteorológicas

Estaciones Meteorológicas	Precipitación Máxima (mm)	Fecha	Datos Faltantes (%)
Estación La Pampilla	124.5	08/02/2013	5.4
Estación Chiguata	48.8	15/03/1995	5.7

Para la estación la Pampilla, los datos de precipitación acumulada se ordenaron de menor a mayor 932 días con lluvia ($RR > 0.1 \text{ mm}$) y se calcularon los percentiles de la serie de 931 días con lluvia, excluyendo el mayor valor registrado (124.5 mm) debido a una lluvia excepcional [22] y la estadística de los valores extremos. Hubo 273 datos faltantes en la serie.

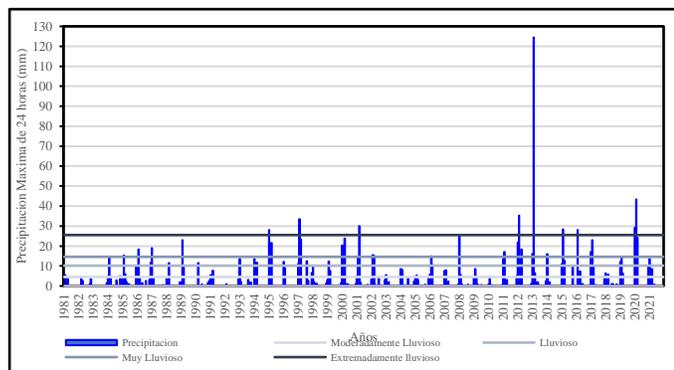


Fig. 7 Estación La Pampilla (1981 - 2021) - Datos diarios de precipitación máxima.

Tabla 7. Umbrales de precipitación máxima para la estación La Pampilla

Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas
$RR/\text{día} > 99p$	$RR > 25.5 \text{ mm}$
$95p < RR/\text{día} \leq 99p$	$14.6 \text{ mm} < RR \leq 25.5 \text{ mm}$
$90p < RR/\text{día} \leq 95p$	$10.2 \text{ mm} < RR \leq 14.6 \text{ mm}$
$75p < RR/\text{día} \leq 90p$	$4.5 \text{ mm} < RR \leq 10.2 \text{ mm}$

A. Simulación de inundación

Para determinar los mapas de riesgo frente a inundaciones generalmente toma dos pasos, un análisis hidrológico para determinar la magnitud de la descarga de tormenta de baja probabilidad (100 años) y un modelo hidráulico para estimar la profundidad del flujo [23]. En el Perú, la ANA, es un Organismo Público adscrito al Ministerio de Agricultura y Riego, responsable de dictar normas y establecer los procedimientos para la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos, de esta manera garantizar la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, etc. Con la finalidad de establecer un límite superior de la ribera, una Faja Marginal, donde se señala que, en terrenos aledaños a los cauces naturales o artificiales de las fuentes de agua colindantes a asentamientos poblacionales un periodo de retorno de 100 años [24]. El análisis de inundaciones para la torrentera Los Incas se realizó con la ayuda del software HEC - RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), teniendo en cuenta los datos de entrada como el hidrograma, las condiciones de contorno y la rugosidad del lecho, bajo el análisis de flujo no permanente o no estacionario.

B. Calibración del modelo

La calibración se realizó teniendo en cuenta las precipitaciones máximas registradas (1981-2021) que desencadenaron en eventos históricos en la ciudad de Arequipa: 1995, 1997, 2001, 2002, 2012, 2015, 2016 y 2020, como un fenómeno meteorológico adverso, entendido en términos estadísticos como menos probable, por ejemplo, el evento del 25 de febrero de 1997 de la torrentera Huarangal generó una inundación, de las más dramáticas en mucho tiempo [25].

Se resumió nueve eventos que causaron daños a la ciudad de Arequipa en función de escenarios de inundación recurrentes de 5 a 10 años [26]. No obstante, la calibración del modelo hidráulico se realizó para un periodo de retorno de $TR=5$ años, según el análisis de umbrales de precipitación con el indicador de extremadamente lluvioso a través de eventos históricos que se han producido en la ciudad de Arequipa, afectando a las infraestructuras presentes en los cauces desde un punto de vista ingenieril.

