UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Asesor:

Ph.D. Vásquez Ramírez, Abbon Alex

Autor:

Paredes Catalan, Yolanda Candy

Para optar el Título Profesional:

Ingeniero Civil

Abancay – Apurímac – Perú

2024

Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas

ACTA DE EXAMEN DE TITULACIÓN N°023-2024-EPIC-FI- UTEA- SA

Reunidos el Jurado Evaluador constituido por los señores Docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería de la Universidad Tecnológica de los Andes:

- **MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL** — *PRESIDENTE*
- ***Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO*** — *DICTAMINANTE*
- **Ing. Edwin Reynaldo ESPINOZA ASTO** — *REPLICANTE*

y el (la) postulante al **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO (a) CIVIL,** Bachiller: **PAREDES CATALAN, Yolanda Candy** con **código de matrícula N°201310528-C.**

Ha cumplido con las exigencias del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos de la Universidad Tecnológica de los Andes, aprobado mediante resolución del Vicerrectorado Académico N°002-2024-UTEA-VRAC, de fecha 23 de enero del año 2024, respecto a la sustentación de tesis, para optar al título profesional de Ingeniero Civil.

SUSTENTACIÓN DE TESIS titulado: "**Efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021**", habiendo aprobado con la nota de catorce **(14).**

Se expide, la presente conforme al Libro de Actas de Sustentación de Tesis, consignado en los folios N° 280.

Abancay, 11 de setiembre 2024.

MSc. Ing. Angel MALDONADO MENDÍVIL
PRESIDENTE

Dr. Wilfredo SOTO PALOMINO
DICTAMINANTE

Ing. Edwin Reynaldo ESPINOZA ASTO
REPLICANTE

Efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO 2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%	22%	6%	9%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
2	app.ingemmet.gob.pe Fuente de Internet	2%
3	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	apirepositorio.unh.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	1%
6	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	1%
	upc.aws.openrepository.com	

Metadatos Complementarios

Datos del autor		
Apellidos y Nombres	:	Paredes Catalan Yolanda Candy
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Número de documento de identidad	:	76950463
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0002-6539-4886
Datos del asesor		
Apellidos y Nombres	:	Vásquez Ramírez Abbon Alex
Tipo de documento de identidad	:	DNI
Número de documento de identidad	:	06532658
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-7299-5367
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de investigación	:	Gestión de la infraestructura para el desarrollo sostenible
Rango de años en que realizó la investigación	:	Febrero 2022 - abril 2024
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciada
Porcentaje de similitud	:	22%
URL de OCDE	:	Ingeniería Civil https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedico a Dios quien ha forjado mi camino ayudándome a aprender de mis errores y dándome mucha fortaleza para no rendirme.

A mi querida mamita Yolanda Catalán que me dio la vida y desde el cielo me guía a seguir cumplimiento mis metas que cada vez se van dando de poco en poco. Debido a ella, comprendí que el verdadero tesoro no es el que acumulamos en el mundo, sino el que guardamos en nuestro corazón.

A mi hijo Karl Stefano Alejandro, que es mi principal motivación y la razón por la que no me rindo en ningún desafío de mi vida. Tu existencia ha iluminado mi vida y gracias a ti he experimentado el amor más puro. Me llena de alegría verte crecer y aprender, tu felicidad es mi mayor satisfacción.

Agradecimientos

A Dios por preservar mi vida, protegerme y guiarme en el camino de la vida.

A mi mamita Yolanda Catalán gracias por enseñarme a ser perseverante y alcanzar cada objetivo que me propongo; aunque ya no estés físicamente, siempre estarás presente en mi corazón.

A mi hijo Karl Stefano Alejandro por ser la fuente de mi esfuerzo y todas las energías requeridas, todos mis esfuerzos han sido recompensados al tenerte a mi lado, guiándome con tu amor. Me siento muy orgullosa de ser tu madre.

A mi asesor Ph.D. Abbon Alex Vásquez Ramírez, por su orientación y apoyo desde la elaboración de mi Tesis hasta su presentación.

A Karem O'Brien por facilitarme el Modelo FLO-2D de manera gratuita con sus tutoriales y bibliografía que me sirvieron mucho para el desarrollo de mi Tesis.

Al Ing. Leonardo Franco Castillo Navarro por ayudarme y guiarme con el modelado de la ocurrencia, desarrollo y deposición de flujos de huaycos en microcuencas utilizando el FLO-2D.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), por el apoyo brindado en la información bajo la modalidad de servicio gratuito de los datos de precipitaciones máximas registradas en la estación meteorológica Granja San Antonio - Abancay.

Al Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP), quien me autorizó el desarrollo de mi Tesis en el ámbito del área natural protegida del Santuario Nacional del Ampay (SNA).

Al Ing. Oscar Morón Romero por el apoyo en el estudio de mecánica de suelos de mi Tesis.

Resumen

Las fuertes lluvias provocan deslizamientos de tierra e inundaciones, representando serias amenazas naturales, especialmente en áreas montañosas, este es el caso de la quebrada Sahuanay ubicada en el sureste de Perú, siendo un área propensa a flujos hiperconcentrados debido a la elevada frecuencia e intensidad de precipitaciones. El objetivo principal es relacionar las precipitaciones máximas y el nivel de peligro que generan estos flujos. Para ello, se utilizó el modelo FLO-2D, datos hidrometeorológicos, geológicos y un modelo digital de elevación (DEM). Las precipitaciones máximas de 24 horas se ajustaron a una distribución Gamma 3 Parámetros, generando curvas Intensidad, duración y frecuencia (IDF) y hietogramas de precipitación de diseño. Se calcularon caudales líquidos máximos, considerando números de curvas (CN = 71 y CN = 75) para distintos periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años. Los resultados mostraron caudales máximos por estos flujos hiperconcentrados hasta 130 m^3/s y 168 m^3/s; áreas de amenaza hasta 58.33% y 60.13% con velocidades máximas hasta 9.13 m/s y 9.83 m/s para CN=71 y CN=75 respectivamente. La correlación de Pearson reveló una relación significativa entre las precipitaciones máximas y los niveles de peligro en áreas de amenaza, velocidades y caudales máximos presentaron coeficientes cercanos a 1, destacando una correlación positiva muy alta ($r = 0.988$ y $r = 0.994$ en diversas mediciones). Este análisis hidrometeorológico es esencial para gestionar peligros naturales en Sahuanay.

Palabras claves: peligro, precipitación máxima, flujos hiperconcentrados, modelo FLO - 2D, velocidad.

Abstract

Heavy rainfall causes landslides and floods, posing serious natural threats, especially in mountainous areas. This is the case of the Sahuanay ravine located in southeastern Peru, an area prone to hyper-concentrated flows due to the high frequency and intensity of precipitation. The main objective is to relate maximum precipitation levels to the hazard they generate with these flows. For this purpose, the FLO-2D model, hydrometeorological and geological data, and a digital elevation model (DEM) were used. The maximum 24-hour precipitation was fitted to a 3-parameter Gamma distribution, generating intensity, duration, and frequency (IDF) curves, as well as design precipitation hyetographs. Maximum liquid flow rates were calculated, considering curve numbers (CN = 71 and CN = 75) for various return periods of 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, and 1000 years. The results showed maximum flow rates for these hyper-concentrated flows of up to 130 m^3/s and 168 m^3/s; threat areas of up to 58.33% and 60.13% with maximum velocities of up to 9.13 m/s and 9.83 m/s for CN=71 and CN=75, respectively. Pearson correlation revealed a significant relationship between maximum precipitation and hazard levels in threat areas, with velocities and maximum flow rates presenting coefficients close to 1, highlighting a very high positive correlation (r = 0.988 and r = 0.994 in various measurements). This hydrometeorological analysis is essential for managing natural hazards in Sahuanay.

Keywords: danger, maximum precipitation, hyperconcentrated flows, FLO - 2D model, velocity.

Índice general

Portada i

Acta de sustentación ii

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria v

Agradecimientos vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice general ix

Índice de tablas xi

Índice de figuras xv

Índice de anexos xxi

I. Introducción 23

II. Planteamiento del problema 25

2.1. Descripción y formulación del problema 25

2.2. Objetivos 31

2.2.1. Objetivo general 31

2.2.2. Objetivos específicos 31

2.3. Justificación e importancia 32

2.4. Hipótesis 33

2.5. Variables 34

III. Marco Teórico....36
3.1. Antecedentes....36
3.2. Bases teóricas....47
3.3. Definición de términos....74
IV. Metodología....78
4.1. Tipo y nivel de investigación....78
4.2. Ámbito temporal y espacial....80
4.3. Población y muestra....80
4.4. Instrumentos....80
4.5. Procedimientos....83
4.6. Análisis de datos....83
4.7. Consideraciones éticas....85
V. Resultados y discusión....87
VI. Conclusiones....164
VII. Recomendaciones....166
VIII. Referencias bibliográficas....169
IX. Anexos....177

Índice de tablas

Tabla 1 Eventos más desastrosos en la quebrada Sahuanay – Cerro Chuyllurpata.....27

Tabla 2 Operacionalización de variables de la presente Tesis 35

Tabla 3 Clasificación de flujos por la densidad de sólidos y tipo de fluidos.....61

Tabla 4 Clasificación de flujos por el perfil de sedimentos, viscosidad y tipo de flujo.....61

Tabla 5 Tipos de flujo por las características de la mezcla y del canal – cauce.....62

Tabla 6 Propiedades de las matrices de flujos hiperconcentrados (sólo limo y arcilla) 66

Tabla 7 Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv.....67

Tabla 8 Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv 69

Tabla 9 Definición de nivel de amenaza 72

Tabla 10 Intensidad de inundación de agua (Water flood).....73

Tabla 11 Intensidad de inundación de flujos de lodo y escombros (Mud and debris flow)74

Tabla 12 Técnicas e instrumentos.....81

Tabla 13 Datos de precipitación máxima en 24 horas desde el año 1964 hasta 2021.....88

Tabla 14 Valores de K_n para la prueba de datos dudosos 90

Tabla 15 Valores de 50 datos de precipitación máxima de 24 horas con sus respectivos logaritmos.....91

Tabla 16 Resultados de los deltas teóricos y tabular para las distintas distribuciones de probabilidad 98

Tabla 17 Resultados de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno 100

Tabla 18 Vínculo entre precipitación máxima real y precipitación en intervalos constantes 101

Tabla 19 Precipitación máxima corregido para diferentes periodos de retorno de la Distribución Gamma de 3 parámetros.....102

Tabla 20 Máximas precipitaciones asociadas a diversos intervalos de retorno utilizando una distribución Gamma de 3 parámetros 102

Tabla 21 Precipitaciones discretizadas en diferentes duraciones con el modelo de Dyck Peschke.....103

Tabla 22 Intensidad de precipitación discretizada en diferentes duraciones y periodos de retorno con el modelo de Dyck Peschke.....105

Tabla 23 Síntesis de resultados de Hietogramas – Modelo Dyck Peschke para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.....111

Tabla 24 Topografía digital DEM - quebrada Sahuanay.....112

Tabla 25 Valores de número de curva (CN) por la condición hidrológica de los suelos.113

Tabla 26 Cálculo del número curva CN de la quebrada Sahuanay.....115

Tabla 27 Resumen de resultados de los caudales líquido pico para un CN = 71.....122

Tabla 28 Resumen de resultados de los caudales líquido pico para un CN = 75.....122

Tabla 29 Resumen de caudales máximos en la quebrada Sahuanay para escenarios de CN = 71 y CN =75.....123

Tabla 30 Resultados de la granulometría quebrada de Sahuanay.....127

Tabla 31 Volumen del flujo de sedimentos para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71).....134

Tabla 32 Áreas de amenaza en diferentes niveles de peligro generado por flujos hiperconcentrados, para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71)...136

Tabla 33 Volumen del flujo de sedimentos para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75).....139

Tabla 34 Áreas de amenaza en diferentes niveles de peligro generado por flujos hiperconcentrados, para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75)...141

Tabla 35 Resumen de los resultados de velocidades máximas (m/s) CN = 71.....142

Tabla 36 Resumen de los resultados de velocidades máximas (m/s) CN = 75.....144

Tabla 37 Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D.....149

Tabla 38 Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D 150
Tabla 39 Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D 151
Tabla 40 Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D 152
Tabla 41 Precipitaciones máximas (mm) vs Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 154
Tabla 42 Precipitaciones máximas (mm) vs Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno de CN = 75.....154
Tabla 43 Precipitaciones máximas (mm) vs Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno con un CN = 71.....158
Tabla 44 Precipitaciones máximas (mm) vs Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno con un CN = 75.....158
Tabla 45 Precipitaciones máximas (mm) vs Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71 161
Tabla 46 Precipitaciones máximas (mm) vs Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75 161
Tabla 47 Matriz de consistencia 177
Tabla 48 Valores de 51 datos de precipitación máxima de 24 horas con sus respectivos logaritmos.....185
Tabla 49 Valores de 50 datos de precipitación máxima de 24 horas con sus respectivos logaritmos.....188
Tabla 50 Clasificación de áreas de acuerdo a su extensión 197
Tabla 51 Valores del coeficiente de compacidad.....200

Tabla 52 Cálculos para la curva hipsométrica y polígono de frecuencias de la quebrada Sahuanay 207

Tabla 53 Cálculos para la altitud media de la quebrada Sahuanay.....209

Tabla 54 Número de orden de ríos de la quebrada Sahuanay.....211

Tabla 55 Suma de km según el orden de los ríos de la quebrada Sahuanay 215

Tabla 56 Parámetros geomorfológicos de la quebrada Sahuanay.....219

Tabla 57 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=2 años (CN=71).....236

Tabla 58 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=5 años (CN=71).....236

Tabla 59 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=10 años (CN=71).....237

Tabla 60 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=25 años (CN=71).....237

Tabla 61 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=50 años (CN=71).....238

Tabla 62 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=100 años (CN=71).....239

Tabla 63 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=200 años (CN=71).....239

Tabla 64 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=500 años (CN=71).....240

Tabla 65 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=1000 años (CN=71).....240

Tabla 66 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=2 años (CN=75).....241

Tabla 67 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=5 años (CN=75).....242

Tabla 68 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=10 años (CN=75).....242

Tabla 69 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=25 años (CN=75).....243

Tabla 70 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=50 años (CN=75).....243

Tabla 71 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=100 años (CN=75).....244

Tabla 72 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=200 años (CN=75).....245

Tabla 73 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=500 años (CN=75).....245

Tabla 74 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=1000 años (CN=75).....246

Índice de figuras

Figura 1 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).....50

Figura 2 Clasificación general de los fluidos 57

Figura 3 Relación común entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación (γ^*) para fluidos no-Newtonianos.....57

Figura 4 Clasificación del tamaño de los granos (según International Society of Soil Science).....59

Figura 5 Clasificación de los deslizamientos y flujos, de acuerdo a la velocidad y concentración de sedimentos 60

Figura 6 Clasificación de los flujos hiperconcentrados 62

Figura 7 Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta 65

Figura 8 Viscosidad dinámica de muestras de flujos hiperconcentrados versus concentración de sedimentos 68

Figura 9 Esfuerzos de cedencia de muestras de flujos hiperconcentrados versus concentración de sedimentos 68

Figura 10 Niveles de peligro de inundación basados en la frecuencia e intensidad de Inundación.....71

Figura 11 Intensidades de inundación del flujo hiperconcentrado basadas en profundidades y velocidades de flujo 73

Figura 12 Histograma de registro histórico desde el año 1964 al 2021 89

Figura 13 Distribuciones teóricas que trabaja el HidroEsta 2 93

Figura 14 Resultados y gráfica de la Distribución Normal 93

Figura 15 Resultados y gráfica de la Distribución Log Normal de 2 parámetros.....94

Figura 16 Resultados y gráfica de la Distribución Log Normal de 3 parámetros.....94

Figura 17 Resultados y gráfica de la Distribución Gamma de 2 parámetros 95

Figura 18 Resultados y gráfica de la Distribución Gamma de 3 parámetros 95

Figura 19 Resultados y gráfica de la Distribución Log Pearson tipo III 96

Figura 20 Resultados y gráfica de la Distribución Gumbel 96

Figura 21 Resultados y gráfica de la Distribución Log Gumbel 97

Figura 22 Comparación de distribuciones teóricas.....99

Figura 23 Curva Intensidad – Duración – Frecuencia.....106

Figura 24 Cálculo de la intensidad máxima de diseño para una duración y periodo de retorno dado 109

Figura 25 Modelo de la quebrada de Sahuanay.....117

Figura 26 Características de la quebrada Sahuanay.....118

Figura 27 Método SCS de abstracciones, initial abstraction (mm) para CN=71 119

Figura 28 Método SCS de abstracciones, initial abstraction (mm) para CN=75 119

Figura 29 Método SCS – Tiempo de retardo de la quebrada Sahuanay.....120

Figura 30 Modelos meteorológicos con hietogramas de diseño para tiempos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.....120

Figura 31 Cálculo de hidrogramas de avenida para CN = 71 y 75 121

Figura 32 Diagrama de flujo utilizado en el modelo FLO-2D 128

Figura 33 Malla de grillas de 6m x 6m Quebrada Sahuanay 129

Figura 34 Datos de entrada al Mud and Sediment Transport para la quebrada Sahuanay 131

Figura 35 Hidrogramas líquidos y sólidos para diferentes TR = 2, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=71) con Cv=0.35-0.55.....133

Figura 36 Mapas de Nivel de peligros para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71).....135

Figura 37 Hidrogramas líquidos y sólidos para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=75) con Cv=0.35-0.55 138

Figura 38 Mapas de Nivel de peligros para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75).....140
Figura 39 Velocidades máximas para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años (CN=71).....143
Figura 40 Velocidades máximas para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años (CN=75).....145
Figura 41 Hidrogramas del flujo hiperconcentrado para diferentes TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=71).....147
Figura 42 Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=75).....148
Figura 43 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno, CN = 71 155
Figura 44 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno, CN = 75 156
Figura 45 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71.....159
Figura 46 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75.....159
Figura 47 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71.....162
Figura 48 Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75.....162
Figura 49 Parámetros estadísticos para 52 datos de precipitación máxima de 24 horas 183
Figura 50 Parámetros estadísticos para 52 datos logaritmos de precipitaciones de 24 horas 183

Figura 51 Parámetros estadísticos para 51 datos de precipitación máxima de 24 horas 187
Figura 52 Parámetros estadísticos para 51 datos logaritmos de precipitaciones de 24 horas 187
Figura 53 Parámetros estadísticos para 50 datos de precipitación máxima de 24 horas 189
Figura 54 Parámetros estadísticos para 50 datos logaritmos de precipitaciones de 24 horas 190
Figura 55 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 2 años 191
Figura 56 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 5 años 192
Figura 57 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 10 años 192
Figura 58 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 25 años 193
Figura 59 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 50 años 193
Figura 60 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 100 años 194
Figura 61 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 200 años 194
Figura 62 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 500 años 195
Figura 63 Hietograma de precipitación de diseño para TR = 1000 años 195
Figura 64 Delimitación de la quebrada Sahuanay 197
Figura 65 Curvas hipsométricas correspondientes a otras cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos.....205
Figura 66 Curva hipsométrica de la quebrada Sahuanay.....206
Figura 67 Curva hipsométrica y polígono de frecuencias – quebrada Sahuanay 207
Figura 68 Número de orden de los ríos de la quebrada Sahuanay.....214
Figura 69 Perfil longitudinal del cauce de la quebrada Sahuanay 217
Figura 70 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 2 años (CN=71) 220
Figura 71 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 5 años (CN=71) 220

Figura 72 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 10 años (CN=71) 221

Figura 73 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 25 años (CN=71) 221

Figura 74 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 50 años (CN=71) 222

Figura 75 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 100 años (CN=71) 222

Figura 76 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 200 años (CN=71) 223

Figura 77 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 500 años (CN=71) 223

Figura 78 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 1000 años (CN=71) 224

Figura 79 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 2 años (CN=75) 224

Figura 80 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 5 años (CN=75) 225

Figura 81 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 10 años (CN=75) 225

Figura 82 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 25 años (CN=75) 226

Figura 83 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 50 años (CN=75) 226

Figura 84 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 100 años (CN=75) 227

Figura 85 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 200 años (CN=75) 227

Figura 86 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 500 años (CN=75) 228

Figura 87 Hidrograma líquido – Sahuanay para TR = 1000 años (CN=75) 228

Figura 88 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 2 años 229

Figura 89 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 5 años 229

Figura 90 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 10 años 230

Figura 91 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 25 años 230

Figura 92 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 50 años 231

Figura 93 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 100 años 231

Figura 94 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 200 años 232

Figura 95 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 500 años 232

Figura 96 Precipitación máxima de 24 horas para TR = 1000 años 233

Figura 97 Fotografías en campo parte alta de la quebrada Sahuanay 270

Figura 98 Fotografías en campo parte media de la quebrada Sahuanay 270

Figura 99 Fotografías en campo parte baja de la quebrada Sahuanay 271

Figura 100 Fotografías evaluación en campo del canal Sahuanay.....271

Figura 101 Fotografías en campo mediciones de la pendiente del canal Sahuanay 272

Figura 102 Fotografías de mediciones del canal Sahuanay 272

Figura 103 Fotografías de verificación del estudio de mecánica de suelos 273

Figura 104 Fotografías en laboratorio de mecánica de suelos de la universidad.....273

Índice de anexos

Anexo A. Matriz de consistencia 177

Anexo B. Instrumento Nº 01: Precipitaciones máximas por año.....180

Anexo C. Instrumento Nº 02: Curva Intensidad, duración y frecuencia (IDF) 191

Anexo D. Instrumento Nº 03: Hietogramas de precipitación de diseño (mm) por el método de bloque alterno – Modelo Dick Peschke 191

Anexo E. Instrumento Nº 04: Determinación de parámetros geomorfológicos de la quebrada Sahuanay mediante la delimitación automática de la cuenca hidrográfica con apoyo del Modelo QGIS introduciendo topografía digital siendo el modelo digital de terreno (DEM). 196

Anexo F. Instrumento Nº 05: Determinación del caudal líquido.....220

Anexo G. Instrumento Nº 06: Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning .234

Anexo H. Instrumento Nº 07: Determinación de parámetros reológicos 235

Anexo I. Instrumento Nº 08: Datos de salida del modelo FLO-2D 236

Anexo J. Solicitud de datos de precipitación máxima en 24 horas 247

Anexo K. Respuesta a solicitud de datos de precipitación máxima en 24 horas 251

Anexo L. Resultados del Laboratorio Grupo Corporativo Obregón S.C.R.L: Análisis granulométrico convencional, límites de consistencia, clasificación de suelos SUCS, y Peso volumétrico del suelo saturado 252

Anexo M. Evidencias Fotográficas.....270

Anexo N. Carta de respaldo para la solicitud del permiso de investigación en el SNA...274

Anexo O. Carta de autorización para realizar investigación en el SNA 275

Anexo P. Resolución Jefatural del Santuario Nacional de Ampay Nº 004-2022-SERNANP-J 276

Anexo Q. Respuesta al correo para la descarga e instalación del Modelo FLO-2D de manera gratuita.....280

Anexo R. Certificado en el curso de especialización: Modelamiento bidimensional de flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D 281

I. Introducción

A nivel internacional, como es el caso de Sudamérica ocurren grandes movimientos de masa compuestas debido a la combinación de agua y sedimentos que son producidas por fuertes descargas de lluvia, técnicamente estos eventos se conocen como flujos hiperconcentrados, siendo poco frecuentes y catastróficos (Zhang et al., 2016).

En nuestro País, no es ajeno a sufrir unos de estos eventos naturales alterados por condiciones climatológicas ocasionados por temporadas de fuertes lluvias o torrenciales el cual dan origen a movimientos de flujos hiperconcentrados como los huaycos, estos flujos son característicos de la geografía de nuestro país y pueden causar daños a lo largo de su recorrido, desde la parte alta hasta la parte baja de las quebradas (Castillo, 2006).

En la presente tesis, se realizó el modelamiento en la quebrada Sahuanay mediante el modelo FLO-2D caracterizando e ingresando sus datos geomorfológicos e hidráulicos, el cual se obtuvieron resultados a partir de la modelación bidimensional, siendo estos: el área de amenaza dados en mapas enmarcados con niveles de peligrosidad, la velocidad y el caudal del flujo hiperconcentrado, con el fin de relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generados por los flujos hiperconcentrados, el cual permitió correlacionar y evaluar dichas variables a sus posibles consecuencias al ocurrir un evento en diferentes periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

El desarrollo de la presente tesis contempla el siguiente contenido:

El **Planteamiento del problema** desarrolla la realidad problemática, enfrentando el problema a nivel global, nacional y local, el planteamiento del problema abordó el efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados, de la misma manera se efectuó la justificación de la investigación, objetivos, delimitación, viabilidad y limitación de la investigación.

El **Marco Teórico** desarrolla los antecedentes de la investigación, para las bases teóricas se recopilaron los fundamentos teóricos sobre las variables efecto de las

precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados, además se elaboró el marco conceptual que abarca los aspectos más significativos del estudio.

En la **Metodología** de la investigación desarrolla la hipótesis, el método, tipo de investigación aplicada, nivel o alcance de investigación correlacional, diseño de investigación no experimental, operacionalización de las variables efecto de las precipitaciones máximas y nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D, población, muestra y muestreo, técnicas e instrumentos, consideraciones éticas, y procesamiento de estadísticos.

El **Resultados y discusión** desarrolla los resultados, discusión de resultados y prueba de hipótesis.

Terminándose con las Conclusiones, recomendaciones y sus respectivas referencias bibliográficas y anexos.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

2.1.1. Descripción del problema

En el mundo se tiene información de que los deslizamientos de tierra (huaycos) y las inundaciones son causadas por fuertes precipitaciones o tormentas severas. Por lo tanto, se afirma que las inundaciones y los deslizamientos de tierra provocados por tormentas severas son dos de los principales niveles de peligros naturales, que causan pérdidas de propiedad por valor de USD 6 mil millones y aproximadamente 110-160 muertes por año (Zhang et al., 2016).

En Taiwán los flujos de escombros plantean graves nivel de peligros para las comunidades de las zonas montañosas, lo que a menudo provoca la pérdida de vidas y bienes, ayudar a las comunidades propensas al flujo de escombros a delimitar las zonas de nivel de peligro potencial proporciona a las autoridades locales información beneficiosa para elaborar estrategias de respuesta inmediata ante situaciones de emergencia y para establecer directrices de prevención y gestión de eventos catastróficos; en 2003, la oficina de conservación del suelo y el agua de Taiwán propuso un modelo empírico para delinear las zonas de nivel de peligro para todos los arroyos (1420 en total) con potencial de flujos de escombros y utilizó el modelo FLO – 2D para ayudar a establecer un sistema de prevención de nivel de peligros, el objetivo de este estudio es proponer nuevos enfoques que puedan mejorar la precisión de la delimitación de zonas de nivel de peligro y simular zonas de nivel de peligro en respuesta a diferentes intensidades de lluvia (Hsu et al., 2010).

En el Perú, las lluvias son un elemento importante en la probabilidad de ocurrencia de desastres geohidrológicos siendo su estudio significativo en su análisis, el Centro Tyndall de Investigación sobre cambio climático vincula el aumento de la temperatura global con cambios en la distribución de la lluvia, lo cual afectará la aparición de eventos

geohidrológicos (Villacorta et al., 2016), por lo que el Perú estaría posicionado como uno de los más susceptibles al impacto del cambio climático a nivel mundial.

Nuestro país los flujos de huaycos no son ajenos a nuestra realidad y un claro ejemplo de esto son los sucesos ocurridos durante el verano de 2017, cuando se produjeron una serie de activaciones de quebradas que anteriormente se encontraban secas, afectando ciudades importantes como Lima, Trujillo y Piura; estos eventos, conocidos como el fenómeno del "Niño Costero", causaron daños a más de 12,000 viviendas en 711 distritos a nivel nacional, principalmente debido a huaycos e inundaciones, esta información proviene de fuentes oficiales del Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN) (Castillo, 2018).

Así mismo, esta investigación utilizó el modelo FLO-2D de O`Brien, un modelo numérico bidimensional de diferencias finitas que simula el movimiento de flujos para evaluar el nivel de peligro en un área determinada, para llevar a cabo este estudio, es imprescindible contar con información detallada y digitalizada de los elementos topográficos, hidrológicos y geológicos, así como con una reproducción digital del terreno (Celi y Tanta, 2019).