La quebrada estudiada se caracteriza por ser seca durante casi todo el año, ya que solo se activa en periodos de lluvia de alta intensidad u ocurrencia de eventos hidrológicos extremos, como fue el año 2020, denominador común en el nivel de cota de agua bajo las infraestructuras presentes (Fig. 8) en los cauces canalizados y revestidos.



Fig. 8 Infraestructuras presentes en el cauce de la torrentera Los Incas (Terminal Terrestre).

Las torrenteras son canales rectos y empinados, dominados por un flujo unidimensional (1D) [27], se configuró bajo estos criterios las infraestructuras presentes como puentes y pontones dentro de la ciudad de Arequipa, a través de secciones transversales, teniendo en cuenta los coeficientes de expansión, contracción y las condiciones de contorno o de frontera para un modelo 1D, de esta manera, conocer la altura de tirante/caudal en la cota inferior del tablero de las infraestructuras presentes por huella hídrica para posteriormente modelar bajo un enfoque de flujo bidimensional (2D) con HEC - RAS, que resuelven las ecuaciones diferenciales bidimensionales de Saint – Venant con

el método de Volúmenes finitos, siendo el tamaño de celda de 5x5 metros y un intervalo de tiempo computacional de 3 segundos.

La quebrada Los Incas, presenta un alto grado de zona urbana, la ocurrencia de lluvias se da en la parte alta (quebrada), media y baja (torratera) o en simultaneo. Cuando la ocurrencia de lluvias se da en la cabecera de cuenca, el flujo de agua, punto de salida (Fig. 4), llega con alta carga de sedimentos, que reológicamente constituyen flujos hiperconcentrados a flujo de lodo o barro, además la presencia de solidos de granulometría extendida (piedras y/o rocas). Producto también de estas intensas lluvias son los deslizamientos de tierras, desprendimientos de rocas y flujos de lodo depositados en los cauces canalizados revestidos y naturales de la torratera Los Incas (Fig. 9).



Fig. 9 Registro del 26 de febrero del 2020, ingreso de flujo de lodo hacia el terminal terrestre. Fuente: El Búho (2020).

Tabla 8. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno (TR)

Quebrada	Caudal máximo (m³/s)	Cd	Caudal (m³/s) para diferentes periodos de retorno (años)				
			TR=5	TR=25	TR=50	TR=100	TR=200
			Los Incas	Flujo de agua	-	22.2	69.6
	Caudal de lodo	1.14	25.4	79.6	106.4	134.5	163.6
	Flujo de escombros (formula de Takahashi)	1.52	33.8	106.1	141.9	179.4	218.1