Las áreas montañosas del país son más propensas a zonas afectadas por eventos naturales como flujos de sedimentos, inundaciones repentinas y deslizamientos de tierra, debido a la escasez de información precisa sobre el clima en estas zonas; esto hace que sea más complicado predecir la aparición de flujos de escombros, crecidas repentinas y deslizamientos de tierra se da principalmente en áreas montañosas de la nación, donde la obtención de un seguimiento climático detallado no es siempre sencilla (Villacorta et al., 2016). Donde el cerro Chuyllurpata tiene antecedentes de desastres asociados principalmente con movimiento complejo de alta vulnerabilidad, ver Tabla 1.

Tabla 1

Eventos más desastrosos en la quebrada Sahuanay – Cerro Chuyllurpata

Paraje/lugar	Fecha	Evento	Nivel de peligro	Vulnerabilidad
Cerro Chuyllurpata	1951	Movimiento Complejo	Alto	Muy Alto
Cerro Chuyllurpata	Marzo 2012	Movimiento Complejo	Alto	Muy Alto

Nota. La tabla muestra los eventos más desastrosos en la quebrada Sahuanay – Cerro Chuyllurpata demostrando un nivel de peligro alto y una vulnerabilidad muy alta en los años 1951 y 2012. Adaptado de “Caracterización geodinámica y endrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú)”, por Villacorta et al., 2016.

Dentro de los estudios de flujos hiperconcentrados (flujos de detritos - huaycos) generados por precipitaciones lluvias intensas en la quebrada Sahuanay, debido a que se encuentra ubicado en la zona de muy alto grado de susceptibilidad a la ocurrencia de movimiento de masas.

Debido a las lluvias frecuentes y a la fragilidad del suelo, este evento podría ser el comienzo de varios incidentes futuros en la zona, los cuales podrían representar una amenaza para la seguridad de la ciudad de Abancay si no se llevan a cabo las obras de ingeniería requeridas, como la implementación de aliviaderos de flujos y áreas de contención de materiales, entre otras (Valderrama et al., 2012).

En la provincia de Abancay, distrito de Tamburco, la quebrada Sahuanay presenta principalmente precipitaciones pluviales intensas donde aumentan en los periodos de setiembre a abril, lo cual podría generar grandes movimientos de masa un caudal con flujo hiperconcentrado que permite grandes movimientos de masa de los depósitos sueltos en la parte alta de la quebrada provocando de esta manera los huaycos, de hecho los

fenómenos de remoción en masa o desplazamiento en masa causan impactos significativos en el país debido principalmente a la aparición de fuertes lluvias (Ordóñez, 2019). Por lo que la quebrada Sahuanay ha sido clasificada por el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) como quebrada en riesgo. Estos acontecimientos nos dan a conocer los hechos en los años 1951 y 2012 como el huayco del cerro Chuyllurpata cercana a dicha quebrada, que arrasó y afectó casas, inundando terrenos de cultivo y destruyendo construcciones viales, se ha determinado a partir de la base del modelado del flujo de detritos de 1951 que los distritos tanto como Tamburco y Abancay son particularmente vulnerables ante una igual eventualidad, observándose que las medidas de las estructuras implementadas por las autoridades municipales en la quebrada Sahuanay son insuficientes para enfrentar un acontecimiento de mayor magnitud al registrado en 1951 (Villacorta et al., 2019). Por lo que se realizará un modelamiento numérico FLO-2D para indicar la magnitud del flujo hiperconcentrados que sucedió en el 2012 el cual servirá para otros posibles escenarios.

Uno de los grandes desafíos a la que se ha enfrentado durante las últimas décadas los sectores de Sahuanay, Pantillay, Maucacalle, y El Arco ubicados en la quebrada Sahuanay así como el sector poblado de aguas abajo de la ciudad de Abancay son los derrumbes denominados huaycos, a causa de fuertes precipitaciones pluviales en distintos periodos de retorno como son en los años de 1951 y 2012 que ha marcado áreas vulnerables de inundaciones por este tipo de desastres naturales en diferentes niveles de peligro, siendo un reto dar opciones de solución para mitigar los posibles efectos en un futuro por este tipo de fenómenos naturales. El modelamiento numérico bidimensional FLO-2D es un medio que permite llegar a nuevos enfoques de soluciones no estructurales a este tipo de desastres permitiendo anticipar situaciones de amenaza, riesgo, nivel de peligro y vulnerabilidad, el cual se aprovecha para prevenir y dar las soluciones a este tipo de desastres. El modelamiento permitió simular flujos agua y flujos hiperconcentrados ya

sean avenidas o flujos de lodo en relieves complejas, como son las zonas pobladas, laderas y abanico aluviales; al igual que el cambio de flujo entre los canales y el abanico aluvial, teniendo como objetivo relacionar el efecto de la precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados en la quebrada Sahuanay en distintos periodos de retorno, el cual fue capaz de simular nuevas situaciones de huaycos que nos ofrece la naturaleza.

La creciente demanda poblacional en la quebrada Sahuanay exige emplear nuevas tecnologías en la prevención de posibles desastres en diferentes escenarios, estando a la vanguardia en cuanto a nuevas investigaciones internacionales se refiere a este tipo desastres como los huaycos, con la presente tesis se contribuyó a estudios sobre flujos hiperconcentrados en nuestra región, con el fin de asegurar una línea de investigación muy significativa a mitigación de desastres. De este modo, publicitar el manejo del modelo FLO-2D como una herramienta que cuantifique flujos hiperconcentrados, el cual permita limitar planos de nivel de peligro causados por estos flujos, y que facilita la información de crear un entorno de conocimientos frente a estos desastres naturales y comunicar de forma cómoda y técnica a los pobladores del sector. La quebrada Sahuanay se convierte en uno de los lugares más vulnerables que desarrolla flujos hiperconcentrados en épocas de lluvias torrenciales generadas por precipitaciones máximas, de este modo se hace pertinente el siguiente interrogante:

¿Cuál es la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay?

2.1.2. Formulación del problema

La quebrada Sahuanay está ubicado en el distrito de Tamburco de la provincia de Abancay, tiene áreas vulnerables por eventos de flujos hiperconcentrados, que se activa por sus características geográficas, geológicas, y especialmente por las intensas

precipitaciones, así mismo tiene antecedentes de este tipo de eventos recordando que en 1951 y el 2012 fue arrasada por estos eventos (flujo de lodos y detritos), estando la vida de las personas en peligro, afectando terrenos de cultivo, viviendas e infraestructuras viales, estando en riesgo la desembocadura de esta quebrada encontrándose los sectores de influencia en forma directa: Sahuanay, Pantillay, Maucacalle y El Arco, así como de forma indirecta de la cuenca aguas abajo es decir la ciudad de Abancay.

Dada la problemática de la realidad local, antes descrita, la presente tesis trabajó con información de datos de precipitaciones máximas registradas históricamente no menor de 25 años para el desarrollo del estudio de los flujos hiperconcentrados a través del modelo FLO-2D, y de esta manera relacionar el efecto de la precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados, para poder dar posibles soluciones en la disminución del impacto de daños ocasionados en los diferentes escenarios de tiempo por estos flujos en la quebrada Sahuanay, dicho de este modo se planteó las siguientes interrogantes:

2.1.2.1. Problema general

¿Cuál es la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021?

2.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021?
- ¿Cuál es la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el

modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021?

- ¿Cuál es la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.

2.2.2. Objetivos específicos

- Identificar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.
- Determinar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.
- Establecer la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.

2.3. Justificación e importancia

Por lo expuesto, en los párrafos mencionados, esta investigación se justifica en lo siguiente:

2.3.1. Conveniencia

Se buscó la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados usando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, este estudio proporciona mapas de peligros de los flujos hiperconcentrados para distintos periodos de retorno. Los resultados pueden ser usados para generar mapas de riesgo y como referencia para investigaciones futuras, mejorando la comprensión y análisis de estos flujos.

2.3.2. Utilidad metodológica

Con el modelo FLO-2D se buscó contribuir en la gestión de peligros ante flujos hiperconcentrados generando mapas de zonas de peligro y comprender áreas vulnerables a inundaciones, considerando que la incorporación de datos de precipitaciones máximas para el cálculo del caudal líquido en los distintos periodos de retorno y la simulación dinámica bidimensional de los flujos hiperconcentrados son fundamentales para identificar áreas de alto, medio y bajo peligro. Estos hallazgos contribuyen en el manejo de estrategias de prevención y evaluación de medidas de mitigación.

2.3.3. Implicancia Práctica

La utilización del modelo FLO-2D en el área de la quebrada Sahuanay ha tenido un impacto significativo en el estudio de la hidráulica en nuestra región. Este modelo ha contribuido al desarrollo del aprendizaje en el área, particularmente en la predicción del movimiento de flujos hiperconcentrados y la obtención de planos de peligro utilizando datos de precipitaciones máximas. Además, ha de beneficiar a la escuela profesional de ingeniería civil para mejorar y adquirir nuevos conocimientos para la anticipación de catástrofes de origen natural.

2.3.4. Valor teórico

La tesis actual aborda una brecha en el conocimiento sobre flujos hiperconcentrados en el contexto de Apurímac, específicamente a través de la implementación del modelo FLO-2D. La realización de este proyecto es oportuna debido a la disponibilidad de estudios previos, recursos necesarios y contribuciones de otros investigadores. Además, esta investigación ha generado conocimientos y antecedentes para futuras investigaciones, ya que existe escasez de estudios sobre análisis estadísticos en precipitaciones máximas para determinar áreas de amenaza por flujos hiperconcentrados utilizando el modelo FLO-2D en nuestra región de Apurímac. Este aporte teórico es fundamental para el avance de la educación hidráulica en el Perú.

2.3.5. Relevancia Social

Es justificable porque será de mucho aporte para nuevos proyectos de investigación y facilitará al desarrollo de obras civiles cercanas a la quebrada Sahuanay que a su vez harán posible mitigar la ocurrencia de inundación en la quebrada brindando seguridad a su población. Así mismo será de gran utilidad para los pobladores del sector, así como los pobladores de aguas de la ciudad de Abancay a efectos que podrán tener mayores alcances con la información a este tipo de desastres, creándose así conciencia frente a estos hechos.

2.4. Hipótesis

Las hipótesis del presente trabajo de investigación son las siguientes:

2.4.1. Hipótesis general

Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generados por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.
- Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.
- Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.

2.5. Variables

2.5.1. Efecto de las precipitaciones máximas

Se establece a partir de la precipitación máxima 24h, Intensidad, duración, frecuencia, periodo de retorno, tiempo de concentración, numero de curva, teniendo como principal resultado a los hietogramas para la generación de hidrogramas líquidos también conocidos como caudales máximos en diferentes periodos de retorno siendo este último uno de los datos fundamentales de entrada para el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay.

2.5.2. Nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

Es la medida que se establece a partir del área de amenaza, velocidad y caudal generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay.

Tabla 2

Operacionalización de variables de la presente Tesis

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Independiente:					
Efecto de las precipitaciones máximas	Autoridad Nacional del Agua et al. (2010) establece que se requiere información meteorológica confiable sobre la precipitación máxima en un período de 24 horas de las estaciones dentro de la cuenca de interés para poder analizar las máximas avenidas. Es necesario utilizar el método del Hidrograma Unitario Sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para determinar los caudales máximos. Este método implica el cálculo del Número Curva (CN) utilizando datos de precipitación y datos geomorfológicos de la cuenca, con el objetivo de estimar las descargas máximas.	Se establece a partir de la precipitación máxima 24h, Intensidad, duración, frecuencia, periodo de retorno, tiempo de concentración, numero de curva, teniendo como principal resultado a los hietogramas para la generación de hidrogramas líquidos también conocidos como caudales máximos en diferentes periodos de retorno siendo este último fundamental dato de entrada para el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay.	Efecto de las precipitaciones máximas	Precipitación Máxima 24 h Intensidad Duración Frecuencia Período de retorno Tiempo de concentración Número Curva calculada y máxima Hietograma de precipitación de diseño Hidrograma Líquido	mm mm/h h ó min ordinal años s adimensional mm - min m³/s
Dependiente:					
Nivel de peligro generado por el Flujo hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D	Escobar y Poma (2018) define a la variable como la ocurrencia del flujo hiperconcentrados potencialmente dañino o alto, moderado y bajo, dentro de un período dado y en un área determinada.	Es la medida que se establece a partir del área de amenaza, velocidad máxima y caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay.	Área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados Velocidad generada por los flujos hiperconcentrados Caudal generado por los flujos hiperconcentrados	Área de amenaza alta Velocidad máxima Caudal máximo	m² ó % m/s m³/s

III. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

Córdoba y Maffla (2021) presenta una revista denominada "*Metodología para evaluación de amenaza por flujo torrencial detonado por lluvia, en la Microcuenca el Rollo Municipio de San Bernardo, Nariño*" (p. 35), cuyo objetivo de estudio se centra en evaluar la amenaza provocada por flujos de lodo desencadenados por lluvias utilizando sistemas de información geográfica; emplea un enfoque cuantitativo, diseño no experimental y descriptivo, con un método hipotético-deductivo; desarrolló una metodología para evaluar la amenaza por flujos de lodo desencadenados por lluvias, transformando datos de lluvia en caudal y modelando eventos torrenciales con el modelo FLO-2D para determinar profundidades y velocidades de flujo; la investigación concluye que durante fuertes lluvias, el pueblo de San Bernardo se encuentra en una situación alta de amenaza, especialmente en zonas cercanas a la quebrada El Rollo, lo que pone en peligro a los residentes y sus viviendas. El trabajo desarrollado aporta a la presente tesis destacando que estas amenazas se intensifican durante épocas de alta precipitación, lo que puede resultar en eventos altamente peligrosos.

Uparela y García (2018) en su artículo de revista titulada "*Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia*" (p. 65), se utilizó un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental en el estudio, donde se desarrolló una metodología deductiva y analítica, el objetivo principal fue crear una metodología para evaluar los riesgos y amenazas de flujos de lodo y avalanchas tanto en el área urbana como rural del municipio de Paz de Río, considerando diversos períodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años; para llevar a cabo esta evaluación, se utilizó el modelo FLO 2D, una herramienta que permite modelar varios tipos de flujos hiperconcentrados, incluyendo flujos de detritos, flujos de lodo y avalanchas. Este modelo puede predecir la altura del depósito

y la presión de impacto de los flujos son elementos fundamentales que influyen en el cálculo del peligro; es importante destacar que el modelo FLO 2D ha sido ampliamente aceptado y utilizado en numerosas investigaciones por la comunidad científica debido a su eficacia y validez en la actualidad. Los resultados indican que varias viviendas en el barrio Santa Teresa y en áreas rurales están en zonas de alto riesgo; el trabajo desarrollado contribuye a esta tesis destacando el éxito del modelo en la predicción de flujos hiperconcentrados, su capacidad para generar mapas de amenazas y su interfaz amigable que facilita su uso por parte de los usuarios.

Vergara (2020) en su tesis doctoral titulada "*Caracterización de las amenazas Geo-Climáticas en los andes centrales y semi-áridos de Chile y Argentina (30-33 °S)*" (p.1), cuyo objetivo del trabajo fue determinar en la región central del río Elqui en Chile, existe la posibilidad de que se produzcan flujos hiperconcentrados, así como también flujos de detritos y barro. El estudio se caracteriza por tener un enfoque cuantitativo, un diseño no experimental y ser descriptivo. Utiliza como técnica de recolección durante un período de catorce años, se realizaron observaciones sobre los eventos de precipitación que provocaron flujos de alta descarga y aquellos que no lo hicieron. Se recopilaron datos de precipitación máxima en una hora, temperatura y precipitación anterior de 1, 5 y 10 días de tres estaciones meteorológicas. Los resultados sugieren que los flujos de alta descarga en la zona son causados por arrastre en el canal y fallamiento superficial, en lugar de superficies de falla profundas. Se creó un modelo que incluía solo las variables de precipitación máxima y temperatura, cuya validez estadística fue confirmada. Se estableció que usar umbrales con una probabilidad del 50% para predecir flujos hiperconcentrados, flujo de detritos y barro tenía una eficacia del 90%. Este estudio contribuye a comprender la relación entre eventos geoclimáticos extremos y el clima, así como la interacción entre las condiciones atmosféricas y las características del terreno en el desencadenamiento de movimientos en masa.

Fallas (2020) presenta la tesis "*Modelación y Mapeo de flujo de lodos y detritos en la cuenca del Río Zapote*" (p. 1). El propósito de este estudio fue modelar el flujo de escombros y lodos en la parte superior de la cuenca del río Zapote durante el huracán Otto y otros eventos de tormenta extrema. El estudio tiene enfoque cuantitativo, diseño no experimental, así como descriptivo. El método es hipotético deductivo, para tal efecto identificó una población, muestra y muestreo caracterizando hasta e registraron un total de 127 deslizamientos, que abarcaron un área de 0.96 km^2, como consecuencia del impacto del Huracán Otto. Según la información obtenida, el modelo hidrológico basado en los datos de lluvias del Hydro-Estimator muestra una subestimación del 28.61% en el caudal pico y del 15.67% en el volumen de escurrimiento en comparación con los registros de la estación meteorológica de Bijagua. El investigador empleó modelos bidimensionales capaces de simular flujos concentrados o de tipo no newtoniano, los cuales son necesarios para evaluar la amenaza o nivel de peligrosidad de los flujos de detritos. Además, realizó un análisis estadístico para determinar la distribución que mejor se ajusta a los datos recopilados y utilizó un análisis de fiabilidad para estimar las precipitaciones máximas con duraciones de 5, 15, 30, 60, 120, 180, 360 y 1440 minutos, considerando diversos periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Las conclusiones más relevantes del estudio es que estimó que el huracán tuvo un flujo máximo de agua que alcanza los 323.3 m^3/s en un lapso de cien años, y la región experimenta elevados niveles de precipitación mensual que oscilan entre 350 y 400 mm, estas cantidades de lluvia pueden provocar una saturación del suelo, lo que aumenta la escorrentía en la zona. El trabajo desarrollado aporta en la presente tesis, porque nos permite el uso de diferentes concentraciones de sedimentos en modelos hidráulicos bidimensionales para pronosticar y predecir la conducta de las inundaciones en áreas susceptibles a deslizamientos y movimientos de tierras. Estos modelos también son útiles para prever aumentos significativos en la profundidad del flujo, la velocidad y el área de peligrosidad en categorías de alto riesgo, donde el daño puede

ser considerable para personas y estructuras. comúnmente utilizado en estudios hidrológicos y ha sido validado en numerosos casos de estudio el FLO-2D es efectivo en este tipo de modelaciones y se recomienda su uso en el estudio de flujos hiperconcentrados.

Zhang et al. (2019) en su artículo de investigación denominada "*Characteristics and influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China*" (p. 93), el propósito de la investigación fue revelar las características espaciotemporales de los nivel de peligros de movimientos de tierra y flujo de escombros provocados por lluvias en la provincia de Shaanxi e identificar los principales factores de control de la aparición de los dos nivel de peligros. El estudio tiene un enfoque basado en datos cuantitativos, sin utilizar un diseño experimental y longitudinal, así como descriptivo. El método es hipotético deductivo, puesto que utilizó métodos estadísticos y modelos basados físicamente para predecir la ocurrencia de deslizamiento de tierra y flujos de escombros provocados por las lluvias, el cual analizó las distribuciones espaciales, latitudinales, interanuales y estacionales de estos eventos de nivel de peligro y la relación del número de eventos de nivel de peligro con la cantidad de lluvia correspondiente. Para tal efecto identificó como población y muestra a la provincia de Shaanxi con una extensión de 205800 km^2. Utiliza como técnica recolección el inventario de datos de deslizamientos de terreno y corrientes de escombros inducidos por lluvias en la provincia de Shaanxi para el período 2009-2012. Los autores concluyen que, al analizar las distribuciones espaciotemporales, tasa de ocurrencia y víctimas resultantes provocadas por lluvias, desprendimientos de tierra y corrientes de escombros tienen una tasa de ocurrencia más alta y son más extensos, estos nivel de peligros se concentran en el sur de esta región con abundantes precipitaciones y terrenos relativamente empinados, siendo el flujo de escombros el más destructivo que los deslizamientos de tierra en términos de víctimas por evento, mostrándose que ambos nivel de peligros corresponde a la temporada de lluvias

en su región. El artículo desarrollado tiene aporte a esta tesis, porque permite identificar que uno de los factores más recurrentes son las precipitaciones máximas para la ocurrencia de flujos hiperconcentrados o también conocido como flujos de escombros siendo estos los más destructivos.

3.1.2. A nivel nacional

Huaman y Tito (2020) en su tesis, denominado "*Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca del rio Sicra, Lircay – Huancavelica*" (p. i), cuyo objetivo es identificar áreas de nivel de peligro por flujos de lodo y escombros provocados por factores geomorfológicos, hidrológicos y geodinámicos en la zona de la subcuenca del río Sicra, ubicada en Lircay, Huancavelica. El estudio tiene un enfoque cuantitativo de tipo aplicada, diseño no experimental, el método es deductivo, para tal efecto identifico una población siendo la subcuenca del río Sicra, empleando un muestreo no probabilístico desde el inicio del río Sicra en su curso principal, ubicado a 565 km de distancia, hasta su punto final en el área urbana del distrito de Lircay a 1+744 km de distancia recorrida es progresiva. Los instrumentos se apoyaron en la investigación y recopilación de datos de fuentes bibliográficas, la labor en el terreno y el análisis de la información obtenida en gabinete. Concluyendo en la definición de zonas de nivel de peligro por corrientes de lodo y escombros, con una cantidad estimada de 8.10 Mm^3 de sedimento simulada por el programa FLO - 2D, para un período de retorno de 100 años. Esta información se ha plasmado en mapas que indican los niveles de peligro en las zonas afectadas por el transporte de deslizamientos de lodo y escombros. El trabajo hace un aporte a la presente tesis, puesto que el autor identifica que el FLO - 2D demostró ser efectivo en el análisis de la quebrada Paihua y otras áreas, por lo que se sugiere su aplicación en todas las zonas propensas a deslizamientos, inundaciones y otros eventos peligrosos, esto ayudará a prevenir riesgos geológicos, planificar el territorio de manera adecuada y optimizar el bienestar de los residentes.

Iruri y Jiménez (2021) en su trabajo de investigación titulado "*Delimitación de áreas críticas mediante el modelamiento de flujo de lodos con el modelo FLO-2D en la quebrada Malanche, distrito de Punta Hermosa, Lima-Perú*" (p. i), cuyo objetivo fue de realizar la obtención de mapas que identifiquen el nivel de peligro de flujos de lodo ocasionados por diversos factores como la hidrología, la geomorfología y la hidráulica, y delimitar áreas susceptibles a inundaciones en la quebrada Malanche - Punta Hermosa. Esto se llevará a cabo a través de la aplicación de simulaciones hidrológicas e hidráulicas utilizando los modelos Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System (HEC – HMS) y FLO-2D; la precipitación 24h máximas de cada estación se realiza el análisis probabilístico mediante el modelo “HYFRAN”, analizadas a través de distintas comprobaciones de supuestos que son otorgadas por el modelo, tales como la evaluación de la estacionalidad (Kendall), la comprobación de independencia (Wald-Wolfowitz) y la verificación de homogeneidad anual (Wilcoxon). La investigación desarrollada aporta en nuestra tesis, porque permite identificar que para las características geológicas y geodinámicas de una región de análisis se identifican como áreas críticas con un nivel de peligro alto de deslizamientos de lodo cuando se producen lluvias intensas o excepcionales.

López y Álvarez (2021) en su tesis nombrada "*Diseño hidráulico de las obras de control de torrentes y retención de sedimentos en la Quebrada Rinconada, Distrito Salaverry - Trujillo*" (p. i), pretendió llevar a cabo la creación de un sistema hidráulico para calcular el tamaño de las barreras de contención de flujos y acumulación de sedimentos en el arroyo Rinconada, para ello utiliza el FLO-2D siendo un modelo numérico utilizado para predecir la aparición de situaciones inusuales de flujo de lodos y escombros en un tiempo específico, con el fin de establecer acciones de prevención y elaborar su diseño hidráulico correspondiente, tiene como población de estudio se centra en la quebrada Rinconada, ubicada en el distrito de Salaverry de la provincia de Trujillo; llega a la conclusión de que los resultados fueron satisfactorios, ya que las dimensiones calculadas para las presas

reducen significativamente la velocidad del flujo. Esto cumple con el objetivo de aumentar el tiempo de la retención del flujo de agua junto con la capacidad de retener la cantidad estimada de sedimentos es posible en cada embalse. El trabajo desarrollado aporta en nuestra investigación, porque nos permite uno de los factores recurrentes en el estudio de riesgo generado por flujos hiperconcentrados es el modelo FLO-2D el cual utiliza el hidrograma calculado, la utilización de la topografía digital junto con los parámetros reológicos ha permitido realizar predicciones sobre las velocidades y profundidades máximas de manera más precisa en periodos de retorno predeterminados.

Escobar y Poma (2018) en su tesis denominada "*Análisis de amenaza por el transporte de detritos aplicado a la quebrada de Tantará del distrito de Tantará, provincia de Castrovirreyna de la región de Huancavelica*" (p. i), el objetivo del trabajo fue evaluar el nivel de riesgo de inundación por modelando flujos de escombros en el cauce de Tantará utilizando un sistema de simulación dinámica en dos dimensiones, teniendo en cuenta los criterios de evaluación de Federal Emergency Management Agency (FEMA). La investigación es de tipo aplicada con enfoque cuantitativo y de nivel explicativo, diseño no experimental y longitudinal de tendencia, el método es científico. El área de estudio fue la quebrada de Tantará, donde se realizó un trabajo no probabilístico de tipo transversal que abarca un área de estudio con alcanza los 4.52 km^2; se emplearon técnicas de recolección de datos como parte del proceso de investigación, se lleva a cabo la búsqueda y recopilación de datos bibliográficos, se realiza trabajo de campo y se procesan los datos en un entorno de laboratorio. Se emplea el modelo FLO-2D, el cual se fundamenta en el principio de conservación de volumen para asegurar resultados confiables en la modelación numérica del área. Concluyendo que la quebrada de Tantará está en nivel de amenaza 3, según los criterios de evaluación de la FEMA, que al hacer un incremento en la en volumen concentrado de 0.3 a 0.7 resulta en un aumento del volumen de salida del flujo de escombros y con el incremento de la concentración volumétrica disminuye la

velocidad a 2.8m/s esto sucede debido a que las características del flujo de escombros han experimentado modificaciones y se han vuelto más densas. El trabajo aporta a la presente tesis, porque permite identificar que el modelo FLO-2D pudo simular el movimiento de flujos y ayudó a determinar qué áreas podrían verse afectadas y la magnitud del peligro que representaban, lo que facilitó la clasificación de la quebrada en zonas 1, 2 y 3 según el nivel de peligro del flujo de sedimentos.

Ordoñez y Ruiz (2019) en su trabajo de investigación titulado "*Propuesta de un modelo numérico y alternativas para el control de flujo de detritos quebrada el Tingo – Pataz - Perú*" (p. i), cuyo objetivo fue de proponer un modelo de simulación numérica para el transporte de material sedimentario en la quebrada El Tingo, con el fin de analizar su evolución y efectos durante eventos de desprendimiento y sugerir estrategias de control del flujo de detritos para reducir su influencia, el estudio se centra en un enfoque cuantitativo de nivel descriptivo y correlacional, con un diseño no experimental. La población en estudio se centró en analizar las distintas quebradas en el Departamento de La Libertad, sin embargo, la investigación se centró específicamente en la Quebrada El Tingo en el área de Pataz; se utilizaron técnicas como el análisis de datos la observación de campo no experimental y datos recopilados a través de diversas fuentes como Google Earth, INGEMMET, Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA), SENAMHI, Autoridad Nacional del Agua (ANA) e Internet. Concluyendo que, el modelo numérico FLO-2D, El sector de la Quebrada El Tingo, ubicado en Vijus, presenta un alto nivel de riesgo debido a la posibilidad de flujos de detritos a velocidades máximas de 2.7, 2.9 y 3.3 m/s, con flujos máximos de 232.5, 263.7 y 353.5 m^3 para periodos de retorno de 50, 100 y 500 años respectivamente. El modelo utilizado en la predicción se ajusta de manera adecuada según la prueba de Kolmogorov - Smirnov con un nivel de significancia del 5%, empleando datos históricos de precipitaciones de 32 años provenientes de la estación de Huamachuco, la cual se considera fiable y cercana a la zona

de estudio, lo que respalda la precisión de los resultados obtenidos. El trabajo aportó a la presente tesis, ya que se pretende ampliar el entendimiento especializado utilizando métodos científicos para analizar el proceder del flujo hiperconcentrado, con el objetivo de sugerir medidas de prevención y reducir los impactos negativos de este fenómeno.

3.1.3. A nivel regional y local

Yucra (2023) en su tesis denominada "*Evaluación de riesgo por flujo de detritos y modelamiento hidrológico de la quebrada Sahuanay en el distrito de Tamburco, Abancay, 2022*" (p. i), plantea como objetivo evaluar los posibles peligros asociados al desplazamiento de material por flujo de detritos en las cercanías del lecho fluvial de la quebrada Sahuanay en la localidad de Tamburco, Abancay, en el año 2022, para su estudio aplica en método cuantitativo, de tipo aplicada, de nivel descriptivo, con un diseño no experimental; la población en estudio es el distrito de Tamburco con 10,861 habitantes y 2183 viviendas; su muestra es probabilística, utiliza los cuestionarios, la observación, documentos y registros como técnicas de recolección; aplica análisis estadísticos como es la prueba de datos dudosos para la comprobación y veracidad de la información sobre las cantidades máximas mensuales de precipitación y modelo de estadística clásica. El autor concluye que los peligros importantes señalados en la zona de investigación indican que la zona urbana C.P. Maucacalle - Sahuanay y sus alrededores están en riesgo y verse afectadas por deslizamientos de tierra y flujos de detritos, con niveles de riesgo que van desde extremadamente elevados hasta mínimos, la comunidad y sus formas de sustento cerca al cauce en un tramo de aproximadamente 3.6 km están expuestos a este fenómeno natural sin ser conscientes de su vulnerabilidad, esto afecta a alrededor de 191 casas se encuentran en las proximidades del río y en sus alrededores, junto a alrededor de 1.2 hectáreas de terreno agrícola en la parte superior del río. El trabajo desarrollado aportó a la presente tesis, porque nos permitió identificar que mediante modelo HEC-HMS v 4.10 el caudal líquido máximo tiene un valor de 24.30 m^3/s y a través de la versión 6.1 del modelo

HEC-RAS, se emplea la técnica desarrollada por O'Brien obtuvo una velocidad máxima de 8 m/s, siendo estos valores cercanos y aproximados a uno de nuestros resultados en la frecuencia de ocurrencia estimada para un evento que ocurre una vez cada siglo de la presente tesis.

Villasante (2022) en su tesis denominada "*Evaluación de niveles de riesgos por flujo de detritos en la quebrada Chinchiña localidad Pacsica, distrito Justo Apu Sahuaraura, Aymaraes, Apurímac 2021*" (p. i), plantea como objetivo identificar el grado de amenaza al realizar el análisis de riesgos del deslizamiento de tierra en la quebrada Chinchiña en Pacsica, en el distrito de Justo Apu Sahuaraura en Aymaraes, Apurímac es significativo; para su estudio utiliza el enfoque cuantitativo; la población es el área de estudio que se encuentra en la localidad de Pacsica y abarca aproximadamente 60 hectáreas, para determinar el nivel de nivel de peligro utilizó el modelo FLO-2D; y llega a la conclusión de que; de acuerdo a la evaluación realizada, se ha determinado que existe un peligro potencial de deslizamientos de tierra y flujo de detritos en la quebrada Chinchiña de Pacsica es considerado muy alto en cuanto a sus consecuencias y daños, con una tolerancia al riesgo inadmisible y una priorización inaceptable. El trabajo indicado aportó en la tesis, porque permitió identificar que uno de los factores recurrentes en los estudios realizados para el riesgo generado por los flujos hiperconcentrados son las precipitaciones máximas.

Villacorta et al. (2019) en su boletín denominado "*Evaluación Integral de la cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico*" (p.1), el propósito del estudio consistió en recopilar datos acerca de los riesgos geológicos presentes en Abancay, con el fin de crear una herramienta útil para la gestión de desastres y la planificación territorial en la región, el estudio tiene enfoque cuantitativo, diseño no experimental y transversal, el método es hipotético deductivo puesto que utilizó el cálculo estadístico de la contribución de las unidades litológicas a la

susceptibilidad por MM en la zona de estudio siendo los resultados derivados del estudio dendrocronológico, estos datos recolectados en la quebrada Sahuanay resultaron valiosos para determinar la extensión del flujo de sedimentos ocurrido en el año 2012, y fueron empleados en la calibración y validación de un modelo matemático del evento y posibles situaciones similares, utilizo el programa computacional de modelamiento FLO-2D el cual simula huaicos siendo un ejemplo de fluidos no newtonianos; entre sus parámetros y calibración del modelo tomó en cuenta valores máximos de 0.55 concentración volumétrica de sedimentos (Cv) correspondiente a huaicos y flujos de lodos muy densos, tomó como índice de rugosidad “n” de Manning, asumiendo un valor de 0.055 debido a las particularidades del área y la información recopilada en el terreno, así mismo asumió una resistencia del cauce al flujo laminar (K) igual a 6000, valor empleado en otros sectores del centro del país con vegetación moderada (Villacorta et al., 2019). En sus conclusiones se menciona que la formación del flujo de detritos se ve agravada por su dinámica agresiva, como se demostró en los daños causados por la avalancha de 2012, que impactó a 173 viviendas, colapsó 13 viviendas, dejó 265 personas damnificadas y causó 4 muertes. Este evento tuvo lugar en el mismo punto que el desastre de 1951, que destruyó numerosas viviendas, colapsó 10 hogares y resultó en 11 fallecimientos. Aunque la avalancha de 2012 fue de menor magnitud, la cantidad de material desplazado indicó un nivel de violencia mayor, lo cual alerta sobre la posibilidad de futuros eventos similares con consecuencias más graves, especialmente debido al crecimiento poblacional en Abancay y Tamburco. Para prevenir el peligro de dichos flujos se implementó una medida de control de riesgos en la zona, mediante la construcción de una estructura hidráulica con una anchura de 4 metros en el cauce para direccionar el flujo y evitar daños, sin embargo, esta estructura ha sido deteriorada por la erosión del río. Esto revela un desequilibrio en el sistema fluvial, ya que se proyecta que un evento de magnitud similar al de 1951 podría superar las capacidades del canal actual, mostrando la necesidad de un rediseño considerando

posibles eventos extremos debido a la crisis climática (Villacorta et al., 2019). El trabajo fue de mucho aporte a la presente tesis, en la modelación del FLO-2D puesto que se utilizó como referencia sus parámetros y calibración del modelo desde la concentración volumétrica (Cv), coeficiente de rugosidad de Manning (n) y la resistencia del cauce al flujo laminar (K).

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Efecto de las precipitaciones máximas

En cuanto a la teoría que se basa para la presente tesis, se abordó en las teorías que están bien alineadas y enmarcan las variables de la tesis. Partimos de la teoría que define la variable efecto de las precipitaciones máximas, desde el punto de vista hidrológico se entiende como la cantidad máxima de precipitación en 24 horas.

Respecto a las dimensiones para la variable efecto de precipitaciones máximas, la definición conceptual, se va recoger lo que está plasmado en (Autoridad Nacional del Agua et al., 2010) cuyo estudio hidrológico establece que en ausencia de datos hidrométricos, pero con información meteorológica que menciona la cantidad de lluvia máxima registrada en un día en la estación del área de estudio, se plantea la posibilidad de llevar a cabo un estudio de crecidas máximas en la cuenca para determinar los caudales máximos instantáneos de los ríos analizados; además, se explica que para calcular el número curva (CN) se utiliza el método del Hidrograma Unitario Sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el cual se fundamenta en las precipitaciones máximas registradas y en la información geomorfológica de la cuenca.

La dimensión está referida a los caudales máximos generados a partir de las precipitaciones máximas y datos geomorfológicos de la cuenca, dichos caudales también son conocido como hidrogramas líquidos el cual son fundamental para los datos de entrada al modelo FLO-2D (Vivas, 2015).

Por ende, la variable efecto de las precipitaciones máximas requiere las siguientes teorías:

3.2.1.1. Selección del periodo de retorno

El periodo de retorno se refiere al número de años promedio en el que se iguala o supera una vez el caudal máximo de una creciente definida (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.2.1.2. Prueba de datos dudosos

Al revisar los datos de una precipitación, es común encontrar valores que se alejen de la tendencia general. De acuerdo a Water Resources Council sugiere ajustar los datos inciertos que se alejan notablemente de la información general, ya que pueden afectar significativamente los parámetros estadísticos, especialmente en muestras pequeñas. El manejo de estos datos requiere un criterio que combine consideraciones matemáticas e hidrológicas, identificando primero datos inciertos altos si la asimetría es mayor a +0,4 y datos inciertos bajos si la asimetría es menor a -0,4, antes de eliminar algún dato sospechoso del conjunto (Fuentes, 2016).

3.2.1.3. Análisis estadístico de la información hidrológica mediante funciones de distribución de probabilidad teóricas

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), en la hidrología existen y se utilizan diversas funciones de distribución de probabilidad teóricas para analizar precipitaciones, intensidades o caudales máximos en diferentes períodos de retorno. Estos modelos probabilísticos pueden ser discretos o continuos y se recomienda el uso de las siguientes funciones: Distribución Normal, Distribución Log Normal de 2 parámetros, Distribución Log Normal de 3 parámetros, Distribución Gamma de 2 parámetros, Distribución Gamma de 3 parámetros, Distribución Log Pearson tipo III, Distribución Gumbel y Distribución Log Gumbel (Villón, 2005).

3.2.1.4. Prueba de bondad de ajuste

Este método es para verificar el ajuste de las distribuciones y seleccionar la más representativa, implica comparar la diferencia absoluta máxima D entre la función de distribución observada Fo(xm) y la estimada F(xm), se calcula el valor D como la diferencia máxima entre ambas. Se utiliza un valor crítico d que se determina según el tamaño de la muestra y el nivel de significancia. Si D es menor que d, se acepta la hipótesis nula; este enfoque no requiere la agrupación de datos como la prueba de X2, ya que compara directamente los datos con el modelo estadístico, la función de distribución observada, Fo(xm), se obtiene mediante el cálculo de 1 menos el orden del dato xm dividido por el total de datos más uno (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.2.1.5. Determinación de la tormenta de diseño

Una tormenta de diseño es un modelo de lluvias específico que se utiliza en el diseño de sistemas hidrológicos. Normalmente, esta tormenta se refiere a la entrada en un sistema donde se estiman los caudales generados a través de él mediante técnicas de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. Las tormentas pueden ser caracterizadas por la cantidad de lluvia en un punto o por un hietograma que muestra la distribución temporal de la lluvia durante la tormenta. Estas estimaciones pueden estar fundamentadas en registros históricos de precipitaciones en la región o construirse a partir de características generales de las precipitaciones en áreas cercanas; la aplicación de las tormentas de diseño varía desde la determinación de caudales pico en sistemas de drenaje pluvial hasta la utilización de hietogramas como entradas para que el análisis se centre en la evaluación de la cantidad de precipitación que fluye en embalses ubicados en áreas urbana (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

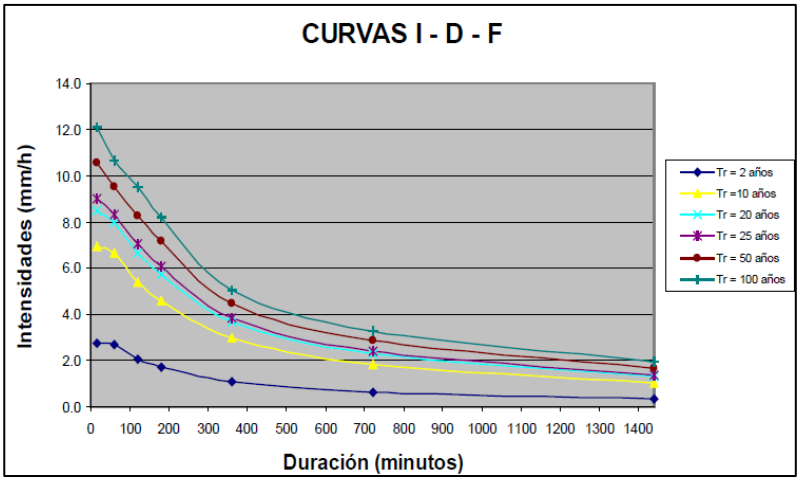
3.2.1.6. Curva intensidad – duración – frecuencia

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) señala que la tasa de precipitación temporal se conoce como intensidad, la cual se expresa en milímetros por hora o como un promedio durante la duración de la lluvia: $i = \frac{P}{Td} \dots (1)$

Según la ecuación presentada por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), la profundidad de la lluvia (P) está relacionada con la duración (Td) de la misma, la frecuencia de la lluvia se suele medir en horas y se determina a partir del período de retorno (T), que indica el tiempo promedio entre eventos de precipitación de cierta magnitud. Para obtener las curvas IDF, se requieren registros pluviográficos específicos y la selección de la lluvia más intensa de diferentes duraciones por año. Luego, se realiza un análisis de frecuencia y se utilizan modelos probabilísticos para calcular la probabilidad de la intensidad de lluvia para cada duración.

Figura 1

Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)



Nota. En la figura se representa las curvas intensidad (mm/h), duración (min) y frecuencia en años para lluvia máxima. Tomado de *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (p. 35), por Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008, http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf.

3.2.1.7. Tiempo de concentración

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), se define como el lapso necesario para que una gota atraviese desde el lugar más distante hidráulicamente hasta la desembocadura de la cuenca.

Después de pasar el período de concentración, se cree que toda la cuenca contribuye al flujo de salida, se entiende como el periodo necesario para que una tormenta alcance su máxima intensidad, y se ha observado que este tiempo suele ser inversamente proporcional a la duración de la tormenta varía según varios factores, como la forma de la cuenca, su pendiente, área, tipo de suelo y cobertura vegetal; las fórmulas más utilizadas solo consideran la pendiente, el tamaño del río principal y el área de la cuenca (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.2.1.8. Hietograma de diseño

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008) mencionó que en algunas ocasiones es necesario conocer no solo el dato de la precipitación máxima en un período determinado, sino también la evolución de esa cantidad a lo largo del tiempo. Los métodos hidrológicos más actuales requieren no solo el valor de la lluvia o intensidad de diseño, sino también una distribución temporal de las tormentas observadas. Para obtener esta distribución, se pueden utilizar curvas IDF, siendo el método del bloque alterno una opción sencilla.

3.2.1.8.1. Sistema de Modelamiento Hidrológico (HMS)

Según Celi y Tanta (2019), la simulación de la cuenca de un río y su respuesta al escurrimiento superficial debido a la precipitación se puede llevar a cabo mediante el modelamiento con el software HEC-HMS, este programa representa la cuenca como un sistema interconectado de elementos hidrológicos e hidráulicos, utilizando datos como las características de la precipitación, de la cuenca y la intensidad obtenida de las curvas intensidad, duración y frecuencia (I-d-f).

3.2.1.8.2. Estimación de caudales

Según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008), en casos donde no se cuentan con suficiente información de aforo, se realiza un análisis estadístico de los caudales máximos instantáneos anuales para la estación más cercana al punto de interés. Se estiman los caudales para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años) utilizando distribuciones como el log normal, log Person III y valor extremo tipo I (Gambel), entre otras entre otras.

3.2.2. Nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

En cuanto a la teoría de la segunda variable, se entiende como nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D, cuando este modelo muestra como resultados: áreas de amenazas conocido como inundación, velocidades del flujo hiperconcentrado y otros datos de salida en cuanto requieran ser analizadas, así mismo que mediante fórmulas propuestas por Takahashi (1991, como se citó en Ordoñez y Ruiz, 2019) el caudal máximo del flujo hiperconcentrado se determina mediante el caudal de agua y material en suspensión:

$$Qt = Ql * BF \dots (2)$$

$$BF = \frac{1}{1 - Cv} \dots (3)$$

$$Qt = Ql * \frac{1}{1 - Cv} \dots (4)$$

Donde:

Qt: Caudal total del flujo hiperconcentrado (m^3/s)

Ql: Caudal líquido (m^3/s)

BF: Factor de volumen (Bulking factor)

Cv: Concentración volumétrica de detritos o flujos hiperconcentrados

De acuerdo con la información proporcionada por O'Brien, la concentración volumétrica de residuos varía entre 0.20 (para flujos con situaciones de baja densidad) y 0.55 (para flujos con situaciones de alta densidad).

Las características de los flujos hiperconcentrados y huaycos están relacionadas con la reacción hidrológica de las lluvias intensas y breves; por lo tanto, se empleó el método de crear un hidrograma de evento de huayco basado en el hidrograma líquido para determinar el caudal máximo del flujo hiperconcentrado (Castillo, 2006). Desde la posición de Castillo (2006) define que “el flujo hiperconcentrado está formado por una mezcla de partículas gruesas y agua; predomina las partículas granulares (arenas, gravas, cantos rodados y bloques) por lo tanto la mezcla no tiene cohesión” (p. 14). Así mismo afirma lo siguiente:

> Se considera un flujo como hiperconcentrado si la concentración de sedimentos (igual al volumen de sedimentos entre el volumen de sedimentos más agua) varía entre 20% y 60% en volumen, valor que corresponde a un peso específico de 2.0 ton/m^3 de la mezcla aproximadamente. Cuando las concentraciones de solidos son bajas los materiales se concentran en la parte inferior del flujo, pero al aumentar la concentración, las partículas se dispersas a través de todo el flujo (p. 15).

Según Vivas (2015), se establecen criterios de peligro por flujos hiperconcentrados basados en una metodología perfeccionada por el Instituto de mecánica de fluidos (IMF) de la Universidad Central de Venezuela. La intensidad alta se define como $h > 1$ m ó $v \times h > 1$ m^2/s, la intensidad media como $0.2 < h < 1$ m y $0.2 < v \times h < 1$ m^2/s, y la intensidad baja como $0.2 < h < 1$ m y $v \times h < 0.2$ m^2/s.

En el caso de amenaza alta, las personas se encuentran en peligro dentro y fuera de las viviendas, las edificaciones pueden ser totalmente o parcialmente destruidas, existe peligro de destrucción repentina de las estructuras y la zona de amenaza es considerada

como prohibida; para la amenaza media, las personas corren peligro fuera de las viviendas, las edificaciones pueden sufrir daños parciales, pero no destrucción repentina, se pueden reducir los daños con medidas de protección y la zona de amenaza es regulada; en el caso de la amenaza baja, el peligro para las personas es bajo o nulo, las edificaciones pueden sufrir daños leves y la zona de amenaza se considera para sensibilización (Vivas, 2015).

En realidad, los movimientos de partículas en suspensión se caracterizan como episodios de inundaciones con niveles de sedimentación que exceden el 20% en tamaño (Eder et al., 2017). El modelo FLO-2D utiliza un modelo reológico cuadrático para predecir el movimiento de flujos hiperconcentrados, teniendo en cuenta la concentración de los sedimentos y las tensiones viscosas y de corte, durante cada paso de tiempo y para cada elemento de la malla, el modelo calcula el cambio en los volúmenes de agua y sedimento, así como la variación en la concentración de sedimentos; los resultados de la simulación incluyen la cantidad de agua y sedimento que salen del área de estudio, así como los volúmenes almacenados en la planicie o en el cauce; además, se determina la extensión del área inundada, las profundidades y velocidades máximas del flujo en función del sedimento disponible definido por Jaime et al. (2007, como se citó en Eder et al., 2017).

Escobar y Poma (2018) define a la variable como la ocurrencia del flujo hiperconcentrados potencialmente dañino o alto, moderado y bajo, y en un lugar específico durante un lapso de tiempo establecido.

Con referencia a las dimensiones que define la segunda variable siendo el peligro generado por flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D, el mencionado autor Escobar y Poma (2018) expresa que se define a la variable como la ocurrencia del flujo hiperconcentrado potencialmente dañino o alto, moderado y bajo, y en un lugar específico durante un lapso de tiempo establecido. Por ende, para relacionar la primera variable con la segunda, se debe caracterizar el peligro generado por flujos hiperconcentrados determinando las áreas de amenaza, la velocidad máxima y el caudal máximo generado

por los flujos hiperconcentrados estas dimensiones son determinados por el modelo FLO-2D.

La primera dimensión para la variable peligro generado por flujos hiperconcentrados, corresponde a las áreas de amenaza generado por flujos hiperconcentrados, que se refiere básicamente al análisis de los riesgos de inundación en determinadas áreas con el fin de controlar la planificación urbana y prevenir posibles daños y pérdidas de vidas; el nivel de riesgo de inundación en un lugar determinado se determina por la posible intensidad y frecuencia de las inundaciones en esa zona (Ordoñez y Ruiz, 2019).

La segunda dimensión de la variable peligro generado por flujos hiperconcentrados, corresponde a la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados, que se refiere básicamente a la predicción para cada ciclo de repetición, la velocidad es el factor que influye en la evaluación del potencial de peligro, clasificando este en niveles de peligro de inundación bajos, moderados y altos según los criterios previamente establecidos (Escobar y Poma, 2018).

La tercera dimensión para la variable peligro generado por flujos hiperconcentrados, corresponde a al caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados, que se refiere fundamentalmente al cálculo de dicho caudal mediante el uso de fórmulas propuestas por Takahashi (1991, como se citó en Ordoñez y Ruiz, 2019) donde el caudal máximo del flujo hiperconcentrado se determina mediante el caudal de agua y el material en suspensión.

Dicho las dimensiones de la segunda variable, que son: áreas de amenaza, la velocidad máxima y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados; podremos relacionar con la primera variable, que nos ayudaran a relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay.

Por ende, es necesario conocer las siguientes teorías relacionadas a la segunda variable:

3.2.2.1. Hidráulica de los flujos hiperconcentrados

La hidráulica de los flujos de escombros, también conocida como hidráulica torrencial, consiste en el análisis de las crecidas repentinas en las que la cantidad de sólidos transportados es tan elevada que los principios de la hidráulica convencional no son aplicables, en este tipo de fenómenos, la presencia de partículas sólidas tiene una influencia importante en la conducta del flujo por lo que no se puede considerar por separado el movimiento del agua y el transporte de sólidos; por ejemplo, se ha observado que en un evento de flujo de escombros en Rusia, el caudal originado por la lluvia fue de apenas 49 m/s, sin embargo, a medida que el flujo avanzaba y erosionaba el cauce, la descarga máxima alcanzada fue de 490 m^3/s, diez veces mayor que el caudal inicial, este aumento significativo se debe a la presencia y transporte de material sólido, lo cual no se vería en un flujo de agua pura (Castillo, 2006).

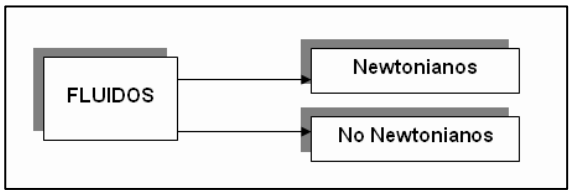
Asimismo, se observa un incremento en la densidad de la mezcla respecto a la del agua, presentando los flujos de escombros densidades que oscilan entre 2100 y 2400 kg/m^3 (Castillo, 2006). En el siguiente apartado se proporcionará información más detallada sobre las propiedades y atributos del movimiento de dichos flujos. Antes de eso, vamos a definir los conceptos fundamentales relacionados con los tipos de fluidos.

3.2.2.1.1. Tipos de fluidos

Castillo (2006) afirma que “para los diferentes tipos de fluidos se considerará de acuerdo con las características de la mezcla, de la pendiente y forma del canal, se genera un fluido con diferentes características, se pueden diferenciar los siguientes tipos de flujo” (p. 22).

Figura 2

Clasificación general de los fluidos

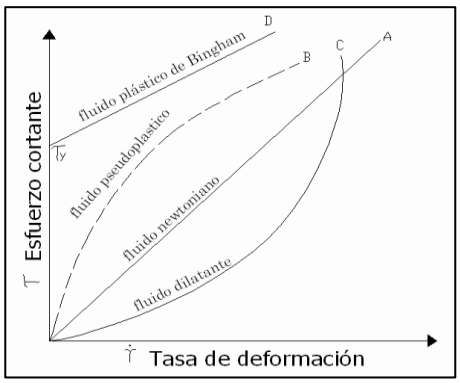


Nota. En la figura se representa la clasificación de los fluidos tanto a newtonianos y no newtonianos. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 22), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

Un fluido es un líquido que se deforma fácilmente ante esfuerzos cortantes, como el agua, los fluidos que presentan poca resistencia a la deformación se llaman newtonianos (caso a), mientras que los que presentan mayor resistencia son los no-newtonianos, mientras que los no-newtonianos incluyen mezclas complejas como lodos, la sangre y aceites viscosos (caso b) (Castillo, 2006).

Figura 3

Relación común entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación (γ^*) para fluidos no-Newtonianos



Nota. En la figura se representa la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de deformación para fluidos no newtonianos. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 23), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

3.2.2.1.2. Fluido newtoniano

Un fluido Newtoniano de acuerdo a Castillo (2006) afirma que el ‘‘fluido muestra la relación del esfuerzo cortante (τ) y la deformación al corte o gradiente de velocidad (γ^*), la pendiente de la línea recta es la viscosidad μ’’ (p. 23).

$$\tau = \mu\dot{\gamma} = \mu\frac{\partial u}{\partial y} \dots (5)$$

‘‘Donde τ es el esfuerzo cortante, y $\frac{\partial u}{\partial y}$ es la tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades’’ (Castillo, 2006, p. 23).

3.2.2.1.3. Fluido pseudoplástico y dilatante

En los fluidos pseudoplásticos, la resistencia al flujo disminuye a medida que aumentan los esfuerzos aplicados, lo que significa que el fluido fluye más fácilmente cuando se aplica más fuerza, en cambio, los fluidos dilatantes aumentan su viscosidad a medida que se aplican fuerzas más intensas mostrando una mayor oposición al movimiento y son menos comunes que los pseudoplásticos; la viscosidad aparente de estos fluidos se puede describir mediante la Ley de Potencia, n la que n es menor que uno para los fluidos que presentan un comportamiento pseudoplástico, n es mayor que uno para los fluidos que muestran un comportamiento dilatante y n es igual a uno para los fluidos newtoniano. Este modelo puede no ser preciso en extremos de una tasa de deformación elevada o reducida. Hoy en día, el modelo de Herschell-Bulkley ha sido complementada la descripción de los fluidos no newtonianos al incluir un límite de fluencia (Castillo, 2006).

3.2.2.1.4. Fluido plástico de Bingham

Un fluido plástico de Bingham se trata de un líquido que no se mueve cuando se aplica una fuerza de corte muy baja. Solo se pondrá en movimiento si la fuerza de corte supera un nivel crítico llamado esfuerzo de cedencia o límite de fluencia (Castillo, 2006).

3.2.2.1.5. Concepto hidráulico de los flujos hiperconcentrados

En el concepto de los flujos hiperconcentrados se incluyen los flujos de lodos y escombros, estos flujos se originan por un colapso en un talud, donde los escombros caen,

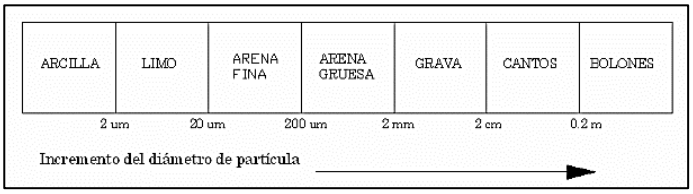
se humedecen y se desplazan por la pendiente, aumentando su movilidad a medida que avanzan; así mismo señala que estos flujos se producen cuando masas de sedimento saturadas con agua caen rápidamente debido a la gravedad; en resumen, los flujos de escombros son una mezcla de agua y sedimento que fluye hacia aguas abajo por una pendiente pronunciada, aumentando su volumen al encontrar obstáculos en su camino (Castillo, 2006).

3.2.2.1.6. Composición de los flujos hiperconcentrados

En la composición de los flujos hiperconcentrados tienen una composición muy diferente al concreto fresco, ya que se trata de flujos de diversas etapas con granos en desorden, una combinación de aire y líquido entre sí, los principales componentes de estos flujos son el líquido, la sustancia fina (partículas de tierra arcillosa) y los elementos de mayor tamaño; el agua, con una densidad cercana a 1000 Kg/m^3, es el fundamental agente de desplazamiento en estos flujos, mientras que las partículas de arcilla, con una densidad de aproximadamente 2650 Kg/m^3, contribuyen a la plasticidad del suelo, por otro lado, los granos consisten en diferentes tipos de partículas, como arcilla, limo, arena fina, arena gruesa, gravas, guijarros y cantos rodados, con densidades que oscilan entre 2650 Kg/m^3 y 2750 Kg/m^3, estos granos se forman a partir del proceso de ruptura física o mecánica de los materiales pétreos, se logra preservar la integridad de la composición original de dichas rocas (Castillo, 2006).