*Cd: Factor de engrosamiento

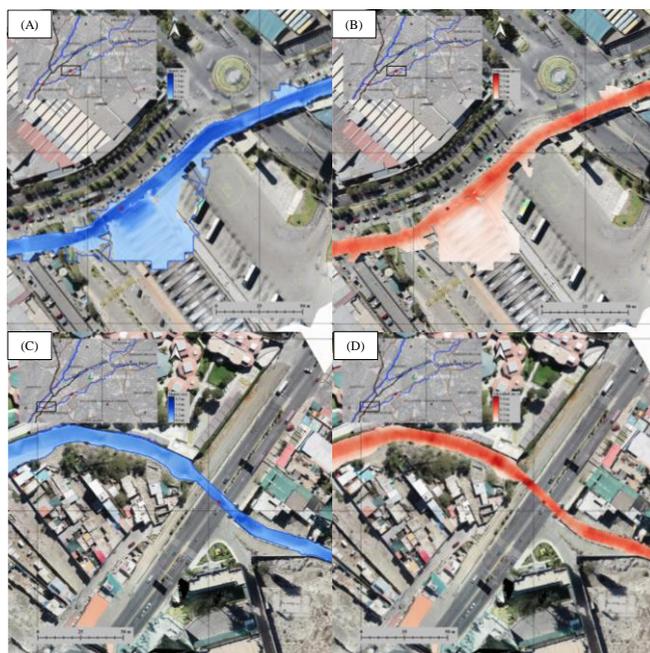


Fig. 10 Mapa de riesgo para un periodo de retorno de 100 años A), B) profundidad de agua y velocidades del Terminal Terrestre y Terrapuerto; C), D) profundidad de agua y velocidades en el puente de la Av. Alfonso Ugarte de la torratera Los Incas, utilizando el modelo numérico HEC-RAS.

La evaluación en campo y los principales parámetros hidráulicos a través de las simulaciones numéricas (Tabla 9), evidencian eventos históricos, puntos de vulnerabilidad y zonas de riesgo frente a máximas avenidas.

Tabla 9. Evaluación de resultados para una gestión de riesgo de desastres

Quebrada de estudio	Zona de riesgo/ infraestructura	Frecuencia de eventos	Periodo de retorno	Profundidad de agua máxima	Velocidad de flujo máxima	Área inundada total
		Años	TR	m	m/s	ha
Torretera Los Incas (6.9 Km)	Terminal Terrestre	Alta (cada 3 años a 5 años)	100	2.9	4.8	8.6
	Puente de la Av. Alfonso Ugarte		100	2.4	6.0	

CONCLUSIÓN

Se realizó la modelación hidrológica para las quebradas de estudio con el modelo HEC-HMS y la modelación hidráulica de la torratera Los Incas con el modelo HEC-RAS, para un periodo de retorno de 100 años.

La calibración del modelo se realizó teniendo en cuenta los registros de eventos históricos suscitados entre 1981 - 2021 (41 años), caracterizando las precipitaciones máximas de 24 horas (14,975 datos) con un umbral de “extremadamente lluvioso” (percentil 99) que se presenta aproximadamente cada 5 años en la ciudad de Arequipa como eventos desencadenantes a movimientos rápidos de masa.

Los resultados muestran tirantes y velocidades críticas, produciendo socavación y erosión en el cauce bajo análisis, además de zonas de desborde e inundación provocadas por precipitaciones extremas que se hacen cada vez más frecuentes, de esta manera tomar respuestas frente al alto riesgo para la ciudad de Arequipa, como caídas escalonadas (disipación de energía), trabajos de caladura en estribos de puentes y muros de contención.

Se recomienda realizar la monumentación de los hitos por parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en las partes altas de las quebradas a través de fajas marginales, para fomentar una herramienta de educación a la población, sobre los peligros de asentarse en zonas límites de ribera de cauces ante eventos extremos y los diferentes entes gubernamentales (Municipios y Gobierno Regional) para una adecuada planificación territorial.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María por el financiamiento, en cuyo marco se desarrolló el presente proyecto de investigación aplicada.

REFERENCIAS

[1] The Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2022). Working group II contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Fact sheet – Central and South America.

[2] Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (2017). Arequipa alberga a 1 millón 301 mil habitantes a los 476 años de su creación. Nota de prensa. Obtenido de <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-301-mil-habitantes-a-los-476-anos-de-su-creacion-politica-9246/>

[3] El Búho (2021, marzo 28). Hace 20 años El problema de las torrenteras y alcantarillado pluvial en Arequipa. El Búho. <https://elbuho.pe/2021/03/hace20anos-el-problema-de-las-torrenteras-y-alcantarillado-pluvial-en-arequipa/>

[4] Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2015). Plan de Gestión de los Recursos Hídricos de la cuenca Quilca-Chili. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/86>.

[5] Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2016). Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/205>.

[6] Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2021). Climas del Perú: Mapa de Clasificación Climática Nacional. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1336>

[7] Vilchez, M. and Sosa, N. (2021). Peligro geológico por movimientos en masa en la ciudad de Arequipa. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 85, 236 p., 5 mapas. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/3186>.