Figura 4

Clasificación del tamaño de los granos (según International Society of Soil Science)



Nota. En la figura se muestra el incremento de partículas o tamaño de los granos. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en*

una quebrada en el Perú (p. 28), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

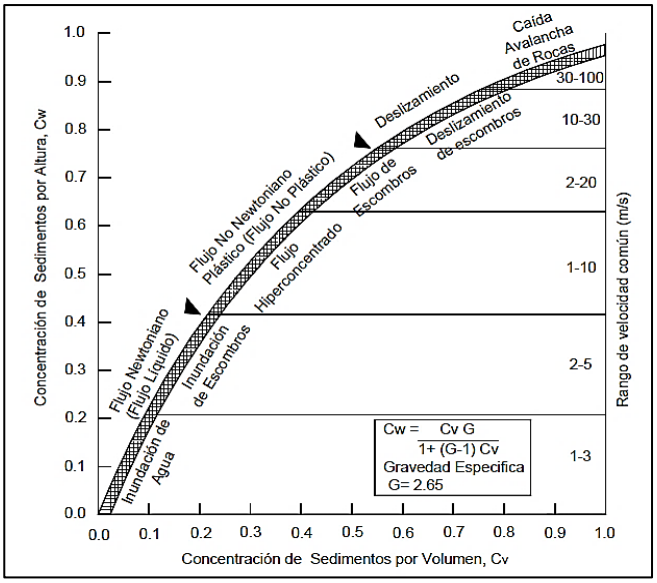
Por esa razón, según la procedencia de los restos, la corriente podría manifestarse como un flujo de lodo con una alta proporción de partículas pequeñas o como trozos de roca esparcidos en un fluido de agua y partículas fina (Castillo, 2006).

3.2.2.1.7. Clasificación de los flujos hiperconcentrados

Huaman y Tito (2020) señala que los flujos de detritos presentan particularidades que los distinguen de los fenómenos hidráulicos convencionales, lo que justifica la necesidad de abordarlos de manera específica en investigaciones particulares.

Figura 5

Clasificación de los deslizamientos y flujos, de acuerdo a la velocidad y concentración de sedimentos



Nota. En la figura se muestra la clasificación del flujo hiperconcentrado de acuerdo a la concentración de sedimentos. Tomado de *Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica* (p. 82), por O'Brien, 2000, como se citó en Huaman y Tito, 2020, http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339.

Huaman y Tito (2020) afirma que varios estudios, se puede categorizar los flujos de escombros en función de características como la composición de los materiales, la forma en que se desplazan y la cantidad de sedimento presente. Diversos autores han propuesto diferentes criterios de clasificación para distinguir estos flujos, los cuales serán mencionados posteriormente en la Tabla 3 y 4:

Tabla 3

Clasificación de flujos por la densidad de sólidos y tipo de fluidos

Flujo	Densidad de sólidos	$\tau_v\ (\frac{dn}{cm^2})$	Concentración de sedimentos	Tipo de fluido
Avenida de agua	1.01 – 1.33	0 – 100	1 - 40% en peso 0.4 – 20% en volumen	Newtoniano
Flujo hiperconcentrado	1.33 – 1.80	100 – 400	40 – 70% en peso 20 – 47% en volumen	No Newtoniano
Flujo de escombros	1.80 – 2.30	>400	70 – 90% en peso 47 – 77% en volumen	Viscoplástico

Nota. La tabla muestra la clasificación de flujos hiperconcentrados en función a su densidad de sólidos, esfuerzo cortante, concentración de sedimentos y tipo de fluido. Adaptado de “Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica”, por Huaman y Tito, 2020.

Tabla 4

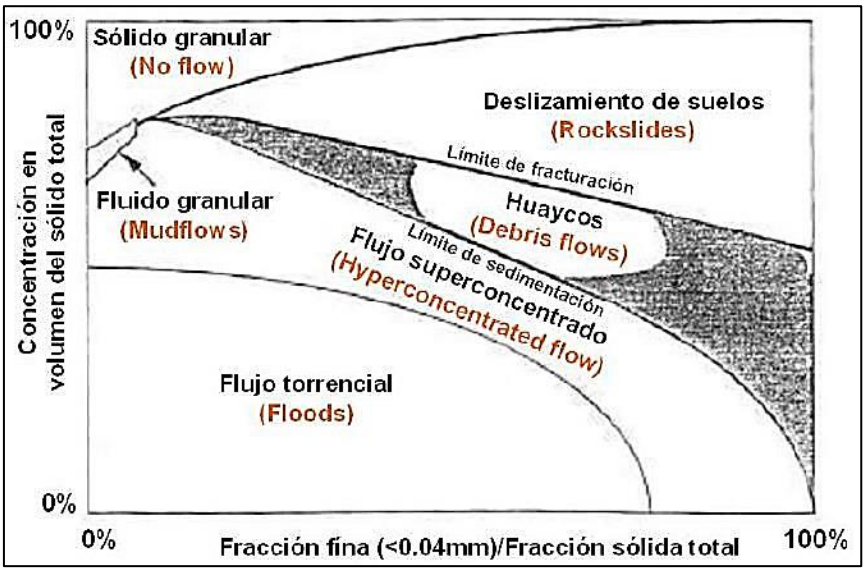
Clasificación de flujos por el perfil de sedimentos, viscosidad y tipo de flujo

Flujo	Perfil de acumulación de sedimentos	Mayor mecanismo de soporte de los sedimentos	Viscosidad (poise)	Tipo de flujo predominante
Avenida de agua	No uniforme	Fuerzas electrostáticas, turbulencia	0.01 - 20	Turbulento
Flujo hiperconcentrado	No uniforme a uniforme	Empuje, esfuerzo dispersivo, turbulencia	20 - 200	Turbulento a laminar
Flujo de escombros	Uniforme	Cohesión, empuje, Esfuerzo dispersivo, Soporte estructural	>>200	Laminar

Nota. Esta tabla muestra la clasificación de flujos hiperconcentrados en función al perfil de acumulación de sedimentos, mecanismo de soporte de los sedimentos, viscosidad y al tipo de flujo predominante. Adaptado de “Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica”, por Huaman y Tito, 2020.

Figura 6

Clasificación de los flujos hiperconcentrados



Nota. Esta figura muestra la clasificación de los flujos hiperconcentrados en función al % de su concentración volumétrica de sólidos y la fracción fina y sólida. Tomado de *Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica* (p. 84), por Castillo, 2006, como se citó en Huaman y Tito, 2020, http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339.

Es necesario identificar las características de la mezcla y del cauce principal, de manera que se pueda modelar adecuadamente el flujo que se va a presentar (Huaman y Tito, 2020), se presenta la Tabla 5.

Tabla 5

Tipos de flujo por las características de la mezcla y del canal – cauce

Características de los sedimentos	Concentración de sedimentos de la mezcla (kg/cm^3)	Pendiente del canal					
		> 100% (45º)	100 a 50%	50 a 20%	20 a 10%	10 a 5%	<5%
		Tipo de flujo					
Mas del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas	<90	Flujo hiperconcentrado				Flujo de lodo	
	>90	Flujo de lodo					
	<300	Flujo hiperconcentrado					

(d < ASTM#200)			
Menos del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d < ASTM#200)	300 a 600	Flujo turbulento de residuos (Debris flow)	Flujo hiperconcentrado
	600 a 900	Flujo turbulento de residuos (Debris flow)	
	>900	Flujo laminar de residuos	

Nota. La tabla muestra los tipos de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal – cauce. Adaptado de “Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica”, por Suarez, 2009, como se citó en Huaman y Tito, 2020.

3.2.2.2. Descripción del modelo dinámico bidimensional FLO-2D

El modelo FLO-2D es capaz de simular el flujo de fluidos no-newtonianos, como los aludes torrenciales, en conos de deyección, este modelo permite representar el comportamiento de estos fluidos altamente concentrados en materia sólida, los cuales se comportan de forma distinta a los fluidos comunes como el agua, así mismo puede simular distintos tipos de flujos y permite la interacción entre canales y planicies de inundación; para utilizar este modelo se requiere información y una descripción minuciosa de la topografía circundante, forma del conducto de agua, textura del conducto y extensión de área de inundación, gráficos de entrada de flujo, lluvia y características físicas de la combinación de agua y sedimento (Castillo, 2006).

3.2.2.2.1. Ecuaciones básicas

Castillo (2006) ‘‘Las ecuaciones que utiliza el modelo FLO-2D son las de continuidad y cantidad de movimiento, integradas en la vertical’’ (p. 71).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \ldots (6)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g}\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g}\frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g}\frac{\partial V_x}{\partial t} \ldots (7)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g}\frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g}\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g}\frac{\partial V_y}{\partial t} \ldots (8)$$

Castillo (2006) afirma:

donde: h es la profundidad del flujo; V_x y V_y son las componentes de la velocidad media, t es el tiempo, g la aceleración de la gravedad, S_f es la pendiente de fricción; S_o la pendiente del lecho e i es intensidad de la precipitación (p. 72).

Por lo que La limitación en la parte superior de la corriente es el patrón de flujo entrante, mientras que en la parte inferior es la cantidad de agua que sale (Castillo, 2006).

3.2.2.2.2. Solución numérica

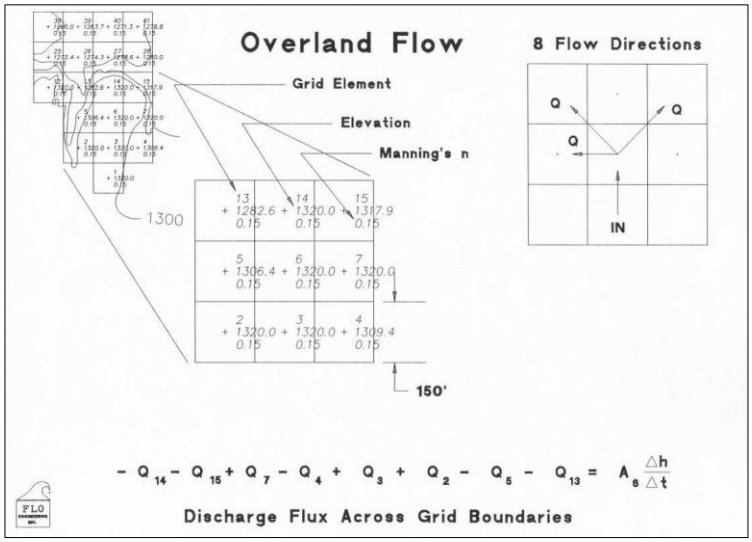
Aborda la resolución de ecuaciones de continuidad y momentum en el modelo FL0-2D mediante un esquema central de diferencias finitas, este modelo utiliza la ecuación de onda difusiva o dinámica para calcular la velocidad; en términos de métodos numéricos, los cálculos se realizan en una malla x-t con incrementos de distancia Δx y tiempo Δt; el FLO-2D emplea un esquema explícito para la solución de diferencias finitas, el cual requiere valores pequeños de Δx y Δt para converger y garantizar la estabilidad numérica, se debe satisfacer la restricción de Courant-Friedrich-Lewy (CFL), en la cual la cantidad de tiempo Δt está restringida por el número de Courant, el tamaño de la rejilla, la velocidad media y la velocidad de propagación de la onda (Castillo, 2006).

3.2.2.2.3. Algoritmo del FLO-2D

El algoritmo de FLO-2D se divide la topografía en una malla de celdas cuadradas con tamaño uniforme, asignando a cada una de ellas una posición, elevación, coeficiente de rugosidad y elementos que disminuyen el movimiento de líquido que atraviesa la celda; al analizar una celda en un instante específico, se determina la cantidad total de flujo que ingresa y sale por cada lado de la celda, repartiendo de forma equitativa cualquier variación en el volumen final dentro del espacio de la celda (Castillo, 2006; Celi y Tanta, 2019).

Figura 7

Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta



Nota. La figura muestra la descarga del flujo hiperconcentrado a través de las grillas. Tomando de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 75), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

En el proceso de solución del algoritmo, se incorporan diferentes etapas donde cada componente de la matriz posee características únicas de textura superficial, altura y nivel de corriente; estas etapas incluyen el cálculo del promedio de la inclinación entre los componentes de la red, la estimación de la profundidad de la corriente para determinar la velocidad, el primer cálculo de la velocidad utilizando la fórmula de la onda difusiva, el cálculo de la velocidad para flujos con alta concentración de sedimentos, la estimación de la cantidad de agua multiplicando el área de la sección transversal por la velocidad, la asignación de la variación de volumen para identificar un incremento en la profundidad de la corriente, la verificación del principio de equilibrio numérico y la continuación de la simulación hasta lograr este equilibrio; en caso de que el principio de equilibrio no se cumpla, se reinicia la simulación en el punto temporal previo (Celi y Tanta, 2019).

3.2.2.2.4. Medición de los parámetros reológicos

Para la medición de los parámetros reológicos Celi y Tanta (2019) afirma ‘‘La viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia (τ_y) de mezclas agua y sedimentos, son parámetros reológicos esenciales para la aplicación de los modelos de cálculo de los flujos con grandes concentraciones de sedimentos’’ (p. 84).

O'Brien y Julien (1988, como se citó en Celi y Tanta, 2019) afirma que se llevó a cabo un examen de laboratorio en muestras tomadas de acumulaciones naturales de flujos de barro en las Montañas Rocosas de Colorado, en las cercanías de Aspen y Glenwood Springs, ver Tabla 6.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \dots (9)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \dots (10)$$

donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio y C_v es la concentración volumétrica de sedimentos (Ver Tabla 7, Figuras 8 y 9).

Tabla 6

Propiedades de las matrices de flujos hiperconcentrados (sólo limo y arcilla)

Sample	Distribución del tamaño de sedimento				Límite líquido	Índice plástico
	Arcilla (%)	$D_{16}\ (mm)$	$D_{50}\ (mm)$	$D_{84}\ (mm)$		
Glenwood original	4.8	0.010	0.034	0.062	-	-
Glenwood sample 1	6.8	0.009	0.023	0.050	-	-
Glenwood sample 2	3.0	0.016	0.035	0.061	-	-
Glenwood sample 3	4.8	0.011	0.025	0.053	-	-
Glenwood sample 4	7.6	0.001	0.018	0.032	-	-
Aspen Pit 1	31.3	0.001	0.011	0.032	0.32	0.11
Aspen natural soil	27.0	0.001	0.012	0.028	0.25	0.06
Aspen mine fill	27.8	0.001	0.013	0.030	0.24	0.06
Aspen natural soil source	31.6	0.001	0.016	0.039	-	-
Aspen mine fill source	25.2	0.001	0.018	0.061	-	-

Nota. La tabla muestra las propiedades de los flujos hiperconcentrados en cuanto al tamaño del sedimento, el límite liquido e índice plástico. Adaptado de “Aplicación

de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú", por O'Brien y Julien, 1988, como se citó en Castillo, 2006.

Tabla 7

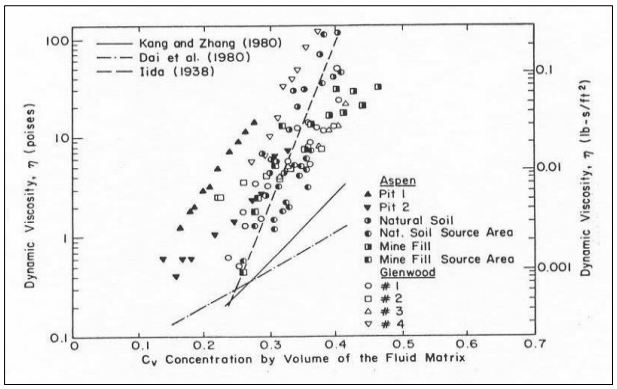
Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv

Fuente	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α	β	α	β
Correlaciones de mediciones en Campo:				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0,0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0,0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0,0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Correlaciones disponibles de la literatura:				
lida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al.(1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1 – 32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

Nota. La tabla muestra los valores de los coeficientes α y β del esfuerzo de cedencia y viscosidad en función a la concentración volumétrica Cv. Adaptado de "Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú", por O'Brien y Julien, 1988, como se citó en Castillo, 2006.

Figura 8

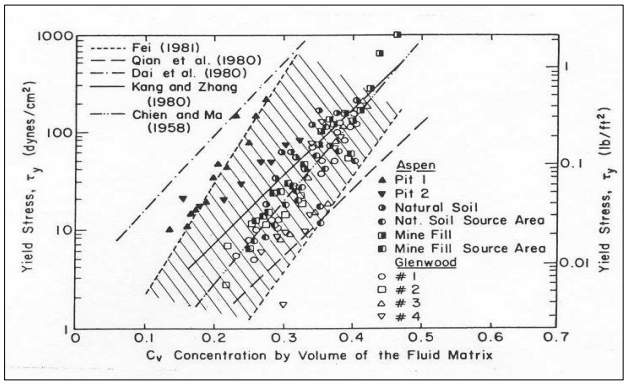
Viscosidad dinámica de muestras de flujos hiperconcentrados versus concentración de sedimentos



Nota. La figura muestra la viscosidad dinámica de los flujos hiperconcentrados en función a la concentración volumétrica. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 86), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

Figura 9

Esfuerzos de cedencia de muestras de flujos hiperconcentrados versus concentración de sedimentos



Nota. La figura muestra los valores de esfuerzos de cedencia de los flujos hiperconcentrados en función a la concentración de sedimentos. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 86), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

3.2.2.2.5. Concentración de sedimentos Cv

En un evento de flujo de escombros, se prevé una variación en la concentración volumétrica C_v a lo largo del tiempo, comenzando en torno a 0.2 e incrementando gradualmente a valores de 0.35 a 0.45, variando según la naturaleza del material sedimentario en la zona; n valor cercano a 0.45 para situaciones de flujo de barro y escombros, se sugiere que el punto más alto de C_v ocurra unos minutos previos al punto máximo del hidrograma líquido (Celi y Tanta, 2019).

A continuación, se observa la clasificación por O'Brien, ver Tabla 8:

Tabla 8

Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv

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 se observa flujo; se presenta una falla debido al deslizamiento de los bloques.
	0.55 – 0.65	0.76 – 0.83	Colapso de bloques con alteraciones internas durante el deslizamiento, desplazamiento gradual del terreno antes de que ocurra el fallo.
Flujos de lodo (Mudflow)	0,48 – 0.55	0.72 – 0.76	Flujo evidente; deslizamiento gradual sostenido por el flujo de barro; deformación plástica debido a su propio peso; presenta cohesión; no se expande en la parte superior.
	0.45 – 0.48	0.69 – 0.72	Flujo se dispersa en la superficie; se trata de un flujo con propiedades cohesivas; existe cierta interconexión
Avenida de lodo (Mud Flood)	0,40 – 0,45	0.65 – 0.69	El flujo se combina con facilidad, exhibiendo características fluidas durante su deformación. Se distribuye sobre una superficie plana, aunque conserva una inclinación fluida. Las partículas de mayor tamaño se sedimentan, mientras que se generan ondas que se disipan con rapidez.
	0.35 – 0.40	0.59 – 0.65	Acumulación concentrada de gravas y piedras redondas; se extiende casi por toda la superficie plana; se presenta la interfaz líquida con dos estados del fluido; las olas se propagan en la capa superior.
	0.30 – 0.35	0.54 – 0.59	División del agua en la superficie; las olas se desplazan con facilidad; la mayor parte de las arenas y gravas se ha depositado y se trasladan como carga de fondo.

	0.20 – 0.30	0.41 – 0.54	Se pueden identificar claramente las olas y las ondas, mientras que todas las partículas permanecen en reposo en el fondo.
Inundación de agua	< 0.20	< 0.41	Flujo de agua con partículas en suspensión y sedimentos en el fondo.

Nota. En la tabla se muestra los valores de concentración de sedimentos en volumen y peso con su respectiva descripción y características de los flujos. Adaptado de “Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú”, O’Brien, 2000, como se citó en Castillo, 2006.

Celi y Tanta (2019) afirma que el modelo FLO - 2D mantiene la coherencia en cuanto al flujo de agua y sedimentos, considerando en cada división espacial los intervalos de tiempo, la cantidad de agua y sedimentos, y las variaciones relacionadas con la concentración de sedimentos que serán evaluada.

Las fórmulas relacionadas a los flujos hiperconcentrados, se detallan a continuación:

$$C_v = \frac{volumen\ del\ sedimento}{volumen\ del\ agua + sedimento} \dots (11)$$

y C_v, es descrito como concentración de sedimentos por peso por:

$$C_v = \frac{C_w \gamma}{\gamma_s - C_w(\gamma_s - \gamma)} \dots (12)$$

donde γ = peso específico del agua y γ_s = peso específico del sedimento.

“El peso específico de la mezcla de flujo de lodo γ_m es una función de la concentración de sedimento por volumen:

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \dots (13)$$

Similarmente la densidad de la mezcla del flujo de lodo ρ_m es dado por:

$$\rho_m = \rho + C_v(\rho_s + \rho) \dots (14)$$

$$\rho_m = \frac{\gamma_m}{g} \dots (30)$$” (Celi y Tanta, 2019, p. 88).

3.2.2.3. Mapa de Amenaza o Nivel de peligro

Las representaciones de los peligros naturales en mapas son utilizadas en todo el mundo como herramienta de regulación para prevenir desastres causados por inundaciones y proteger la vida de las personas; el riesgo de inundación en un área determinada depende de la intensidad y la posibilidad de que ocurra, la intensidad se mide por la velocidad del flujo del agua, mientras que la probabilidad está asociada con la intensidad de las inundaciones: los eventos de inundación de mayor magnitud ocurren con menor frecuencia (Huaman y Tito, 2020).

Huamán y Tito (2020) menciona que la definición del riesgo de inundación incluye la combinación de la gravedad del evento y la frecuencia del mismo, siendo esta una función discreta; cada país tiene sus propios criterios para determinar el nivel de peligrosidad de una intensidad de inundación, algunas de ellas son: USA: $f(h)$; Austria: $f(h, \frac{v^2}{2.g})$ y Switzerland: $f(h, v.h)$.

A partir de estos elementos, se puede apreciar que la cartografía de riesgo de inundación está influenciada por la altura del agua, la rapidez del flujo y la frecuencia de eventos extremos (Huaman y Tito, 2020), tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Niveles de peligro de inundación basados en la frecuencia e intensidad de Inundación

Intensidad	**Alta**				
	Media				
	Baja				
Frecuencia		Alta	Media	Baja	Muy baja
Periodo de retorno		10	100	500	>> 500
Probabilidad de excedencia		10 %	1 %	0.20 %	<< 0.20 %

Nota. En la figura muestra los niveles de peligro de acuerdo a la intensidad alta, media y baja, así como la frecuencia y la probabilidad de excedencia al periodo de retorno. Adaptado de *Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D,*

de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica (p. 121), por Huamán y Tito, 2020, http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339.

La fuerza de una crecida se calcula mediante la unión entre la altura y la rapidez del agua, al mismo tiempo que la posibilidad de que suceda está ligada de manera contraria al tamaño de la inundación; por lo tanto, los eventos de gran magnitud son menos frecuentes, pero más destructivos en comparación con los eventos de menor magnitud, que son más comunes, pero menos perjudiciales; los mapas de peligrosidad muestran áreas con diferentes niveles de amenaza potencial (Huaman y Tito, 2020), como se detalla en la Tabla 9.

Tabla 9

Definición de nivel de amenaza

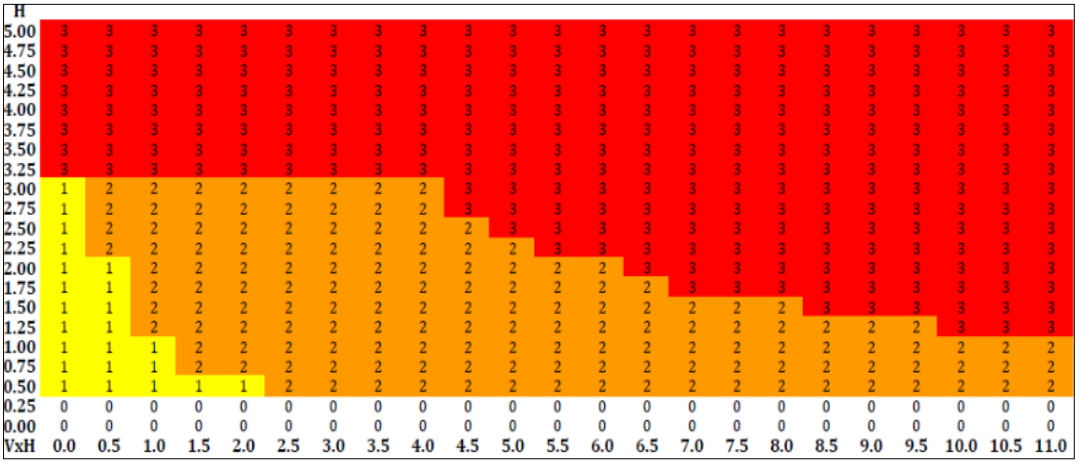
Nivel de amenaza	Color en el mapa	Descripción
Alto	Rojo	Las personas se encuentran en un nivel de amenaza alta, tanto en el interior como en el exterior de sus viviendas. Las estructuras pueden sufrir daños significativos.
Medio	Naranja	Las personas se encuentran en una situación de riesgo al estar fuera de sus hogares. Las estructuras pueden experimentar deterioro e incluso destrucción, dependiendo de los materiales empleados en su construcción.
Bajo	Amarillo	El riesgo para la población es mínimo o nulo. Las estructuras pueden experimentar daños leves, aunque los sedimentos podrían impactar en el interior.

Nota. La tabla muestra de nivel de amenaza. Adaptado de "Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica", por Huamán y Tito, 2020.

Las intensidades de inundación se definen en función de la profundidad máxima del agua y la multiplicación de la velocidad máxima por la profundidad máxima, como se muestra en la Figura 11 de la hoja de cálculo; se comparan los umbrales de intensidad que distinguen los niveles alto, medio y bajo con los impactos observados durante la inundación de diciembre de 1999 en Venezuela (Huaman y Tito, 2020).

Figura 11

Intensidades de inundación del flujo hiperconcentrado basadas en profundidades y velocidades de flujo



Nota. En la figura se muestra los valores de intensidad de inundación basado en profundidades h (m) y velocidades del flujo v (m/s) de los flujos hiperconcentrados. Tomado de *Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica* (p.122), por Huaman y Tito, 2020, http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339.

Los umbrales de intensidad calibrados que se muestran en las Tablas 9 y 10 fueron conseguidos al comparar las predicciones de riesgo generadas por este enfoque con las áreas reales afectadas en más de 30 zonas de llanuras aluviales. Dentro del software avanzado FLO - 2D (MAPPER), se realiza una distinción entre las inundaciones provocadas por agua, como se especifica en la Tabla 10, y las inundaciones causadas por flujos de lodo y escombros ver Tabla 11 (Huaman y Tito, 2020).

Tabla 10

Intensidad de inundación de agua (Water flood)

Intensidad de inundación	Profundidad máxima H (m)	Operación lógica	El producto de la profundidad máxima h por la velocidad máxima v (m^2/s)
Alto	H > 1.0m	OR	VxH > 1.0m^2/s
Medio	0.2m < H < 1.0m	OR	0.2 m^2/s < VxH <1.0m^2/s
Bajo	0.2m < H < 1.0m	AND	VxH <0.2m^2/s

Nota. La tabla muestra los valores de profundidad máxima en función a la intensidad de inundación de agua. Adaptado de “Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica”, por Huaman y Tito, 2020.

Tabla 11

Intensidad de inundación de flujos de lodo y escombros (Mud and debris flow)

Intensidad de inundación	Profundidad máxima H (m)	Operación lógica	El producto de la profundidad máxima h por la velocidad máxima v (m^2/s)
Alto	H > 1.0m	OR	VxH > 1.0m^2/s
Medio	0.2m < H < 1.0m	OR	0.2 m^2/s < VxH <1.0m^2/s
Bajo	0.2m < H < 1.0m	AND	VxH <0.2m^2/s

Nota. La tabla muestra los valores de profundidad máxima en función a la intensidad de inundación del flujo de lodo y escombro. Adaptado de “Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay – Huancavelica”, por Huaman y Tito, 2020.

3.3. Definición de términos

3.3.1. Amenaza

Vallance y Scott (1997, como se citó en Escobar y Poma, 2018) refiere que una amenaza se define como un suceso o fenómeno perjudicial con una determinada magnitud o alcance, que presenta una probabilidad considerable de suceder en un lapso temporal específico.

3.3.2. Caudal

El caudal se define como la cantidad de líquido que circula por un punto determinado en un sistema de agua en un instante o periodo dado (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.3.3. Flujos hiperconcentrados

Las corrientes de sedimentos altamente concentrados pueden ser categorizadas en distintas formas, incluyendo inundaciones de lodo, flujos de lodo y deslizamientos de

escombros; además, se pueden clasificar como inundaciones de lodo y deslizamientos de escombros, siendo eventos de crecimiento con altas concentraciones de sedimentos que exceden el 20% en volumen (Eder et al., 2017; Huaman y Tito, 2020). El flujo hiperconcentrado está compuesto por una combinación de partículas de gran tamaño y agua. Las partículas granulares predominan en este tipo de mezcla, como arena, grava, cantos rodados y bloques, lo que resulta en una mezcla sin cohesión. De hecho, se clasifica como un flujo altamente concentrado cuando la cantidad de sedimentos en relación con el agua en el flujo varía entre un 20% y un 60% en volumen (Castillo, 2006).

3.3.4. Hidrograma

Un hidrograma es el diagrama de nivel o flujo en función del tiempo, dependiendo del objetivo del gráfico; las medias anuales y mensuales o el total de flujo se emplea para exhibir el registro del volumen de agua que se desplaza a través de una estación (Linsley et al., 1977).

3.3.5. HEC-HMS

El HEC-Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers ha creado un sistema de modelización que permite simular el comportamiento de una cuenca fluvial ante la precipitación, representando la cuenca como un conjunto de componentes hidrológicos e hidráulicos interconectados (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.3.6. Modelo FLO-2D

El modelo FLO-2D también conocido como un modelo bidimensional de diferencias finitas FLO - 2D de O'Brien, es utilizado para simular la dinámica de fluidos no newtonianos, como los flujos de agua en terrenos con pendientes pronunciadas, en depósitos aluviales; este enfoque puede simular el movimiento en áreas complejas de alta urbanización y zonas propensas a inundaciones, permitiendo la transferencia de líquido entre canales y zonas inundables; es posible simular el desplazamiento de líquidos, flujos de sedimentos muy

concentrados, lodazales e inundaciones repentinas. Requiere información como la topografía del terreno, la forma del canal, la estimación de la rugosidad del canal y de la zona inundable, datos sobre los patrones de precipitación, y las propiedades reológicas del agua y del sedimento (Gamion, 2014, como se citó en Huaman y Tito, 2020).

3.3.7. Simulación

Una simulación por computadora es un programa informático que crea una representación de un sistema abstracto en un ordenador. Estas simulaciones son utilizadas en diferentes disciplinas científicas como la física, la astrofísica, la química y la biología. Pueden variar en duración desde unos minutos hasta varios días, dependiendo de la complejidad del modelo y la cantidad de recursos informáticos utilizados (Davies y McSaveney, 2002, como se citó Huaman y Tito, 2020).

3.3.8. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el intervalo requerido para que una gota de líquido recorra la distancia total desde el extremo más alejado de la zona de recolección hasta llegar a su destino final (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2008).

3.3.9. Peligro

Se describe que el peligro es la posibilidad de que un evento perjudicial de origen natural ocurra en una ubicación determinada, con cierta magnitud y dentro de un período y frecuencia establecidos (CENEPRED, 2014). En diferentes naciones, la documentación técnica que se enfoca en la investigación de los fenómenos naturales emplea la palabra "amenaza" en lugar de "peligro" para describir la situación.

3.3.10. Período de retorno

De acuerdo a Steijn (1996, como se citó en Huaman y Tito, 2020) se refiere a la inversa de la posibilidad de que suceda un acontecimiento particular en un determinado año, considerando el tiempo entre eventos naturales similares en magnitud o intensidad;

se aproxima a la inversa de la probabilidad de que dicho evento supere cierto umbral en un año.

3.3.11. Precipitación máxima

Se define como la noción de un límite estimado de valor se encuentra implícita en las precipitaciones máximas probables (PMP) comúnmente utilizadas y en la corriente máxima probable (CMP) correspondiente (Chow et al., 1994).

3.3.12. Velocidad

La velocidad se define como la conexión entre la cantidad de agua en movimiento y la superficie de la sección perpendicular al flujo de agua (Chow, 2004).

3.3.13. Sedimento

Se define como sedimento a cualquier sustancia que es más densa que el agua, transportada por la corriente en algún momento y luego depositada (Gamión, 2014, como se citó en Huaman y Tito, 2020).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

La presenta investigación corresponde al tipo **aplicada** debido a que se usará el aporte de teorías científicas (Borja, 2016), tal como lo menciona Oseda Gago (2008, como se citó en Escobar y Poma, 2018) afirma que debido a la naturaleza de nuestro análisis, el estudio actual cumple con los requisitos necesarios para ser clasificado como una investigación aplicada. Sus objetivos son más pragmáticos, orientados a la aplicación práctica de normativas, leyes, manuales y herramientas técnicas en la recopilación de datos.

De hecho este estudio se caracteriza por tener objetivos prácticos claros y concretos, es decir, se realiza con la intención de intervenir, modificar o generar transformaciones en un área específica de la sociedad, puesto que este tipo de estudio busca resolver problemas prácticos y específicos utilizando el conocimiento científico existente para abordar y solucionar problemas del mundo real (Carrasco, 2005).

El nivel alcance de la investigación **es correlacional**; puesto que el propósito de un alcance correlacional, consiste en entender la conexión o nivel de vinculación que haya entre dos o más ideas o variables, clasificaciones o factores en un entorno determinado; ya que se pretende relacionar las variables entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D; en cierta medida el alcance correlacional tiene la capacidad de ofrecer información explicativa es limitada, ya que el conocimiento sobre la relación entre dos conceptos o variables permite comprender cierta parte de la situación (Hernández et al., 2014).

El método es **hipotético deductivo**, ya que partiendo de premisas generales se llega a una conclusión particular, que se considera una hipótesis que se debe poner a prueba para confirmar su veracidad; si la hipótesis es cierta, se incrementa el conocimiento teórico y se pueden plantear soluciones a problemas prácticos; en caso contrario, se debe

reformular la hipótesis o buscar una nueva orientación basada en otros principios teóricos (Hurtado, 2010; Sánchez, 2019). Dado que nuestro estudio tiene hipótesis, las probaremos o refutaremos para sacar conclusiones que sean relevantes para nuestras preguntas.

El diseño se define como un conjunto de métodos y técnicas que orientan la resolución de un problema, por lo tanto, es fundamental que esté relacionado estrechamente con la naturaleza del problema y el objetivo de la investigación (Carrasco, 2005).

La presente investigación utiliza un diseño **No experimental** donde las variables independientes no son intencionalmente manipuladas y no se utilizaron grupos de control o experimentación. Se analizaron y estudiaron los hechos y fenómenos de la realidad una vez ocurridos (Carrasco, 2005). Por lo que se estudió el efecto de las precipitaciones máximas en el nivel de peligro generado por flujos hiperconcentrados en la quebrada Sahuanay, de esta manera se determinó mapas de amenaza el cual permite al usuario conocer el nivel de peligro el cual estarán sometidos.

El diseño no experimental se presenta de forma **longitudinal**, es decir la temporalización es longitudinal, porque se limitó analizar los hechos de las precipitaciones máximas en un periodo de tiempo desde el año 1964 al 2021, se emplea que para entender los acontecimientos y sucesos que ocurren en el mundo, tanto desde una perspectiva individual como en su evolución a lo largo del tiempo, incluyendo periodos de dos, tres o más años (Carrasco, 2005). A su vez es correlacional causal ya que se pretende medir la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay (Hernández et al., 2014). Por lo que se consideró un diseño con combinaciones, en efecto “las combinaciones son permitidas siempre y cuando no existan contradicciones entre ellas” (Vara, 2012, p. 210).

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Temporal

Se desarrolló con datos históricos de precipitaciones máximas en 24 horas (mm) de la estación Granja San Antonio – Abancay desde el año 1964 hasta el año 2021.

4.2.2. Espacial

La presente tesis se realizó en la quebrada de Sahuanay el cual está ubicado en el distrito de Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

La población de estudio son los datos hidrometereológicos siendo 696 datos precipitación máximas en 24 horas (mm) tomados mensualmente desde el año 1964 al 2021 en la Estación (código: 47263360): Granja San Antonio, ubicado en el distrito de Tamburco, provincia de Abancay, departamento de Apurímac, Lat.: 13º36’17.7’’ S Long.: 72º51’24.9’’ W Alt.: 2780msnm. Tipo: Automática – Meteorológica.

4.3.2. Muestra

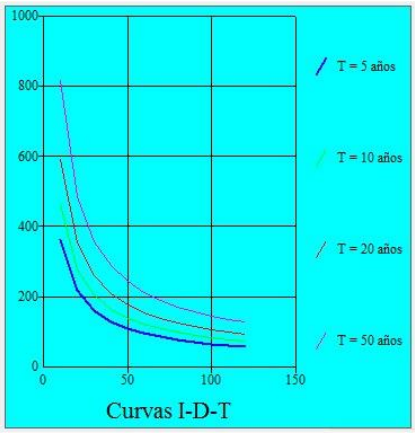
La muestra de estudio son 52 datos de precipitaciones máximas en 24 horas (mm), donde el muestreo es no probabilístico porque se escogió el dato mayor de precipitación máxima en 24 horas (mm) mensual por cada año desde el año 1964 al 2021, siendo 52 datos de precipitaciones máximas en 24 horas (mm) proporcionados por el SENAMHI.

4.4. Instrumentos

Para Borja (2016) considera que la técnica a considerar para la recolección de información en ingeniería es la observación, por ello es que se usara diferentes formatos las cuales son instrumentos de recolección de información. Las técnica e instrumentos para la presente investigación son los siguientes:

Tabla 12

Técnicas e instrumentos

Técnicas	**Instrumentos**
La técnica es mediante la observación no experimental, con la adquisición de datos hidrometereológicos del SENAMHI.	Instrumento Nº 01: Precipitaciones máximas por año
La técnica es mediante la observación no experimental, con la ayuda del modelo HIDROESTA2 se podrá determinar la Curva IDF (Intensidad, Duración y Frecuencia) el cual se ingresarán datos de precipitación máxima por año en la opción de Distribuciones (siendo parte del menú principal del HIDROESTA2, y de esta manera se determinará la curva IDF como se muestra a continuación: 	Instrumento Nº 02: Curva Intensidad, duración y frecuencia (IDF)
Del mismo modo con dicha información anterior se podrá determinar los hietogramas de precipitación de diseño por el método de bloque alterno – Modelo Dick Peschke, donde se va a generar nuestros hietogramas de bloque alterno, donde la duración esta expresada cada hora, la intensidad que ya está en función de la ecuación de intensidad como se muestra a continuación: $$\mathrm{I} = \frac{K \times T^m}{D^n}$$ Donde: I: Intensidad máxima (mm/h) T: Período de retorno en años = que va desde 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años el cual se desea evaluar. D: Duración de la precipitación (min) el valor de k, m y n ya son calculadas en HidroEsta 2, para ello se debe tener en el primer campo las duraciones en el segundo campo los periodos de retorno y en el tercer campo las intensidades.	Instrumento Nº 03: Hietogramas de precipitación de diseño (mm) por el método de bloque alterno – Modelo Dick Peschke

La técnica es mediante la observación, con la adquisición de imágenes satelitales (descargados de ALOS PALSAR) y con el apoyo del modelo QGIS se procesará el DEM para lo cual se incorporará dicha data para proceder a realizar la delimitación automática de la cuenca hidrográfica y la determinación de parámetros geomorfológicos de la quebrada Sahuanay.	Instrumento Nº 04: Determinación de parámetros geomorfológicos de la quebrada Sahuanay mediante la delimitación automática de la cuenca hidrográfica con apoyo del Modelo QGIS introduciendo topografía digital siendo el modelo digital de terreno (DEM).
La técnica es mediante la observación no experimental, con la ayuda del modelo HEC-HMS podremos determinar el caudal liquido (estimación del hidrograma de avenida). Para el cálculo del hidrograma de avenida se empleará uno de los métodos más sencillos siendo la metodología, el cual requiere datos de la cuenca y datos de precipitaciones máximas (hietogramas).	Instrumento Nº 05: Determinación del caudal líquido
La técnica es mediante la observación, con ayuda de fuentes secundarias (bibliografía).	Instrumento Nº 06: Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning
La técnica es mediante la observación de campo y laboratorio, mediante el estudio de mecánica de suelos, el cual se realizará la colecta de muestras de suelos (tomándose muestras representativas entre 2 a 3 muestras de suelos de 10 kg por muestra) de la quebrada Sahuanay para realizar los ensayos de laboratorio como son: análisis granulométrico, límites de consistencia (Limite Liquido (LL), Limite plástico (LP), Índice de Plasticidad (IP)), y gravedad específica). El tiempo a realizar la visita de campo y toma de muestras será de 1 día, en caso de falta de recolección de información se considerará unos días más entre 2 a 3 días. A partir de dicho estudio se aplicará información bibliográfica del modelo FLO - 2D (O'Brien) para la determinación de parámetros reológicos.	Instrumento Nº 07: Determinación de parámetros reológicos
La técnica es mediante la observación, con la ayuda del programa de cómputo FLO-2D. El modelo FLO - 2D (O'Brien) utiliza diferencias finitas para simular el flujo de fluidos no newtonianos con alta concentración de sedimentos. Se consideran datos como la topografía del terreno, la rugosidad del canal, la planicie de inundación, los hidrogramas de entrada líquidos y sólidos, calculados basados en las precipitaciones, y las propiedades reológicas del	Instrumento Nº 08: Datos de salida del modelo FLO-2D

agua-sedimento. Dando como resultados los siguientes datos de salida: tirantes y velocidades que serán representados mapas o zonas de amenaza, estas zonas con diferentes amenazas se diferencian entre sí mediante los colores rojo, naranja y amarillo según la amenaza sea alta, media o baja. Cada tipo de amenaza corresponde a una serie de daños a personas y edificaciones, de acuerdo a la metodología propuesta en el proyecto PREVENE (Basabe, 2001, como se citó en Castillo Navarro, 2006). Dicha metodología de PREVENE (2001) ha sido empleada en distintos estudios de amenazas y reconocida internacionalmente por la Agencia de Emergencias (FEMA) de los Estados Unidos. Los mapas generados para distintos períodos de retorno son clasificados en 3 zonas de Alto (3), Medio (2) y Bajo (1) Peligro.	

Nota. En la tabla se da a conocer los instrumentos con sus respectivas técnicas para la determinación de los diferentes resultados.

4.5. Procedimientos

El uso de modelos científicos es esencial para analizar, recolectar y procesar datos de investigaciones de forma automática. En primer lugar, se llevó a cabo un análisis estadístico para verificar los datos de precipitaciones máximas mensuales, asegurando que estuvieran dentro de los límites establecidos. Posteriormente, se realizó la prueba de Smirnov-Kolmogorov para seleccionar una distribución teórica comúnmente utilizada en hidrología, basada en datos del histórico de precipitaciones máximas mensuales.

Para la estadística aplicada en el análisis del efecto de precipitaciones máximas, la presente tesis se usó la estadística considerada por el autor (Villón, s. f.) el cual considera medidas de las distribuciones, como la media aritmética, la mediana, la moda, la varianza, desviación estándar, coeficiente de variación: sesgo, curtosis.

4.6. Análisis de datos

4.6.1. Coeficiente de correlación lineal

De hecho existe una conexión o correlación entre dos variables cuando una de ellas guarda cierta relación con la otra (Tupac, 2018).

Tupac (2018) define que: el coeficiente de correlación lineal ***r*** mide la fuerza de la relación lineal entre los valores cuantitativos apareados ***x*** y ***y*** en una muestra.

El valor de *r* siempre debe estar entre -1 y +1.

$$\boldsymbol{r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} * \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}}} \ldots (\mathbf{15})$$

4.6.2. Prueba de hipótesis de correlación

La hipótesis nula H_0: $\rho = 0$ (No existe una correlación lineal).

La hipótesis alternativa H_1: $\rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal).

Una vez planteada la hipótesis, podemos darle solución a esta prueba bajo dos métodos:

Método 1: Estadístico de Prueba es ***t***

Método 2: Estadístico de Prueba es ***r***

Para el primer método 1: El Estadístico de Prueba es *t*

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1 - r^2}{n - 2}}} \ldots (16)$$

Para obtener los valores críticos: se tiene que trabajar con la Tabla Distribución t

Grados de Libertad: n-2, donde n, es el tamaño de la muestra que vamos a tomar.

Conclusión:

Si: $|t| > El\ Valor\ Crítico, Rechace\ H_0$ Concluye que hay una relación lineal.

Si: $|t| \leq El\ Valor\ Crítico, No\ Rechace\ H_0$

Para el segundo Método 2: Estadístico de Prueba es ***r***

Los Valores críticos: se va obtener de la Tabla de valores críticos (V.C.) del Coeficiente de Correlación ***r*** de Pearson.

Conclusión:

Si: $|r| > El\ Valor\ Crítico, Rechace\ H_0$ Concluye que existe una relación lineal.

Si: $|r| \leq El\ Valor\ Crítico, No\ Rechace\ H_0$

En este momento, se requiere llevar a cabo un análisis detallado utilizando el Análisis de Relación, con el propósito concreto de determinar la relación que hay entre dos variables.

4.6.2.1.1. Cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r" para la Prueba para la hipótesis específica 1

Aplicando el cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r":

$$r = \frac{cov(x, y)}{S_x S_y} \dots (17)$$

Donde:

r: Coeficiente de correlación de Pearson

$cov(x, y)$: Covarianza entre X e Y

S_x: Desviación estándar de X

S_y: Desviación estándar de Y

4.7. Consideraciones éticas

Dentro de las consideraciones éticas de la Tesis, referimos que cualquier estudio debe estar guiado por objetivos y metas ligadas a la adquisición de conocimiento, la respuesta a requerimientos específicos, la formulación de respuestas y la labor innovadora (Hurtado, 2010).

De este modo la investigación se implicó al cumplimiento formal y académica, el cual respetó los criterios formales y las exigencias que corresponde al tipo de investigación de éste trabajo, así como los criterios metodológicos que garantizaron la originalidad, la validez y la respectiva confianza en los datos obtenidos, el cual desarrollaré todo el interés que ha de prevalecer como el objetivo académico de conseguir el título de ingeniero civil, ya que es deber del investigador investigar, capacitarse y recurrir a las fuentes pertinentes para adquirir la información necesaria que requiere, con el fin de llevar a cabo su labor siguiendo estándares metodológicos apropiados (Hurtado, 2010).

Esta tesis contó con el apoyo de un asesor el cual ha aportado de manera demostrativa en algunas de las etapas con lo que respecta a la línea de investigación Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible siendo su participación en el ejercicio metodológico e investigativo el cual se realizó de manera sensata, con conocimiento de fines, métodos, orientación, y objetivos.

Esta tesis valida las fuentes informativas, bibliográficas, y data en general ya que estas fuentes de información elegidas son las más apropiadas teniendo en cuenta los objetivos de la investigación y el tipo de material necesario, se ha tenido en cuenta el propósito de la búsqueda, así como las limitaciones tanto personales como de la propia investigación realizada.

La presente tesis tiene la intención de favorecer con el progreso e incremento de la sabiduría científica, acompañado de una postura de aprecio hacia el entorno natural y hacia el individuo, el cual abrirá nuevas opciones para seguir investigando con respecto a modelos numéricos.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

5.1.1. Relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Para relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay. Primero se determinó los hietogramas de precipitación máxima de 24 horas de diseño en la quebrada Sahuanay para diferentes periodos de retorno con los datos obtenidos de la estación hidrometeorológica “Granja San Antonio – Abancay” aplicando las funciones de distribución de probabilidad y el criterio de Dick Peschke.

Para los cálculos hidrológicos y estadísticos aplicado a la hidrología se realizó el análisis de una estación hidrometereológica aplicando el modelo HidroEsta 2. Posterior a ello se pronosticó los diferentes niveles de peligros generado por los flujos hiperconcentrados para diferentes periodos de retornos 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años con la aplicación del modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay.

5.1.1.1. Datos de Precipitación Máxima de la Estación Pluviométrica “Granja San Antonio – Abancay”

A continuación, se muestra los datos de precipitación máxima de manera anual en la Tabla 13 de la estación hidrometereológica pluviométrica “Granja San Antonio – Abancay” estos datos fueron solicitados y recopilados del SENAMHI desde el año más antiguo siendo 1964 hasta el año de estudio de 2021 de la presente tesis, dicha información se encuentra en el Anexo

Si comparamos el registro de precipitaciones del año 1964 de enero a diciembre, podemos observar que el valor máximo fue de 11.5 mm, este dato nos permite calcular el promedio de precipitaciones mensuales y establecer una referencia para analizar la

desviación estándar en futuros análisis estadísticos. Además, se registraron los valores máximos y mínimos de cada mes, así como la cantidad de datos disponibles desde 1964 hasta 2021. Esta metodología nos permite trabajar con datos hidrometeorológicos y analizar la precipitación máxima registrada en 24 horas.

Tabla 13

Datos de precipitación máxima en 24 horas desde el año 1964 hasta 2021

Precipitación Máxima 24 Horas		
N°	**Año**	**Pp max (mm)**
1	1964	11.5
2	1965	22.5
3	1966	35
4	1968	30.5
5	1969	23.8
6	1970	23.1
7	1971	29.9
8	1972	35.6
9	1973	40
10	1974	29.5
11	1975	28.6
12	1976	30.6
13	1977	20.2
14	1978	23
15	1979	29.8
16	1980	25.6
17	1981	26.8
18	1982	18.8
19	1986	14.5
20	1987	22.5
21	1988	21.5
22	1989	20
23	1990	24.5
24	1991	22.2
25	1992	25
26	1993	27
27	1996	35
28	1997	37.2
29	1998	24.9
30	1999	40.2
31	2000	27.3
32	2001	24.4
33	2002	23.4
34	2003	43.7
35	2004	28.6
36	2005	30.6
37	2006	24.6
38	2007	32.1
39	2008	34.9
40	2009	35.9
41	2010	45.1
42	2011	26.5

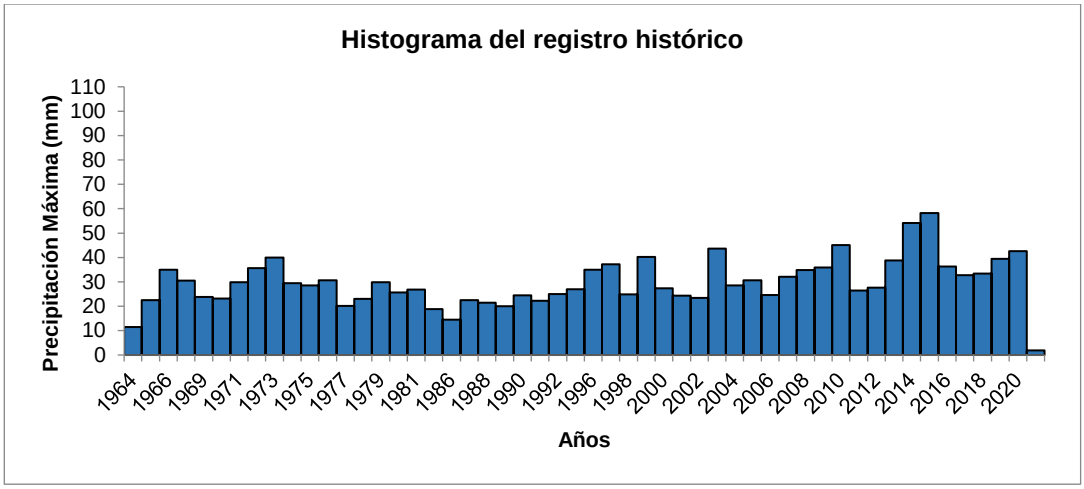
43	2012	27.6
44	2013	38.8
45	2014	54.1
46	2015	58.2
47	2016	36.3
48	2017	32.8
49	2018	33.4
50	2019	39.5
51	2020	42.6
52	2021	1.9

Nota. En la tabla se da a conocer precipitación máxima en 24 horas desde el año 1964 hasta 2021 proporcionados por el SENAMHI.

Se recopilaron los valores de precipitación máxima de 24 horas de todos los años comprendidos entre 1964 y 2021 con el fin de realizar un cálculo de los parámetros estadísticos correspondientes. Además, se analizó el histograma (ver Figura 12) que muestra la variabilidad de la precipitación máxima en dicho período. Se observó que ha habido variaciones, destacando picos de precipitación en los años 2014 y 2015, así como un registro muy bajo en 2021. Ante la presencia de datos dudosos, se procedió a realizar la prueba de datos dudosos para corregir dichos registros.

Figura 12

Histograma de registro histórico desde el año 1964 al 2021



Nota. En la tabla se da a conocer el registro histórico de precipitación máxima en 24 horas desde el año 1964 al 2021 de la estación hidrometereológica pluviométrica “Granja San Antonio – Abancay”.

5.1.1.2. Prueba de Datos Dudosos

Antes de llevar a cabo el análisis estadístico de la prueba de datos dudosos, es necesario realizar un registro y tratamiento de estos datos para corregir la información y poder trabajar de manera eficaz. Por lo tanto, procederemos a corregir los datos dudosos, identificando los datos atípicos para determinar cuáles serán utilizados en base a los años completos de la estación meteorológica "Granja San Antonio - Abancay". Utilizaremos el método Water Resources Council, el cual recomienda verificar los datos dudosos mediante la determinación de un rango de valores utilizando una ecuación de frecuencia.

Umbral de datos dudosos altos (xH: unidad. Logarítmicas):

$$x_H = \bar{x} + k_n \cdot s \ldots (18)$$

Precipitación máxima aceptaba:

$$P_H = 10^{x_H} \ldots (19)$$

Umbral de datos dudosos bajos (xL: unidad. Logarítmicas):

$$x_L = \bar{x} - k_n \cdot s \ldots (20)$$

Precipitación mínima aceptaba:

$$P_L = 10^{x_H} \ldots (21)$$

Donde:

$\bar{x}$: es la media.

s: es la desviación estándar.

K_n : valor que varía según el valor de n (significancia: 10%) el cual se utiliza la tabla de valores K_n para la prueba de datos dudosos.

Tabla 14

Valores *de K_n para la prueba de datos dudosos*

Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n	Tamaño de muestra n	K_n
10	2.036	24	2.467	38	2.661	60	2.837
11	2.088	25	2.486	39	2.671	65	2.866
12	2.134	26	2.502	40	2.682	70	2.893

13	2.175	27	2.519	41	2.692	75	2.917
14	2.213	28	2.534	42	2.700	80	2.940
15	2.247	29	2.549	43	2.710	85	2.961
16	2.279	30	2.563	44	2.719	90	2.981
17	2.309	31	2.577	45	2.727	95	3.000
18	2.335	32	2.591	46	2.736	100	3.017
19	2.361	33	2.604	47	2.744	110	3.049
20	2.385	34	2.616	48	2.753	120	3.078
21	2.408	35	2.628	49	2.760	130	3.104
22	2.429	36	2.639	50	2.768	140	3.129
23	2.448	37	2.650	55	2.804		

Nota. Esta tabla presenta los valores de K_n para un tamaño de muestra, considerando un nivel de significancia del 10% en relación con la distribución normal. Adaptado de “Hidrología Aplicada”, por Chow et al., 1994.

El proceso de la aplicación de datos dudosos se encuentra en Anexos, de este modo se obtiene los valores. Al corregir tanto los datos altos y bajos de la muestra quiere decir que no existe datos dudosos altos ni bajos en la muestra, entonces ya hemos corregido los datos del umbral mínimo y el umbral máximo, en conclusión, estos datos corregidos de precipitación máxima son los que vamos a trabajar para las distribuciones teóricas, siendo los siguientes datos:

Tabla 15

Valores de 50 datos de precipitación máxima de 24 horas con sus respectivos logaritmos

Año	PP máx.	Log(P24hr)
1965	22.5	1.352
1966	35	1.544
1968	30.5	1.484
1969	23.8	1.377
1970	23.1	1.364
1971	29.9	1.476
1972	35.6	1.551
1973	40	1.602
1974	29.5	1.470
1975	28.6	1.456
1976	30.6	1.486
1977	20.2	1.305
1978	23	1.362
1979	29.8	1.474
1980	25.6	1.408
1981	26.8	1.428
1982	18.8	1.274
1986	14.5	1.161
1987	22.5	1.352
1988	21.5	1.332
1989	20	1.301
1990	24.5	1.389

1991	22.2	1.346
1992	25	1.398
1993	27	1.431
1996	35	1.544
1997	37.2	1.571
1998	24.9	1.396
1999	40.2	1.604
2000	27.3	1.436
2001	24.4	1.387
2002	23.4	1.369
2003	43.7	1.640
2004	28.6	1.456
2005	30.6	1.486
2006	24.6	1.391
2007	32.1	1.507
2008	34.9	1.543
2009	35.9	1.555
2010	45.1	1.654
2011	26.5	1.423
2012	27.6	1.441
2013	38.8	1.589
2014	54.1	1.733
2015	58.2	1.765
2016	36.3	1.560
2017	32.8	1.516
2018	33.4	1.524
2019	39.5	1.597
2020	42.6	1.629

Nota. Esta tabla presenta los datos corregidos de las precipitaciones máximas de 24 h mediante la prueba de datos dudosos, quedando 50 datos de precipitación.