[8] Alfaro, L. (2014). Estimación de umbrales de precipitación extremas para la emisión de avisos meteorológicos. Nota Técnica 001. SENAMHI-DGM-2014. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/345>.

[9] Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2018). Mapa de Geología a nivel Meso de la Zonificación Ecológica Económica, Región Arequipa. Obtenido de <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/arequipa/>

[10] Ettinger, S., et al. (2015). Building vulnerability to hydro-geomorphic hazards: Estimating damage probability from qualitative vulnerability assessment using logistic regression. J. Hydrol. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.017>

[11] Thouret, J.-C., Enjolras, G., Martelli, K., Santoni, O., Luque, J. A., Nagata, M., Arguedas, A., and Macedo, L. (2013). Combining criteria for delineating lahar- and flash-flood-prone hazard and risk zones for the city of Arequipa, Peru, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 13, 339–360, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-339-2013>

[12] Hans Van Der Kwast and Kurt Menke. (2019). Qgis for Hydrological Applications Recipes for Catchment Hydrology and Water Management.

[13] Endara, S. (2017). Determinación de extremos de precipitación a partir del PISCO diario. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Dirección de Hidrología. Diciembre, 2017. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12542/955>

[14] Castillo, N. & Leonardo, F. (2005). Aplicación de un modelo numérico de flujo de escombros y lodo en una quebrada en el Perú., Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú,

[15] Rivera, M., Vilchez, M. and Vela, J. (2018). Peligros por huaycos en la ciudad de Arequipa. En. Taller Internacional Fortalecimiento de capacidades para mitigar los impactos de huaycos en Perú, Lima y Arequipa, Perú, 15-19 octubre 2018: Libro de Resúmenes. Arequipa: INGEMMET, pp. 45-49. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2589>

[16] Suárez, J. (2001). Control de Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga: Colombia.

[17] El Búho pe., Desborde de torrenteras en Arequipa. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=0XAtMwZnPtM&t=18s> Acceso: 15 de Mar. 2021.

[18] O'Brien, J., Julien, P., and Fullerton, W. T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1993\)119:2\(244\).1993](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1993)119:2(244).1993).

[19] Rickenmann, D. L. (1999). Empirical relationships for debris flows. Natural Hazards, v. 19, p. 47-77, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1008064220727>

[20] Takahachi, T. (1991). Debris Flow - IAHR Monograph Series. Rotterdam: Balkema Publishers, 165 p.

[21] Almeida, A., Quisca, S. and Castillo, L. (2019). Numerical Simulation of Debris Flows of the Catastrophic Event of February 2019 in Mirave – Peru. Available at <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2437>.

[22] Cacya, L., Meza, P., Carlotto V. and L. Mamani. (2013). Aluvión del 8 de febrero del 2013 en la ciudad de Arequipa. In: Foro Internacional Peligros Geológicos, INGEMMET, Arequipa, Peru, pp. 195-200. Available at <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1132>.

[23] Mazer, K., A. Tomasek, F. Daneshvar, L. Bowling, J. Frankenberger, S. McMillan, H. Novoa, and C. Zaballos. (2021). Integrated Hydrologic and Hydraulic Analysis of Torrential Flood Hazard in Arequipa, Peru. Available at <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2020.3347.x>

[24] Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2020). Uso y Gestión de Fajas Marginales. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/4636>

[25] Cruz, R. (2009). Gestión del riesgo por inundación en asentamientos populares, distrito de Mariano Melgar, Arequipa. Instituto Nacional de Defensa Civil. INDECI.

[26] Kim Martelli. (2011). The physical vulnerability of urban areas facing the threat of inundation from lahars and flash floods: application to the case study of Arequipa, Peru.

[27] Bricker, J.D., W. Schwanghart, B.R. Adhikari, S. Moriguchi, V. Roeber, and S. Giri. (2017). Performance of models for flash flood warning and hazard assessment: The 2015 Kali Gandaki landslide dam breach in Nepal. Mountain Research and Development 37 (1): 5– 15. Available at <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00043.1>