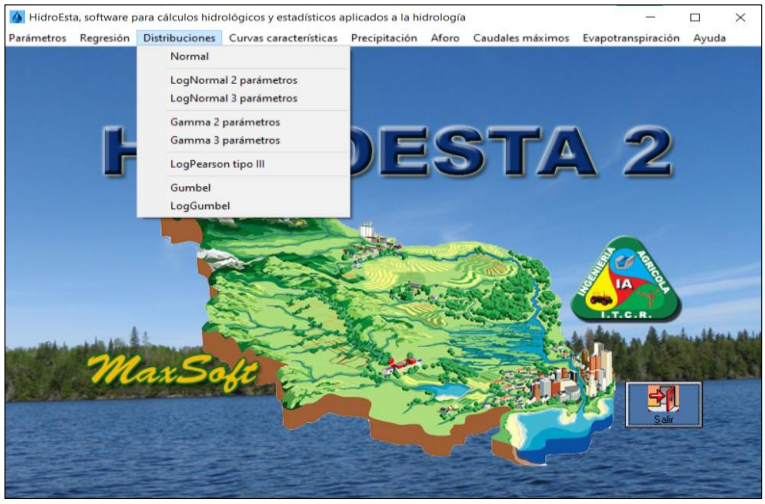
Para ello trabajaremos para diferentes distribuciones de probabilidad que se da a continuación.

5.1.1.3. Distribuciones Teóricas

Para ello trabajaremos para diferentes distribuciones teóricas o también conocidas de probabilidad como son la: Distribución normal, Distribución Log Normal de 2 parámetros, Distribución Log Normal de 3 parámetros, Distribución Gamma de 2 parámetros, Distribución Gamma de 3 parámetros, Distribución Log Pearson Tipo III, Distribución Gumbel y Distribución Log Gumbel, siendo todas las distribuciones teóricas que trabaja el HidroEsta 2 (Villón, 2005), como se muestra en la Figura 13 a continuación.

Figura 13

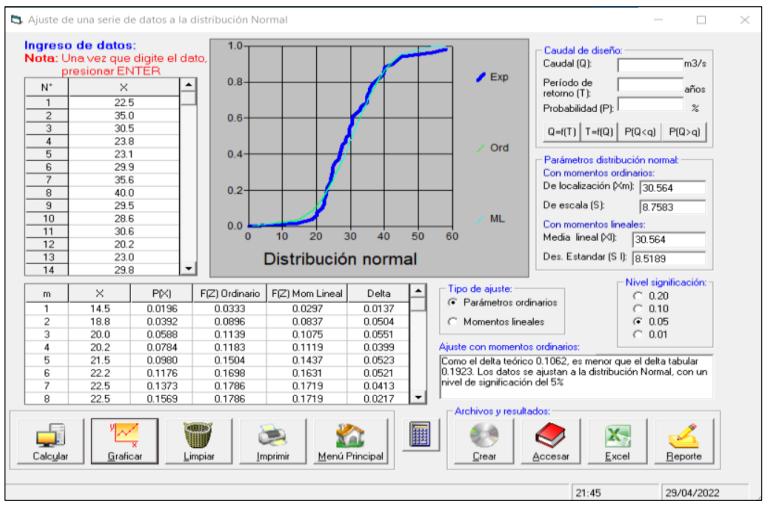
Distribuciones teóricas que trabaja el HidroEsta 2



Nota. La figura muestra todas las distribuciones teóricas con la que trabaja el software HidroEsta 2.

Figura 14

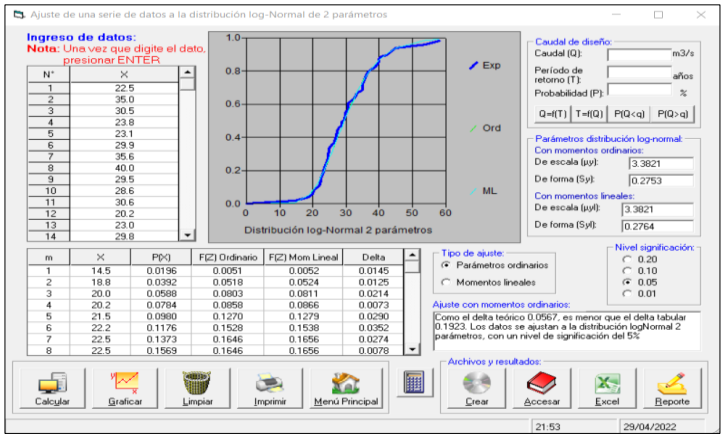
Resultados y gráfica de la Distribución Normal



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.1062 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución normal.

Figura 15

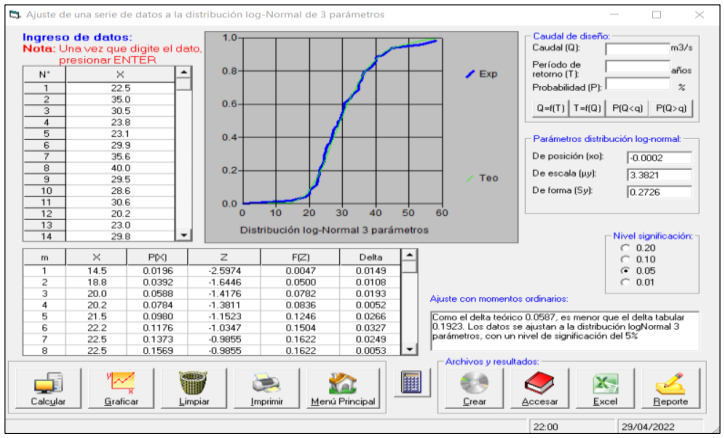
Resultados y gráfica de la Distribución Log Normal de 2 parámetros



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.0567 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Log Normal de 2 parámetros.

Figura 16

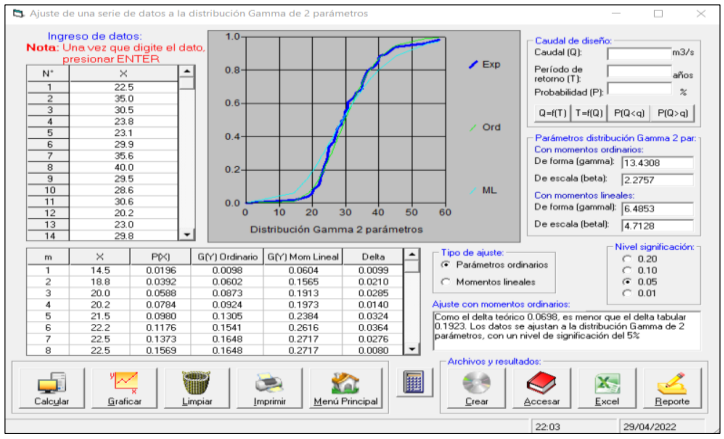
Resultados y gráfica de la Distribución Log Normal de 3 parámetros



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.0587 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Log Normal de 3 parámetros.

Figura 17

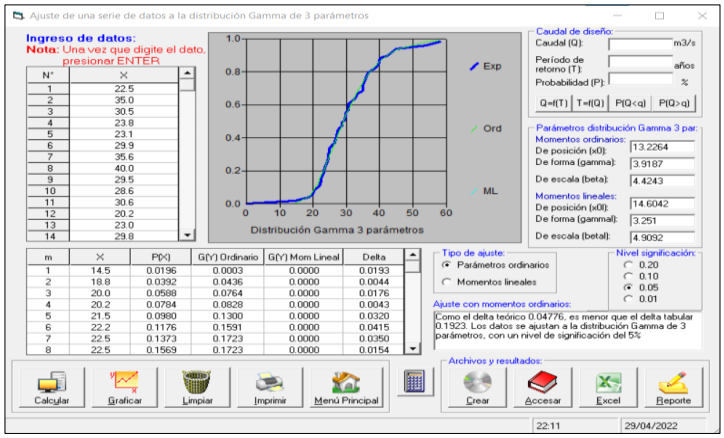
Resultados y gráfica de la Distribución Gamma de 2 parámetros



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.0698 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Gamma de 2 parámetros.

Figura 18

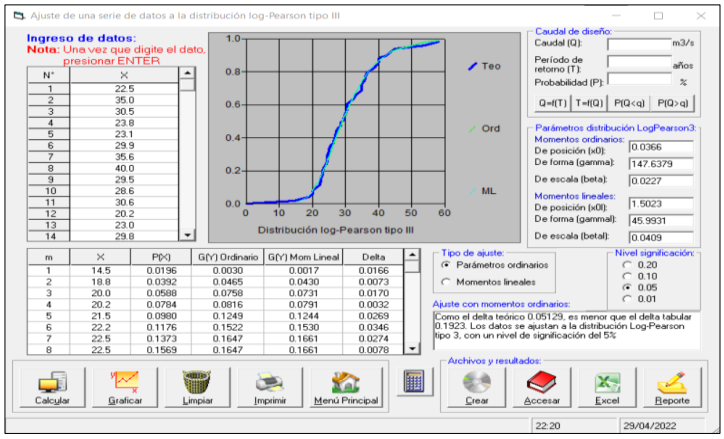
Resultados y gráfica de la Distribución Gamma de 3 parámetros



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.04776 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Gamma de 3 parámetros.

Figura 19

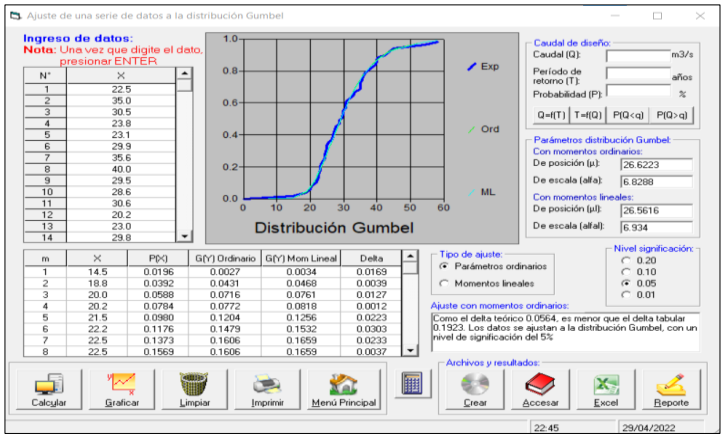
Resultados y gráfica de la Distribución Log Pearson tipo III



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.05129 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Log Pearson tipo III.

Figura 20

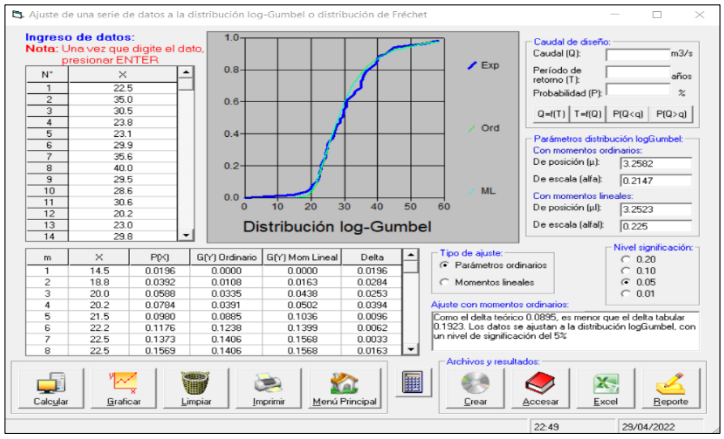
Resultados y gráfica de la Distribución Gumbel



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.0564 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Gumbel.

Figura 21

Resultados y gráfica de la Distribución Log Gumbel



Nota. La figura muestra resultados donde el delta teórico 0.0895 es menor que el delta tabular 0.1923, esto indica que los datos se ajustan a la distribución Log Gumbel.

Las distribuciones teóricas nos ayudan a saber cuál de todas se ajustó a mi serie de datos, HidroEsta 2 trabaja con las distintas distribuciones mencionadas anteriormente.

En las diversas distribuciones, el conjunto de datos, el número de orden y los datos ordenados de menor a mayor conforman el interfaz. En este contexto, se presenta la probabilidad de excedencia, representada por P(x), la cual indica la posibilidad de que un fenómeno sea igualado o superado en un periodo de retorno de 1 cada tres años. Además, se menciona la función acumulada de distribuciones como la normal, lognormal y Gumbel, entre otras. HidroEsta 2 proporciona la función acumulada de los datos ordinarios, los momentos lineales y el valor Delta, fundamental para comparar y determinar la distribución más adecuada para los datos. La herramienta calcula automáticamente los resultados de la distribución normal, los parámetros ordinarios, la media, la desviación estándar y el nivel de significancia, que puede ajustarse en 1%, 5%, 10% y 20%. El criterio de ajuste de Smirnov-Kolmogorov de HidroEsta 2 se basa en el análisis de la discrepancia entre el delta teórico y el delta tabular, con el propósito de evaluar si los datos se ajustan a la distribución

considerada. Las gráficas generadas por la herramienta muestran la probabilidad de excedencia, la función acumulada de los momentos ordinarios y de los momentos lineales, facilitando la visualización y análisis de los datos. Ahora con todos los resultados de las diferentes distribuciones teóricas nos vamos a realizar la prueba de bondad de ajuste.

5.1.1.4. Prueba de Bondad de Ajuste de Smirnov Kolmogorov

El delta tabular es lo mismo para todos solo vamos a calcular el delta teórico para las diferentes distribuciones teóricas, recordando que HidroEsta 2 nos da el reporte si los datos se ajustan o no se ajustan en las distintas distribuciones teóricas.

Tabla 16

Resultados de los deltas teóricos y tabular para las distintas distribuciones de probabilidad

Δ Tabular	Δ teórico de las Distribuciones							
	Normal	Log normal 2 Parámetros	Log normal 3 Parámetros	Gamma 2 Parámetros	**Gamma 3 Parámetros**	log Pearson Tipo III	Gumbel	Log Gumbel
0.1923	0.1062	0.0567	0.0580	0.0698	**0.04776**	0.05129	0.0564	0.0895
MIN Δ	**0.04776**							

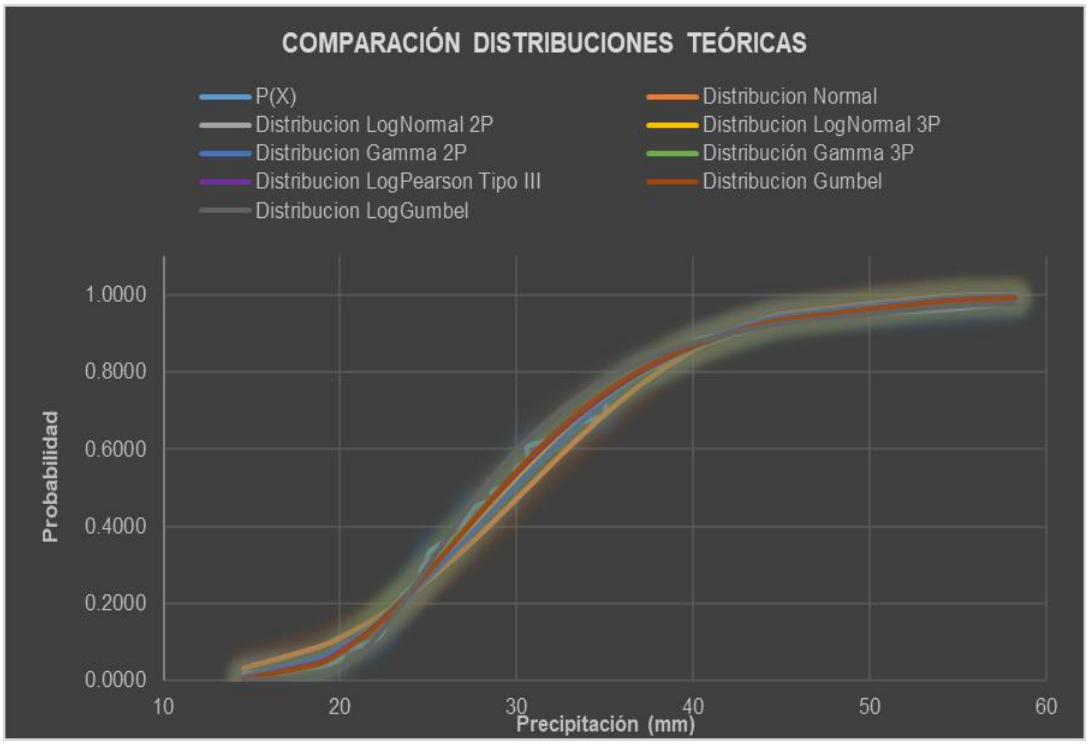
Nota. La tabla muestra los valores de los deltas teóricos y tabular para las diferentes distribuciones de probabilidad.

Si al comparar todas las distribuciones dándoles el valor mínimo, la Distribución Gamma de 3 parámetros tiene un valor de 0.04776, lo que la convierte en la distribución más adecuada para mi serie de datos. Esta afirmación también se puede respaldar visualmente, como se muestra en la Figura 22, donde se puede observar que, además de la Distribución Gamma de 3 parámetros, la distribución Log Pearson tipo III también tiene un valor mínimo. Si se desea realizar una comparación gráfica, es importante analizar el comportamiento de cada distribución en relación con la función de probabilidad P(x) en la gráfica de color azul. En este sentido, la distribución Log Pearson tipo III muestra un ajuste más favorable en comparación con la Distribución Gamma de 3 parámetros, cuyo gráfico es más disperso. A diferencia de la distribución Log Pearson tipo III, la Distribución Gamma

de 3 parámetros presenta un inicio desde el principio de la probabilidad de excedencia, lo que indica un mejor ajuste gráfico. Por lo tanto, considerando estos análisis, se confirma que la Distribución Gamma de 3 parámetros es la más adecuada para mi serie de datos. Esta información será crucial para el cálculo de los parámetros de intensidad, donde se procederá a determinar las precipitaciones en función de los periodos de retorno, utilizando nuevamente HidroEsta y trabajando con la Distribución Gamma de 3 parámetros.

Figura 22

Comparación de distribuciones teóricas



Nota. La figura muestra la comparación de las distribuciones teóricas, mostrando que la distribución Gamma de 3 parámetros es la que se ajusta más a las precipitaciones.

Iniciamos el programa HidroEsta 2, accedemos a las opciones de distribuciones y seleccionamos la distribución Gamma de 3 parámetros. Luego procedemos a cargar los archivos y hacemos clic en el botón de calcular, lo cual nos proporcionará los valores de

precipitación máxima en un periodo de 24 horas para distintos intervalos de retorno utilizando la distribución Gamma de 3 parámetros, lo cual analizaremos posteriormente.

5.1.1.5. Precipitaciones Máximas de 24 horas para Diferentes Periodos de Retorno con la Distribución Gamma de 3 Parámetros

Vamos a calcular las precipitaciones en función del periodo de retorno, para un TR de 2 años la precipitación será de 29.11 mm, para un TR de 5 años damos clic en caudal de diseño, pero también se puede trabajar con precipitaciones así que no tengan ningún inconveniente en ese sentido damos clic en calcular y tenemos la precipitación para 5 años, luego para 10 años calculamos nuevamente la precipitación, luego para 25, 50, 100, 200, 500 y por último 1000 años. Se muestra las figuras de los diferentes resultados de precipitaciones máximas de 24 horas en Anexos.

Por lo que se tiene los resultados de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno con la Distribución Gamma de 3 parámetros.

Tabla 17

Resultados de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno

Precipitación máxima para diferentes periodos de retorno		
TR (años)	**P**	**Distribución Gamma 3 Parámetros X^t**
2	0.500	29.11
5	0.200	37.19
10	0.100	42.30
25	0.040	48.47
50	0.020	52.85
100	0.010	57.07
200	0.005	61.14
500	0.002	66.34
1000	0.001	70.12
Δ	**0.1923**	**0.04776**

Nota. La tabla muestra datos de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno en la distribución Gamma de 3 parámetros.

Donde el delta tabular seria 0.1923 y el delta teórico seria 0.04776, ya tenemos los datos de las precipitaciones máximas en un lapso de 24 horas para cada intervalo de recurrencia también denominado como Tiempo de retorno o período de retorno (TR), estos

datos se debe hacer una corrección esta corrección debe considerar lo siguiente: La OMM (Organización Meteorológica Mundial) sugiere aplicar un factor de ajuste de 1,13 a los datos de estaciones que registran información una vez al día, de acuerdo con la Tabla 18. Según información proporcionada por el SENAMHI, en nuestro caso la medición de la cantidad máxima de lluvia se lleva a cabo al término del día, considerándose como una medición diaria.

Quiere decir que el número de intervalos de nuestra observación como es diaria sea de un día se toma esta relación de 1.13 si estamos trabajando con una serie de datos de dos días se toma el 1.04 como valor de corrección, si estamos trabajando entre 9 y 24 observaciones puede ser de 9 a 24 días si queremos un factor de corrección seria de 1.01.

Tabla 18

Vínculo entre precipitación máxima real y precipitación en intervalos constantes

Número de Intervalo de Observación	Relación
1	1.13
2	1.04
3-4	1.03
5-8	1.02
9-24	1.01

Nota. La tabla muestra valores de relación en función al número de intervalos de observación de la precipitación. Adaptado de “Hidrología para ingenieros”, por Linsley et al., 1977.

Para nuestro caso como estamos trabajando con precipitaciones máximas diarias de 24 horas le vamos a dar de 1.13 quiere decir que la precipitación máxima para diferentes TR corregido sería el valor de precipitación por el factor de corrección, haremos esto para toda la serie de datos, mostrándose los resultados en la Tabla 19.

Tabla 19

Precipitación máxima corregido para diferentes periodos de retorno de la Distribución Gamma de 3 parámetros

TR (años)	P	Distribución Gamma 3 Parámetros X^t
2	0.500	**32.89**
5	0.200	**42.02**
10	0.100	**47.80**
25	0.040	**54.77**
50	0.020	**59.72**
100	0.010	**64.49**
200	0.005	**69.09**
500	0.002	**74.96**
1000	0.001	**79.24**
Δ	**0.1923**	**0.04776**

Nota. La tabla muestra los resultados de precipitación máxima corregidos en función a la distribución Gamma de 3 parámetros en diferentes periodos de retorno.

Entonces a partir de estos datos de precipitación en función del periodo de retorno vamos a calcular las intensidades máximas, lo vamos hacer en función de lo que trabaja el HidroEsta 2, los resultados lo colocamos a un archivo Excel, así que estos datos son los que vamos a trabajar para calcular la curva de intensidad, duración y frecuencia, así que vamos a necesitar los datos de precipitación.

Una vez que ya tengamos las precipitaciones en cada periodo de retorno como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20

Máximas precipitaciones asociadas a diversos intervalos de retorno utilizando una distribución Gamma de 3 parámetros

TR (años)	Probabilidad de Excedencia P = F(x)	Probabilidad de no Excedencia 1-F (x)	Z
2	0.500	0.500	32.89
5	0.200	0.800	42.02
10	0.100	0.900	47.80
25	0.040	0.960	54.77
50	0.020	0.980	59.72
100	0.010	0.990	64.49
200	0.005	0.995	69.09
500	0.002	0.998	74.96
1000	0.001	0.999	79.24

Nota. La tabla muestra los resultados de precipitación máxima corregidos asociados a los intervalos de periodos de retorno y su probabilidad de excedencia.

A continuación, se calculó las curvas IDF con el criterio de Dick y Peschke.

5.1.1.6. Curvas IDF con el criterio de Dyck y Peschke

El criterio de Dyck Peschke es aplicable para precipitaciones máximas de 24 horas, la fórmula para obtener esa precipitación es la siguiente:

$$P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440}\right)^{0.25} \ldots (22)$$

Donde

P_D = precipitación máxima de duración D, en mm.

P_{24h} = precipitación máxima de 24 horas, en mm, que hemos calculado anteriormente.

D = duración de la precipitación, en horas.

El método consiste en discretizar las duraciones y aplicar la formula mencionada anteriormente, a continuación, se muestras los resultados de precipitación en la Tabla 21.

Tabla 21

Precipitaciones discretizadas en diferentes duraciones con el modelo de Dyck Peschke

Duración (Minutos)	Precipitación en 24 horas (mm)								
	32.89	42.02	47.80	54.77	59.72	64.49	69.09	74.96	79.24
	Periodo de Retorno (Años)								
	2	5	10	25	50	100	200	500	1000
	Precipitación (mm)								
5	7.98	10.20	11.60	13.30	14.50	15.65	16.77	18.20	19.23
10	9.50	12.13	13.80	15.81	17.24	18.62	19.94	21.64	22.87
15	10.51	13.43	15.27	17.50	19.08	20.60	22.07	23.95	25.31
20	11.29	14.43	16.41	18.80	20.50	22.14	23.72	25.73	27.20
25	11.94	15.25	17.35	19.88	21.68	23.41	25.08	27.21	28.76
30	12.50	15.97	18.16	20.81	22.69	24.50	26.25	28.48	30.10
35	12.99	16.59	18.87	21.63	23.58	25.46	27.28	29.60	31.29
40	13.43	17.16	19.51	22.36	24.38	26.33	28.21	30.60	32.35
45	13.83	17.67	20.10	23.03	25.11	27.11	29.05	31.52	33.31
50	14.20	18.14	20.63	23.64	25.78	27.84	29.82	32.36	34.20
55	14.54	18.58	21.13	24.21	26.40	28.51	30.54	33.14	35.03
60	14.86	18.99	21.60	24.75	26.98	29.14	31.21	33.87	35.80
120	17.67	22.58	25.68	29.43	32.09	34.65	37.12	40.28	42.57
180	19.56	24.99	28.42	32.57	35.51	38.35	41.08	44.57	47.11
240	21.02	26.85	30.54	35.00	38.16	41.20	44.14	47.90	50.63
300	22.22	28.39	32.29	37.00	40.35	43.57	46.68	50.65	53.53

360	23.26	29.72	33.80	38.73	42.23	45.60	48.85	53.01	56.03
420	24.17	30.88	35.13	40.25	43.89	47.39	50.77	55.09	58.23
480	24.99	31.93	36.32	41.62	45.38	49.00	52.50	56.96	60.21
540	25.74	32.89	37.40	42.86	46.73	50.47	54.06	58.66	62.01
600	26.43	33.76	38.40	44.00	47.98	51.81	55.51	60.23	63.66
660	27.07	34.58	39.33	45.07	49.14	53.06	56.85	61.68	65.20
720	27.66	35.34	40.19	46.06	50.22	54.23	58.10	63.04	66.63
780	28.22	36.05	41.01	46.99	51.23	55.32	59.27	64.31	67.98
840	28.75	36.73	41.77	47.87	52.19	56.36	60.38	65.51	69.25
900	29.25	37.37	42.50	48.70	53.10	57.34	61.43	66.65	70.45
960	29.72	37.97	43.19	49.49	53.96	58.27	62.43	67.74	71.60
1020	30.18	38.55	43.85	50.25	54.79	59.16	63.38	68.77	72.69
1080	30.61	39.11	44.48	50.97	55.58	60.01	64.29	69.76	73.74
1140	31.03	39.64	45.09	51.66	56.33	60.83	65.17	70.71	74.74
1200	31.43	40.15	45.67	52.33	57.06	61.62	66.01	71.62	75.71
1260	31.81	40.64	46.23	52.97	57.76	62.37	66.82	72.50	76.63
1320	32.19	41.12	46.77	53.59	58.44	63.10	67.60	73.35	77.53
1380	32.55	41.58	47.29	54.19	59.09	63.81	68.36	74.17	78.40
1440	**32.89**	**42.02**	**47.80**	**54.77**	**59.72**	**64.49**	**69.09**	**74.96**	**79.24**

Nota. La tabla muestra los resultados de precipitación máxima discretizadas en duraciones desde los 5 min a los 1440 min para los diferentes escenarios.

Aplicamos la fórmula para todas las duraciones recuerden que este máximo de 24 horas

Intensidad y Curvas IDF. Una vez que contamos con los datos de precipitaciones, procedemos a realizar el cálculo de la intensidad y las curvas IDF. Para esto, aplicamos una fórmula que consiste en dividir la cantidad de precipitación en intervalos de tiempo específicos, expresados en horas. Este proceso se repite para cada intervalo que queremos evaluar, comenzando por intervalos de cinco minutos y luego cada hora. Una vez obtenidas las intensidades, creamos nuestra curva de intensidad, duración y frecuencia.

$$I = \frac{P_D}{D} \ldots (23)$$

Donde:

P_D = precipitación máxima de duración D, en mm

D = duración de la precipitación, en horas

Tabla 22

Intensidad de precipitación discretizada en diferentes duraciones y periodos de retorno con el modelo de Dyck Peschke

Intensidad de Precipitación

Duración (Horas)	Duración (min)	Periodo de Retorno (Años) 2	5	10	25	50	100	200	500	1000
		Intensidad (mm/hr)								
0.083	5	95.82	122.42	139.24	159.55	173.96	187.85	201.25	218.37	230.81
0.167	10	56.97	72.79	82.79	94.87	103.44	111.70	119.66	129.84	137.24
0.250	15	42.04	53.70	61.08	69.99	76.32	82.41	88.29	95.80	101.25
0.333	20	33.88	43.28	49.23	56.41	61.51	66.42	71.15	77.20	81.60
0.417	25	28.66	36.61	41.64	47.72	52.03	56.18	60.19	65.31	69.03
0.500	30	24.99	31.93	36.32	41.62	45.38	49.00	52.50	56.96	60.21
0.583	35	22.27	28.45	32.35	37.07	40.42	43.65	46.76	50.74	53.63
0.667	40	20.14	25.73	29.27	33.54	36.57	39.49	42.31	45.91	48.52
0.750	45	18.44	23.56	26.80	30.70	33.48	36.15	38.73	42.02	44.42
0.833	50	17.04	21.77	24.76	28.37	30.94	33.41	35.79	38.83	41.04
0.917	55	15.86	20.27	23.05	26.41	28.80	31.10	33.32	36.15	38.21
1.000	60	14.86	18.99	21.60	24.75	26.98	29.14	31.21	33.87	35.80
2.000	120	8.84	11.29	12.84	14.71	16.04	17.32	18.56	20.14	21.29
3.000	180	6.52	8.33	9.47	10.86	11.84	12.78	13.69	14.86	15.70
4.000	240	5.25	6.71	7.64	8.75	9.54	10.30	11.04	11.97	12.66
5.000	300	4.44	5.68	6.46	7.40	8.07	8.71	9.34	10.13	10.71
6.000	360	3.88	4.95	5.63	6.45	7.04	7.60	8.14	8.83	9.34
7.000	420	3.45	4.41	5.02	5.75	6.27	6.77	7.25	7.87	8.32
8.000	480	3.12	3.99	4.54	5.20	5.67	6.13	6.56	7.12	7.53
9.000	540	2.86	3.65	4.16	4.76	5.19	5.61	6.01	6.52	6.89
10.000	600	2.64	3.38	3.84	4.40	4.80	5.18	5.55	6.02	6.37
11.000	660	2.46	3.14	3.58	4.10	4.47	4.82	5.17	5.61	5.93
12.000	720	2.31	2.94	3.35	3.84	4.18	4.52	4.84	5.25	5.55
13.000	780	2.17	2.77	3.15	3.61	3.94	4.26	4.56	4.95	5.23
14.000	840	2.05	2.62	2.98	3.42	3.73	4.03	4.31	4.68	4.95
15.000	900	1.95	2.49	2.83	3.25	3.54	3.82	4.10	4.44	4.70
16.000	960	1.86	2.37	2.70	3.09	3.37	3.64	3.90	4.23	4.47
17.000	1020	1.78	2.27	2.58	2.96	3.22	3.48	3.73	4.05	4.28
18.000	1080	1.70	2.17	2.47	2.83	3.09	3.33	3.57	3.88	4.10
19.000	1140	1.63	2.09	2.37	2.72	2.96	3.20	3.43	3.72	3.93
20.000	1200	1.57	2.01	2.28	2.62	2.85	3.08	3.30	3.58	3.79
21.000	1260	1.51	1.94	2.20	2.52	2.75	2.97	3.18	3.45	3.65
22.000	1320	1.46	1.87	2.13	2.44	2.66	2.87	3.07	3.33	3.52
23.000	1380	1.42	1.81	2.06	2.36	2.57	2.77	2.97	3.22	3.41
24.000	1440	1.37	1.75	1.99	2.28	2.49	2.69	2.88	3.12	3.30

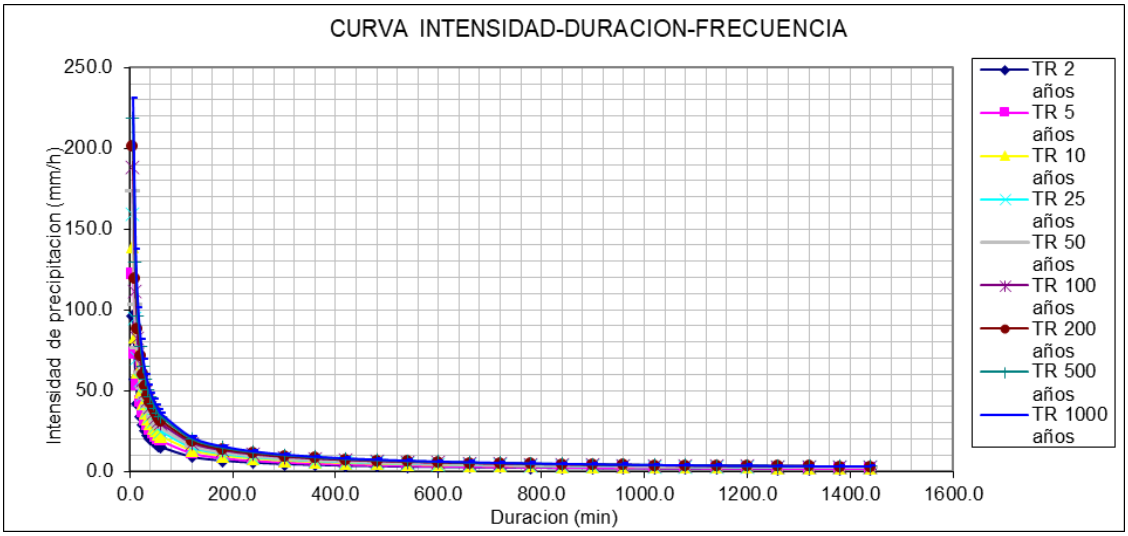
Nota. La tabla muestra los resultados de intensidad de precipitación discretizadas en duraciones desde 5 min a 1440 min en los diferentes escenarios.

Esta curva de intensidad, duración y frecuencia nos va a servir por ejemplo para el método racional, si ustedes recuerdan la formula el método racional es intensidad de precipitación, coeficiente de escorrentía, área de la cuenca, divido entre 360, la intensidad la podemos calcular mediante esta curva IDF de acuerdo al tiempo de concentración en min interceptamos la gráfica del periodo de retorno que nosotros deseamos evaluar y

calculamos la intensidad, bien de esta manera generamos nuestras curvas IDF como se muestra en la Figura 23.

Figura 23

Curva Intensidad – Duración – Frecuencia



Nota. En la figura se muestra los valores de intensidad de precipitación (mm/h) en función a la duración (min) y periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Este es la manera de generar nuestra curva de intensidad, duración y frecuencia.

Análisis de regresión múltiple. Al obtener la ecuación general de las curvas IDF, la fórmula es la ecuación 24 donde la intensidad es igual a un valor K multiplicado por el periodo de retorno, elevado a un valor m, dividido entre D que es la duración en min elevado a un valor n, como se ve a continuación:

$$\boldsymbol{I_{max}} = \frac{\boldsymbol{K} \times \boldsymbol{T^m}}{\boldsymbol{D^n}} \ldots (24)$$

Donde:

I_{max} =intensidad máxima de lluvia, en mm/hr

T = periodo de retorno, en años

D = duración, en minutos

Como este es una ecuación potencial lo más sencillo es llevarlo a una ecuación lineal para lo cual asignamos los logaritmos en ambos lados:

$$\log \boldsymbol{I_{max}} = \log \boldsymbol{K} \times \boldsymbol{T^{m}} \times \boldsymbol{D^{-n}} \ldots (25)$$

Utilizando las propiedades de los logaritmos, se considera que si tenemos una multiplicación esto equivale a la suma sería el logaritmo de la intensidad es igual al logaritmo del factor k más el logaritmo de T elevada a la m y más el logaritmo de D elevado a la menos n porque menos n porque como este está en el denominador lo subimos al numerador y como esto es positivo pasa como negativo una vez que ya hemos utilizado la propiedad multiplicativa de los logaritmos.

$$\log \boldsymbol{I_{max}} = \log \boldsymbol{K} + \log \boldsymbol{T^{m}} + \log \boldsymbol{D^{-n}} \ldots (26)$$

Ahora usaremos esta propiedad que está en función del valor exponencial, este valor m pasa a la base y este menos n también pasa al base así mismo para que sea más fácil trabajar la ecuación lineal realizaremos un cambio de variable el logaritmo Imax lo llamaremos el valor de y el logK sería un valor X1 el logaritmo del periodo de retorno sería un valor X2 y el logaritmo de la duración sería un valor X3.

$$\boldsymbol{y} = \quad \boldsymbol{X_1} \quad + \quad \boldsymbol{mX_2} \quad - \quad \mathbf{n}\,\boldsymbol{X_3} \ldots (27)$$

De esta manera se nos hace más fácil obtener los valores de k, de m y de d, para realizar este análisis de regresión múltiple tenemos que realizar lo siguiente la primera columna tiene que ser de todas las duraciones desde 5 minutos hasta 1440 minutos luego los periodos de retorno para todo lo que hemos evaluado hasta 1000 años, las intensidades que ya lo hemos estimado también anteriormente, posterior a ello calculamos los logaritmos de las duraciones de los periodos de retorno y de las intensidades. Una vez que hemos transformado la información a su forma logarítmica, el siguiente paso es acceder a la sección de datos en nuestra hoja de Excel. Ahí, haremos clic en "Análisis de Datos" y seleccionaremos la opción de "Regresión". Al configurar el análisis, es crucial definir correctamente los rangos de entrada.

Para la variable dependiente (Y), debemos ingresar el valor correspondiente a la intensidad, que en nuestra ecuación alcanza un valor máximo de 10, así que seleccionamos este rango adecuadamente. En cuanto a la variable independiente (X), dado que estamos llevando a cabo una regresión lineal múltiple, seleccionamos el rango correspondiente que incluya todas las variables que queremos analizar, asegurándonos de que esté bien ajustado hacia abajo.

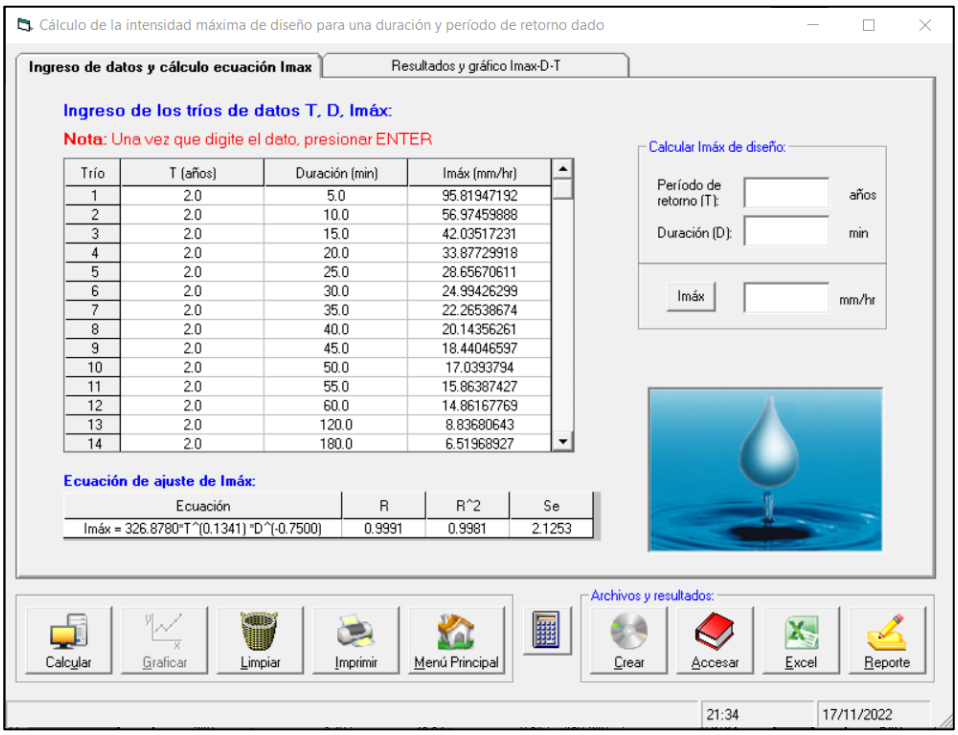
Finalmente, para el rango de salida, es recomendable elegir la opción de resumen en la plantilla de Excel, ya que esto facilitará la interpretación de los resultados obtenidos. Aceptamos todos los rangos seleccionados y concluimos el proceso de análisis.

De todo este resumen tenemos el análisis de la varianza y estos son los coeficientes para k = 326.8780, m = 0.1341, y n = -0.75, como se muestra en la Figura 24.

Esto procedimiento se realizó en HidroEsta 2, para ello se debe tener en el primer campo las duraciones, en el segundo campo los periodos de retorno y en el tercer campo las intensidades, claro está que no hay ningún rotulo solamente tiene que ir el contenido abrimos el programa HidroEsta 2 nos dirigimos a precipitación, cálculo de intensidad máxima y cargamos el archivo Excel damos clic en cargar, luego clic en calcular y ya tenemos la ecuación de la intensidad, comparamos resultados observamos que hay una ligera similitud de lo calculado en Excel con lo calculado en HidroEsta 2 este sería el valor de k = 326.8780, el valor de m = 0.1341 y el valor de n = -0.75, tal como se muestra a continuación:

Figura 24

Cálculo de la intensidad máxima de diseño para una duración y periodo de retorno dado



Nota. La figura muestra resultados de la Intensidad máxima (Imáx) de diseño para una duración y perdió de retorno dado, de acuerdo a la ecuación de ajuste de Imáx.

Una vez que ya tenemos la ecuación de intensidad podemos generar nuestro hietograma de bloque alterno.

5.1.1.7. Hietograma de precipitación de diseño por el método de bloque alterno – Modelo Dick Peschke

Ahora vamos a generar nuestro hietograma de bloque alterno, donde la duración esta expresada cada hora, la intensidad que ya está en función de la ecuación de intensidad como se muestra a continuación:

$$\mathrm{I} = \frac{K \times T^{m}}{D^{n}} \ldots (28)$$

$$\mathrm{I} = \frac{326.878 \times T^{0.1341}}{D^{0.750}} \ldots (29)$$

Donde:

I: Intensidad máxima (mm/h)

T: Período de retorno en años = que va desde 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años el cual se desea evaluar.

D: Duración de la precipitación (min)

el valor de k = 326.878, el valor de m = 0.1341, el valor de n = -0.750 ya calculadas anteriormente en el análisis de regresión múltiple.

A continuación se muestra las tablas del cálculo del método de bloque alterno, donde tenemos la profundidad acumulada que no es más que la intensidad por la duración entre 60, en la cuarta columna tenemos la profundidad incremental que no es más que la diferencia de precipitación en este caso cada hora, el intervalo de tiempo evaluado y por último el hietograma de bloque alterno siendo este la precipitación, tal como se muestra en las Tablas de Anexos para los diferentes periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente.

Así mismo tenemos los gráficos de hietogramas de bloque alterno y con ello podemos generar nuestros hietogramas de precipitación de diseño para diferentes periodos de retorno ya sea para TR = 2, 5 ,10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años como se muestra en los gráficos (ver Anexo), a continuación:

Depende lo que se desea evaluar y el periodo de retorno de la estructura a construir, y también la manera de generar el hietograma de bloque alterno, para los diferentes periodos de retorno desde T = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años, a continuación, me muestra la Tabla 23 de los hietogramas de bloque alterno.

Tabla 23

Síntesis de resultados de Hietogramas – Modelo Dyck Peschke para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años

Hietogramas - Modelo Dyck Peschke

Duración (min)	TR = 2 años	TR = 5 años	TR = 10 años	TR = 25 años	TR = 50 años	TR = 100 años	TR = 200 años	TR = 500 años	TR = 1000 años
60	0.39	0.44	0.48	0.55	0.60	0.66	0.72	0.82	0.90
120	0.42	0.47	0.52	0.58	0.64	0.70	0.77	0.87	0.96
180	0.45	0.51	0.56	0.63	0.69	0.76	0.83	0.94	1.03
240	0.49	0.55	0.60	0.68	0.75	0.82	0.90	1.02	1.12
300	0.53	0.60	0.66	0.75	0.82	0.90	0.99	1.12	1.23
360	0.59	0.67	0.73	0.83	0.91	1.00	1.10	1.24	1.36
420	0.67	0.75	0.83	0.94	1.03	1.13	1.24	1.40	1.53
480	0.77	0.87	0.95	1.08	1.18	1.30	1.43	1.61	1.77
540	0.92	1.04	1.14	1.29	1.41	1.55	1.70	1.93	2.11
600	1.16	1.31	1.44	1.63	1.79	1.96	2.15	2.43	2.67
660	1.63	1.85	2.03	2.29	2.51	2.76	3.03	3.42	3.76
720	3.15	3.56	3.91	4.42	4.85	5.32	5.84	6.60	7.25
780	**16.64**	**18.82**	**20.65**	**23.35**	**25.62**	**28.12**	**30.86**	**34.90**	**38.30**
840	2.11	2.39	2.62	2.96	3.25	3.57	3.92	4.43	4.86
900	1.35	1.53	1.68	1.89	2.08	2.28	2.50	2.83	3.11
960	1.02	1.16	1.27	1.44	1.58	1.73	1.90	2.15	2.35
1020	0.84	0.95	1.04	1.17	1.29	1.41	1.55	1.75	1.92
1080	0.71	0.81	0.89	1.00	1.10	1.21	1.32	1.50	1.64
1140	0.63	0.71	0.78	0.88	0.96	1.06	1.16	1.31	1.44
1200	0.56	0.63	0.69	0.79	0.86	0.95	1.04	1.17	1.29
1260	0.51	0.57	0.63	0.71	0.78	0.86	0.94	1.07	1.17
1320	0.47	0.53	0.58	0.65	0.72	0.79	0.87	0.98	1.07
1380	0.43	0.49	0.54	0.61	0.67	0.73	0.80	0.91	0.99
1440	0.40	0.46	0.50	0.57	0.62	0.68	0.75	0.84	0.93

Nota. En la tabla se muestra los resultados de hietograma de precipitación de diseño, considerando valores máximos de 16.64, 18.82, 20.65, 23.35, 25.62, 28.12, 30.86, 34.90, 38.30 mm para los diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Después de haber identificado las cualidades esenciales de la quebrada y el flujo que la atraviesa, procedemos a introducir los datos en el programa FLO-2D (O'Brien).

5.1.1.8. Simulación con el modelo numérico hidráulico

5.1.1.8.1. Información básica

Se recopiló topografía digital archivos DEM tanto del satélite ALOS PALSAR y del USGS science for a changing world, se recopilo la mayor cantidad de lluvia (precipitaciones máximas) caída en un período de 24 horas reportada por el organismo nacional de

meteorología, se analizaron los registros de precipitación y caudal de agua, así como investigaciones previas, con el fin de recopilar los datos esenciales requeridos para este estudio en particular.

5.1.1.8.2. Topografía digital

Para el estudio de la quebrada Sahuanay se obtuvieron las topografías digitales de los diferentes satélites ALOS PALSAR y del USGS science for a changing world que se listan a continuación:

Tabla 24

Topografía digital DEM - quebrada Sahuanay

Año	DEM	Procedencia
2014	SRTM1S14W073V3	USGS
2011	AP_23500_FBD_F6910_RT1	ALOS PALSAR

Nota. En la tabla se muestra los DEM recopilados de los satélites ALOS PALSAR y la USGS.

De las cuales se trabajó con el archivo DEM del satélite ALOS PALSAR ya que su resolución espacial es de 12.5m es la más aproximada al terreno de estudio.

5.1.1.8.1. Cálculo del número de curva (CN)

Se usó el mapa de cobertura de la tierra, mapa de suelos y la resolución 865 de 2004 julio 22 (Suárez, 2004), para realizar el cálculo del Número Curva (CN), El SCS creó un método para calcular las abstracciones iniciales de una tormenta, que abarcan la intercepción, la detención superficial y la infiltración, conocido como número de curva de escorrentía.

La cantidad de agua que se escurre está determinada por la cantidad total de lluvia caída y un parámetro abstracto llamado número de curva de escorrentía o CN. Este enfoque se puede utilizar en cuencas con un tamaño menor a 250 km^2, como en el estudio realizado en esta tesis de investigación. siendo la quebrada Sahuanay con **23.01 km^2,** el cual es ideal la aplicación de dicho método.

El índice de curva de escorrentía (CN) desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) se basa en la interrelación entre los distintos grupos hidrológicos de suelos, el uso del suelo y el tratamiento aplicado, estudios empíricos han demostrado que el valor del CN está influido principalmente por la clase de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de humedad previas por 5 días (Suárez, 2004).

El SCS clasificó más de 4.000 suelos en 4 grupos hidrológicos (A, B, C y D) en función de su potencial de escurrimiento; los suelos tipo A tienen un potencial de escurrimiento bajo debido a su alta capacidad de infiltración, principalmente compuestos por arenas y gravas. Los suelos tipo B presentan capacidades de infiltración moderadas, con una textura de agregados variando entre moderada y muy fina. Los suelos tipo C tienen una capacidad de infiltración baja, con presencia de capas que evitan el movimiento del agua hacia abajo o texturas finas. Finalmente, los suelos tipo D muestran capacidades de infiltración muy bajas, siendo suelos que se expanden al mojarse, como arcillas altamente plásticas y suelos salinos (Suárez, 2004).

En la Tabla 25 se muestra la estimación del valor de CN de acuerdo con la clasificación hidrológica de los suelos, lo que permite una mejor comprensión del impacto de estos factores en la escorrentía.

Tabla 25

Valores de número de curva (CN) por la condición hidrológica de los suelos

Uso de la tierra	Cobertura tratamiento o practica	Condición hidrológica	Grupo de suelos			
			A	B	C	D
			Número de curva			
1. Rastrojo	Hileras rectas	-------	77	86	91	94
2. Cultivos en hileras	Hileras rectas	Mala	71	81	88	91
	Hileras rectas	Buena	67	78	85	89
	Curvas de nivel	Mala	70	79	84	88
	Curvas de nivel	Buena	65	75	82	86
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	66	74	80	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	62	71	78	81
3. Cultivos en hileras estrechas	Hileras rectas	Mala	65	76	84	86
	Hileras rectas	Buena	63	75	83	87
	Curvas de nivel	Mala	63	74	82	85
	Curvas de nivel	Buena	61	73	81	84
	Cur/Niv y Terrazas	Mala	61	72	79	82
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	59	70	78	81
	Hileras rectas	Mala	66	77	85	89

	Hileras rectas	Buena	58	72	81	85
4. Leguminosas en	Curvas de nivel	Mala	64	75	83	85
hileras estrechas o	1/Curvas de nivel	Buena	55	69	78	83
forraje en rotación	Cur/Niv y Terrazas	Mala	63	73	80	83
	Cur/Niv y Terrazas	Buena	51	67	76	80
		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
5. Pastos de		Buena	39	61	74	80
pastoreo	Curvas de nivel	Mala	47	87	81	88
	Curvas de nivel	Regular	25	59	75	83
	Curvas de nivel	Buena	6	35	70	79
6. Pastos de corte		Buena	30	58	71	78
		Mala	45	66	77	83
7. Bosque		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	70	77
8. Patios		-----	59	74	82	86
9. Caminos de tierra 2/		-----	72	82	87	89
10. Pavimentos		-----	74	84	90	92

1/ Si embra tupida o al voleo
2/ Incluyendo derecho de vía

Nota. La tabla muestra valores de número de curva de acuerdo al uso de tierra, cobertura y la condición hidrológica. Adaptado de “Resolución 865 de 2004 (Julio 22) - Diario Oficial 45630 del 4 de agosto de 2004. Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones”, por Suárez Pérez, 2004.

Por lo tanto, la determinación del CN será considerada mediante los siguientes cálculos dados en la Tabla 26.

Tabla 26

Cálculo del número curva CN de la quebrada Sahuanay

Descripción de la Cobertura Vegetal	Uso de suelo	Condición hidrológica	Tipo de suelo	CN	Área (Km^2)	Nci*Ai
Agricultura costera y andina (AGRI)	Leguminosas en hileras estrechas 1/ Curvas de nivel	B	B	69	2.575	177.675
Matorral arbustivo (Ma)	Pastos de pastoreo, regular	R	B	69	2.484	171.396
Área altoandina con escasa y sin vegetación	Pastos de pastoreo, mala	M	B	79	12.753	1007.487
Glaciar	Pastos de corte, buena	B	B	58	0.768	44.544
Bosque relicto meso andino de coníferas (Br-me-co)	Bosque, buena	B	B	55	4.425	243.375
Área urbana	Caminos de tierra 2/ incluyendo derecho de vía y Pavimentos		B	83	0.002	0.166
	Suma∑				23.007	1644.643

Nota. La tabla muestra los cálculos realizados para determinar el número ode curva de la quebrada Sahuanay.

$$CN = \frac{\sum(Nci * Ai)}{\sum Ai}$$

$$CN = \frac{1644.643}{23.007} = 71.48 \cong 71$$

Al asignar un tipo de suelo hidrológico específico y al multiplicar los % de uso de suelo por el número de curva respectivo, obteniéndose un valor ponderado de CN de 71. En el análisis del hidrograma líquido se empleará el CN de 71 como referencia, denominándolo "curva calculada".

Se menciona un CN, para la asignación con la precipitación obtenida, la información topográfica y cartográfica, la asignación de Número de Curva según el uso de suelo de la cuenca (CN=71) según el método SCS (Autoridad Nacional del Agua y Autoridad Administrativa del Agua Pampas - Apurímac, 2017).

Por lo tanto, se puede ver tanto la bibliografía, así como el cálculo realizado con ayuda del QGIS y la Resolución 865 de 2004 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, podemos decir que tenemos un valor de CN=71, de este modo la

determinación de los métodos de cálculo y el uso de la herramienta del HEC-HMS se realiza la modelación Hidrológica, obteniendo diferentes valores de caudales máximos para diferentes tiempos de retorno.

Otro cálculo adicional a realizar implica considerar la situación menos favorable con un valor de CN de 75, la cual es conocida como la "curva extrema". Cabe destacar que este valor no se relaciona con la quebrada Sahuanay.

El valor de CN analizado es de 71 valor calculado y 75 como valor extremo, utilizando esta información, se lleva a cabo una simulación del proceso de precipitación y escorrentía empleando el modelo HEC-HMS.

5.1.1.8.2. Hidrograma de avenida líquido (Inflow)

Para la predicción del flujo máximo en ríos durante inundaciones, se utilizará el software de modelado hidrológico HEC-HMS. Esta elección se basa en su disponibilidad gratuita y su amplio reconocimiento internacional. Además, la introducción de datos en este programa es simple y su interpretación es accesible para cualquier usuario.

Se utilizo el HEC-HMS 4.0 este sistema de modelado hidrológico del centro de cuerpo de Ingenieros de EE. UU, nos sirve para estimar el hidrograma de salida de una cuenca o varias subcuencas, a partir de las condiciones extremas de lluvia.

Para realizar estos cálculos, primero se inicia de los datos de un hietograma de precipitación, a través de una serie de modelos se calcula el exceso de precipitación, esta es llamada precipitación neta, el cual se da restando las perdidas por infiltración y detención.

Por lo que los resultados que nos da HEC-HMS nos permite diseñar las dimensiones de obra de control de inundaciones como muros de encauzamiento y embalse. Los resultados de los caudales generados por el HEC-HMS, podemos trabajarlo para un modelo de inundaciones, se propone determinar las dimensiones iniciales de las estructuras de alcantarillas viales, iluminación en puentes y sistema de drenaje pluvial;

posteriormente, se llevará a cabo un análisis del impacto ambiental de las crecidas provocadas por cambios en el uso del suelo en áreas rurales y urbanas.

Para la estimación del hidrograma de avenida se utilizará la metodología del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), ya que es una de las técnicas más simples disponibles. También se emplearán tormentas hipotéticas de 24 horas basadas en datos de investigación previa en la Cuenca Mariño.

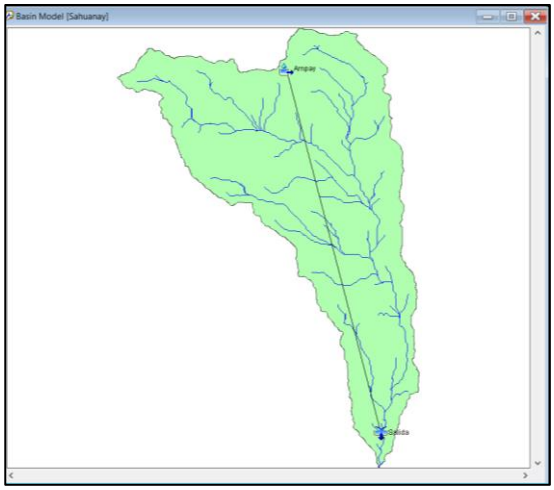
Para comenzar el modelado con dicho método, se deben definir tres conjuntos de información: • Modelo de la Cuenca • Modelo Meteorológico • Especificaciones de Control

a) Modelo de cuenca

Contiene los parámetros de los elementos hidrológicos como, por ejemplo: sub-cuencas, sección del río, puntos de encuentro, depósitos, manantiales y desagües. La primera acción consiste en representar gráficamente el sistema de aguas a analizar. Los componentes empleados para delimitar nuestra área de estudio son: división de aguas (subbasin), tramo de corriente y el punto de conexión (junction), ver Figura 25.

Figura 25

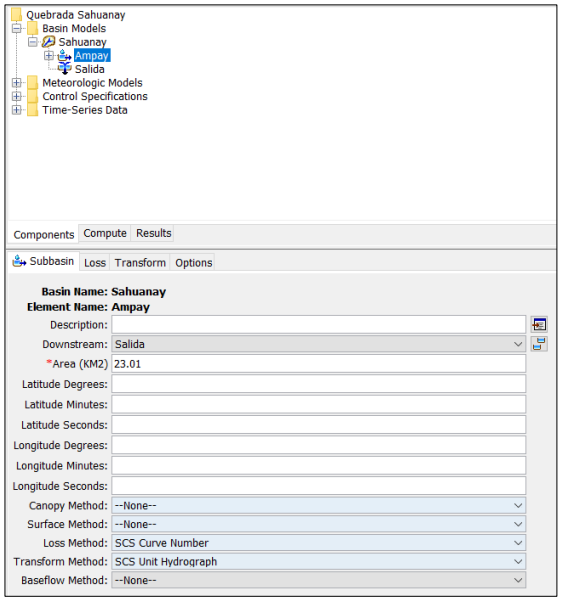
Modelo de la quebrada de Sahuanay



Es necesario incluir información complementaria sobre las propiedades de la subcuenca y el enfoque metodológico utilizado para el cálculo del hidrograma.

Figura 26

Características de la quebrada Sahuanay



Para el cálculo de la perdida inicial se aplicará el método SCS para realizar abstracciones y calcular la pérdida inicial, ya que esta solo varía en función de una variable conocida, CN; la pérdida inicial (mm) se determina mediante la siguiente fórmula: 0.20 x (25400 - 254CN) / CN (Castillo Navarro, 2006), ver Figura 27 y 28.

El valor de pérdida inicial en el HEC-HMS se calcula por defecto para el método de SCS, por lo tanto, calcularemos para CN=71 y CN=75 considerándose este máximo.

a.1) Pérdida inicial para un CN=71

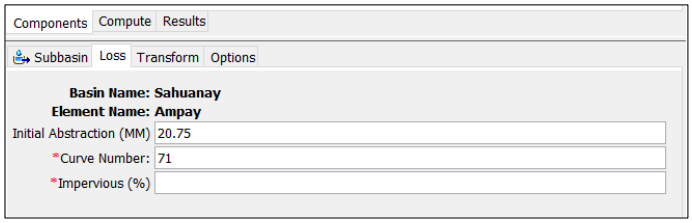
$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 0.20 * \frac{(25400 - 254CN)}{CN}$$

$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 0.20 * \frac{(25400 - 254 * 71)}{71}$$

$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 20.75\ mm$$

Figura 27

Método SCS de abstracciones, initial abstraction (mm) para CN=71



a.2) Pérdida inicial para un CN=75

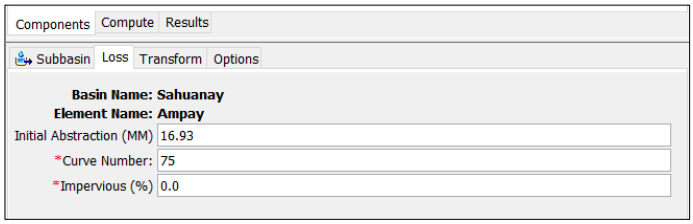
$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 0.20 * \frac{(25400 - 254CN)}{CN}$$

$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 0.20 * \frac{(25400 - 254 * 75)}{75}$$

$$Pérdida\ inicial\ (mm) = 16.93\ mm$$

Figura 28

Método SCS de abstracciones, initial abstraction (mm) para CN=75



También utilizaremos el hidrograma unitario sin dimensiones de SCS para calcular el hidrograma sintético, cuyo valor depende del tiempo de retardo (Lag) calculado previamente. Asimismo, se omitirá la consideración del caudal base.

$$T_c = 0.0195\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad \ldots (30)$$

$$T_c = 0.0195\left(\frac{12.84^3}{2696}\right)^{0.385}$$

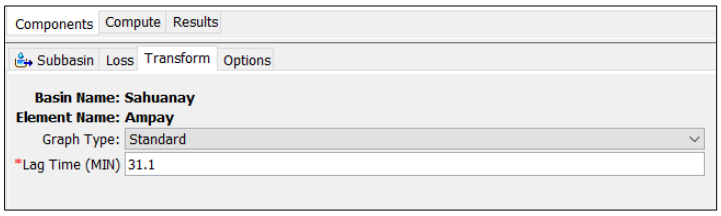
$$T_c = 51.83\ min, tiempo\ de\ concentración$$

$$Lag = 0.6T_c\ tiempo\ de\ retardo$$

$$Lag = 0.6 * 51.83 = 31.10 \text{ min } tiempo\ de\ retardo$$

Figura 29

Método SCS – Tiempo de retardo de la quebrada Sahuanay



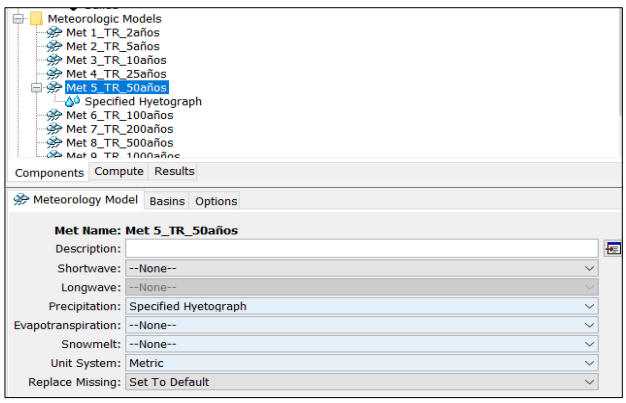
b) Modelo meteorológico

El enfoque meteorológico implica la caracterización de la tormenta de diseño que se utiliza en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía en nuestra pequeña cuenca. Una estrategia para generar una tormenta de diseño implica la utilización de hietogramas sintéticos diseñados para distintos periodos de retorno con una duración de 24 horas. Se considerarán nueve tormentas de 24 horas de duración que corresponden a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

En conclusión, la información que se necesita es únicamente la precipitación máxima acumulada en un periodo de 24 horas, la cual fue determinada en el apartado 4.1.1.9. En nuestro análisis, esta precipitación corresponde a la celda concentrada en cada hietograma correspondiente a los diferentes periodos de retorno (ver Figura 30).

Figura 30

Modelos meteorológicos con hietogramas de diseño para tiempos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años

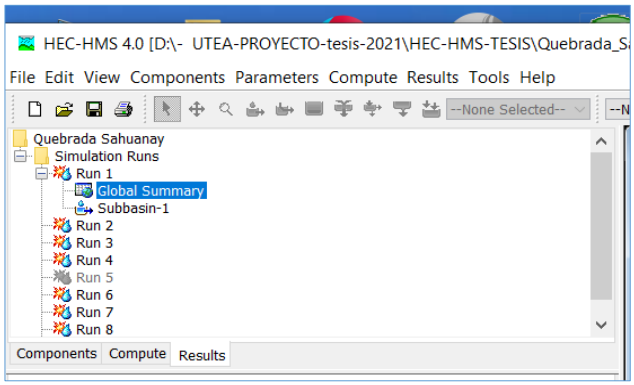


c) Especificaciones de control

En esta sección del modelo se introduce la duración de la simulación para el hidrograma junto con el período de tiempo. Con la información proporcionada, el programa de modelado hidrológico HEC-HMS realiza la estimación del caudal de la crecida (ver Figura 31).

Figura 31

Cálculo de hidrogramas de avenida para CN = 71 y 75



Los resultados de la distribución de los diferentes hidrogramas en función del tiempo (TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años) para un CN = 71, se presenta en el Anexo:

Para el caso del número de curva calculada CN = 71 se tuvieron resultados mostrados anteriormente de los hidrogramas presentando caudales líquido pico de: 2.1, 4.6, 7.5, 12.7, 18.0, 24.6, 32.80, 46.20 y 58.50 m^3/s, correspondiente a una precipitación máxima en 24 horas de: 16.64, 18.82, 20.65, 23.35, 25.62, 28.12, 30.86, 34.90 y 38.30 mm, para los diferentes periodos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente. El resumen de resultados se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27

Resumen de resultados de los caudales líquido pico para un CN = 71

Período de retorno TR (años)	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Caudal líquido pico Ql (m^3/s)
2	16.64	2.10
5	18.82	4.60
10	20.65	7.50
25	23.35	12.70
50	25.62	18.00
100	28.12	24.60
200	30.86	32.80
500	34.90	46.20
1000	38.30	58.50

Nota. En la tabla muestra los valores de caudal líquido de acuerdo a la precipitación máxima en los diferentes Períodos de retorno.

Los resultados de la distribución de los diferentes hidrogramas en función del tiempo (TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años) para un CN = 75, se presenta en el Anexo.

Así mismo, para el caso del número de curva máxima CN = 75 se tuvieron resultados mostrados anteriormente de los hidrogramas presentando caudales líquido pico de: 5.8, 9.9, 14.1, 21.3, 28.2, 36.5, 46.30, 61.70 y 75.60 m^3/s, correspondiente a una precipitación máxima en 24 horas de: 16.64, 18.82, 20.65, 23.35, 25.62, 28.12, 30.86, 34.90 y 38.30 mm, para los diferentes periodos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente, tal como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28

Resumen de resultados de los caudales líquido pico para un CN = 75

Período de retorno TR (años)	Precipitación máxima en 24 horas (mm)	Caudal líquido Pico Ql (m^3/s)
2	16.64	5.80
5	18.82	9.90
10	20.65	14.10
25	23.35	21.30
50	25.62	28.20
100	28.12	36.50
200	30.86	46.30
500	34.90	61.70
1000	38.30	75.60

Nota. En la tabla muestra los valores de caudal líquido de acuerdo a la precipitación.

Del Capítulo 5 en el ítem 5.1.1. de la presente tesis se determinó la precipitación máxima anual en 24 horas en la quebrada Sahuanay para diferentes periodos de retorno con los datos obtenidos de la estación hidrometeorológica “Granja San Antonio – Abancay” aplicando las funciones de distribución de probabilidad obteniéndose hietogramas para que posteriormente se aplique el HEC – HMS obteniéndose los hidrogramas de caudal líquido correspondiente a las precipitaciones para diferentes periodos un tiempo de retorno de TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años de la quebrada Sahuanay. Además, se analizaron escenarios para un CN=71 (curva calculada) y un CN=75 máximo estimado. A continuación, se muestra los diferentes caudales máximos para diferentes escenarios y CN respectivamente la Tabla 29.

Tabla 29

Resumen de caudales máximos en la quebrada Sahuanay para escenarios de CN = 71 y CN =75

Quebrada Sahuanay	**Caudales máximos (m^3/s)**	
Escenarios de TR 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años	CN=71	CN=75
Sahuanay TR_2años	2.10	5.80
Sahuanay TR_5años	4.60	9.90
Sahuanay TR_10años	7.50	14.10
Sahuanay TR_25años	12.70	21.30
Sahuanay TR_50años	18.00	28.20
Sahuanay TR_100años	24.60	36.50
Sahuanay TR_200años	32.80	46.30
Sahuanay TR_500años	46.20	61.70
Sahuanay TR_1000años	58.50	75.60

Nota. En la tabla muestra los valores de caudal líquido de acuerdo a los diferentes escenarios y CN = 71 y 75.

5.1.1.8.3. Volúmenes de escombros depositados

Un método inicial utilizado por la Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA) en 1988, consistió en calcular el volumen de escombros producidos por el Fenómeno del Niño en marzo de 1987 de la Cuenca del río Rímac; para ello, se tomó en cuenta el valor de producción de sedimento de 14,800 m^3/km^2 como característico de eventos de flujo de escombros grandes generados por precipitaciones de baja probabilidad

en la quebrada de Pedregal (Chosica), la cual carece principalmente de vegetación; este valor se extrapoló a otras quebradas en la cuenca del río Rímac, considerando un coeficiente de corrección basado en el grado de cobertura vegetal en cada quebrada; JICA sugirió un coeficiente de corrección de 0.4 para áreas con una cobertura vegetal superior al 60% pero inferior al 90% (Castillo, 2006). La ecuación utilizada en este proceso fue:

$$V = 14{,}800 * 1.2 * F * A \ldots (31)$$

Donde:

F= 0.4 (coeficiente de corrección asumido para coberturas vegetales mayor a 60% y menor que 90%, el cual asumiremos para la quebrada Sahuanay)

A= 23.01 Km^2 (Área de la quebrada Sahuanay)

Reemplazando dichos valores se obtiene un volumen de:

$$V = 14{,}800 * 1.2 * 0.4 * 23.01$$

$$V = 163{,}463.04 \cong 163400\ m^3$$

Por lo tanto, el volumen estimado por la metodología JICA que da para la quebrada Sahuanay es de 163400 m^3.

Otra fuente de estimación del volumen de escombros depositado en la quebrada de Sahuanay está de acuerdo al suceso más relevante ocurrido el 18 de marzo de 2012 implicó la caída de una pared de tierra de 283 metros de extensión, desplazando cerca de 600,000 metros cúbicos de material coluvial y morrénicos saturado de agua. A medida que avanzaba por la quebrada Sahuanay, la avalancha de escombros iba incorporando más material a través de erosiones laterales que provocaban deslizamientos menores que alimentaban el lecho de la quebrada (Valderrama et al., 2012).

De ambas metodologías anteriormente vistas tanto por JICA y Valderrama et al. (2012), el análisis realizado por Valderrama indica que el volumen de escombros es más elevado, por lo que se seleccionará el valor menos favorable.

Por consiguiente, un valor del volumen de escombros estimado para la quebrada Sahuanay sería 600,000 +/- 100,000 m^3 con valor máximo de 700,000 m^3, considerado este valor para eventos extremos de TR entre 100 a 200 años.

5.1.1.8.4. Coeficiente de rugosidad de Manning

Como índice de rugosidad “n” de Manning, se ha asumido un valor de 0.055 debido a las con base en las particularidades del área y en la información obtenida en el trabajo de campo.

5.1.1.8.5. Mecánica de suelos y mediciones en el campo

Conforme a los estudios relacionado a la mecánica de suelos realizados por la Consultora en Geotecnia Grupo Corporativo Obregón (GCO) dirigido por el Ing. Oscar A. Morón Romero, se tiene 3 muestras de suelos (Muestra M1 - Calicata C1, Muestra M2 - Calicata C2, y Muestra M3 - Calicata C3) que conforman la zona del deslizamiento de la quebrada Sahuanay, siendo los siguientes:

• **Muestra M1 - Calicata C1**: Grava limosa mal gradada con arena, la forma de las partículas son sub angulosas sin presencia de óxidos y de consistencia media compacta con humedad media y no plástica, con incrustaciones de piedras sub redondeadas y muy poca bolonería, con un color negro y una topografía de 19.50% de pendiente transversal aproximadamente, presenta una distribución de tamaños de partículas que se identifica como un suelo GP-GM según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) o un A-1-a (0), donde la fracción de material fino muestra un límite líquido igual a NP y un límite plástico igual a NP. La proporción de material que atraviesa la malla número 200 es del 7.22%.

• **Muestra M2 - Calicata C2**: Grava limosa mal gradada con arena, la forma de las partículas son sub angulosas sin presencia de óxidos y de consistencia media compacta con humedad media y no plástica, con incrustaciones de piedras sub redondeadas y muy poca bolonería, con un color negro y una topografía de 19.50% de pendiente transversal

aproximadamente, con una distribución de tamaño de partículas que se ajusta a las características de un terreno clasificado como GP-GM según la clasificación SUCS o como un tipo A-1-a (0), encontramos que el contenido de partículas finas tiene un límite líquido (LL) y un límite plástico (LP) iguales al valor no proporcionado. Además, se observa que el porcentaje de partículas que atraviesan la malla número 200 es del 10.24%.

• **Muestra M3 - Calicata C3:** Grava limosa mal gradada con arena, la forma de las partículas son sub angulosas sin presencia de óxidos y de consistencia media compacta con humedad media y no plástica, con incrustaciones de piedras sub redondeadas y muy poca bolonería, con un color negro y una topografía de 19.50% de pendiente transversal aproximadamente, con una distribución de tamaños de partículas que se ajusta a las especificaciones de un suelo clasificado como GP-GM en el SUCS o como A-1-a (0), y la fracción de material fino tiene un límite líquido (LL) y un límite plástico (LP) que no se pueden determinar. El porcentaje de material que atraviesa la malla No.200 es del 6.69%.

En la presente tesis, el estudio de mecánica suelos de la quebrada Sahuanay se ha realizado tomando muestras de la matriz del flujo de escombros en el abanico de la salida del cauce (M3) y la cabecera del cauce principal (M1) y la parte media del cauce principal (M2). Se realizo estudio de suelos mediante el laboratorio de la Consultora en Geotecnia GCO (Grupo Corporativo Obregón S.C.R.L) dirigido por el Ing. Oscar A. Morón Romero, se tiene 3 muestras de suelos (Muestra M1 – Calicata C1, Muestra M2 - Calicata C2, y Muestra M3 - Calicata C3) con base en las muestras analizadas se llevaron a cabo pruebas de tamaño de partículas y se determinaron los límites de plasticidad de las mismas. Los resultados obtenidos indican que las muestras no muestran plasticidad, siendo clasificadas como GP-GM (grava limosa mal gradada con arena) según el sistema de Clasificación de Suelos Unificados (SUCS). Cabe destacar que los resultados de granulometría se refieren a material de tamaño menor a las 3 pulgadas.

Tabla 30

Resultados de la granulometría quebrada de Sahuanay

Muestra	Diámetro (d)		Límites de Consistencia			SUCS
	3" < d < N.º 200 %	D < N.º 200 %	%LL	%LP	%IP	
M1	92.78	7.22	NP	NP	NP	GP- GM
M2	89.76	10.24	NP	NP	NP	GP- GM
M3	93.31	6.69	NP	NP	NP	GP- GM

Nota. Esta tabla muestra el estudio de mecánica de suelos con sus respectivos límites de consistencia y clasificación SUCS.

Para mayor detalle de las pruebas de laboratorio ver en Anexos. De la Tabla 30 las muestras presentan que no tienen plasticidad. Además, por conocimientos de mecánica de suelos los límites de consistencia con Límites Líquidos (LL) NP y con un Índice Plástico (IP) no presenta (NP), presenta muy poco de material fino el cual se caracteriza por poseer mayor porcentaje de arenas y gravas. Por lo tanto, se reafirma la suposición del alto contenido de gravas y arenas mas no de material fino. Además de la Tabla 31 se obtiene como promedio un LL de NP (0%).

5.1.1.8.6. Prueba del hidrómetro

Para determinar el porcentaje de partículas finas, % que pasan la malla N.º 200 (D < N.º 200) a partir de los resultados de la mecánica de suelos para la Muestra M1 - Calicata C1, Muestra M2 - Calicata C2, y Muestra M3 - Calicata C3, siendo los 7.22%, 10.24% y 6.69% respectivamente; con ayuda del hidrómetro la muestra de suelos tiene el % más mínimo de arcillas siendo el 3% considerándose un Glenwood sample 2 establecida en la Tabla 5. Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2016) menciona que el análisis hidrométrico se fundamenta en la teoría de Stokes, la cual se utiliza para evaluar el porcentaje de partículas de suelo disperso que permanecen en suspensión durante un tiempo específico. Se emplea un hidrómetro para determinar la cantidad de partículas más

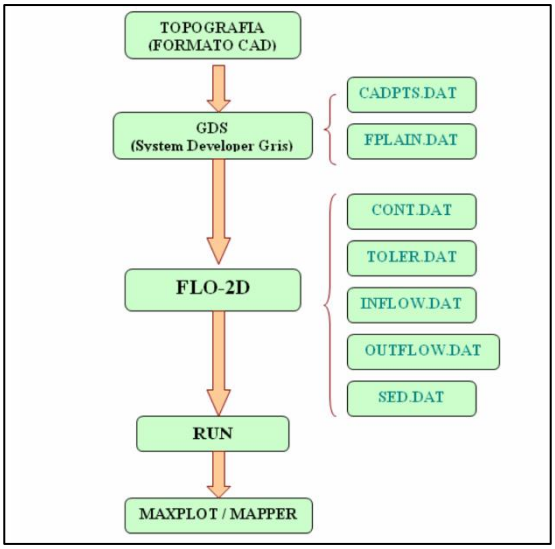
finas de un suelo en particular que pasan a través de un tamiz de 74 µm (Nº 200), ya sea en un entorno de laboratorio o en el campo.

5.1.1.8.7. Diagrama de flujo para la simulación con el FLO-2D

En la Figura 32 Se presenta el esquema a seguir para la simulación de flujos de escombros utilizando el software FLO-2D. En primer lugar, se realiza el procesamiento de la topografía existente para obtener el DEM. Posteriormente, se exporta la topografía al software pre-procesador System Developer Grid (GDS) para definir las grillas utilizadas en la simulación. Dentro del pre-procesador (GDS), se establecen los coeficientes de Manning y se ubica el hidrograma de entrada (INFLOW) en la grilla correspondiente. Se crea una malla de grillas cuadradas donde cada celda cuenta con una cota y un coeficiente de Manning asignado; así mismo, se definen las grillas de salida de flujo (OUTFLOW) en la parte baja de la quebrada (Castillo, 2006).

Figura 32

Diagrama de flujo utilizado en el modelo FLO-2D



Nota. La figura muestra el diagrama para la simulación del flujo hiperconcentrado en le modelo FLO-2D. Tomado de *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* (p. 138), por Castillo, 2006, https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf.

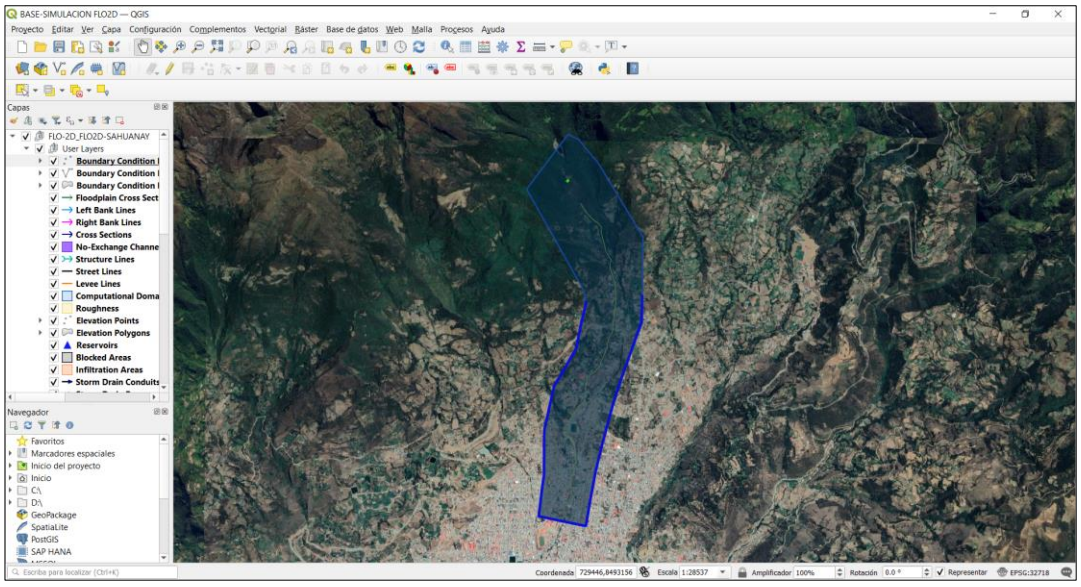
5.1.1.8.8. Definición de parámetros

El plano topográfico inicial que se utilizará para llevar a cabo un análisis y evaluación de sensibilidad del programa será la topografía digital indicado en el ítem 5.1.11.2. El tramo simulado es de longitud aproximada de 3.75 km desde aguas arriba (garganta) hasta la confluencia con la quebrada Sahuanay (ver Figura 33).

En relación al plano previamente mencionado, se elaboró una malla compuesta por 78,757 celdas, cada una con dimensiones de 6 x 6 m, abarcando una sección de la garganta y la unión con la quebrada Sahuanay. Asimismo, se estableció la cuadrícula del hidrograma de entrada (INFLOW) y las cuadrículas correspondientes al flujo de salida (OUTFLOW) (ver Figura 33).

Figura 33

Malla de grillas de 6m x 6m Quebrada Sahuanay



Nota. La figura muestra el grillado de celdas de 6m x 6m en la quebrada Sahuanay.

Para modelar los flujos de escombros con el software FLO-2D, es esencial contar con información detallada como la topografía, el hidrograma líquido + sólido, las propiedades del sedimento y los parámetros reológicos. Los parámetros del sedimento se

basan en experiencias de otros países donde han sido calibrados con cuencas experimentales.

Para la simulación, se emplean características específicas como el modelo bidimensional FLO-2D, que considera el flujo hiperconcentrado de barro y escombros con ecuaciones completas para el movimiento. El fluido se considera homogéneo con concentración variable, sin hacer distinción de tamaños de sedimento internamente.

Los parámetros de entrada incluyen una distribución de Cv en el tiempo, con un aumento gradual según el tipo de sedimento. El hidrograma líquido se utiliza como condición de borde en la quebrada, con una rugosidad de Manning de 0.055 y parámetros reológicos basados en muestras de campo y literatura.

Las muestras tipo de la literatura provienen de depósitos naturales en Colorado y se asemejan a un material conservador con baja proporción de finos y sin plasticidad. Las ecuaciones utilizadas en el modelo están basadas en estudios previos de O'Brien y Julien:

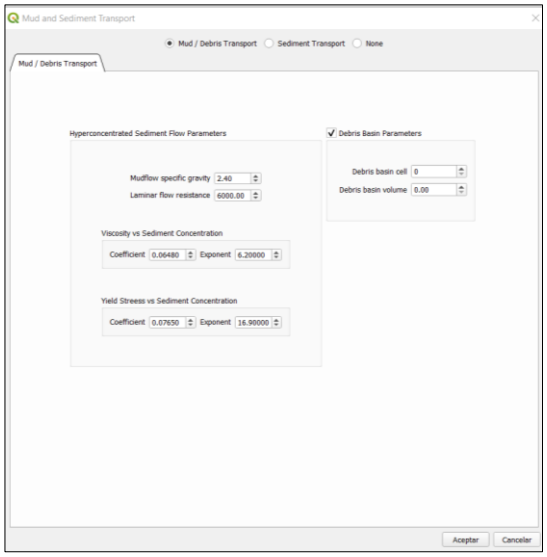
$$\eta = 0.0360e^{22.1C_v} \ldots (32)$$

$$\tau_y = 0.181e^{25.7C_v} \ldots (33)$$

La gravedad específica del sedimento se ha determinado como 2.40, basado en el promedio máximo de muestras de campo analizadas en el laboratorio. Se ha considerado una resistencia de la planicie al flujo laminar de 6000, basado en estudios previos sobre flujos de escombros. La simulación se llevará a cabo durante un período de 24 horas.

Figura 34

Datos de entrada al Mud and Sediment Transport para la quebrada Sahuanay



Nota. La figura muestra datos de entrada como son los coeficientes del esfuerzo de cedencia y la viscosidad del fluido, la gravedad específica y la resistencia laminar del flujo.

5.1.2. Identificar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

5.1.2.1. Escenarios de peligros generados en áreas de amenaza por flujos hiperconcentrados para diferentes periodos de retornos para CN = 71 curva calculada

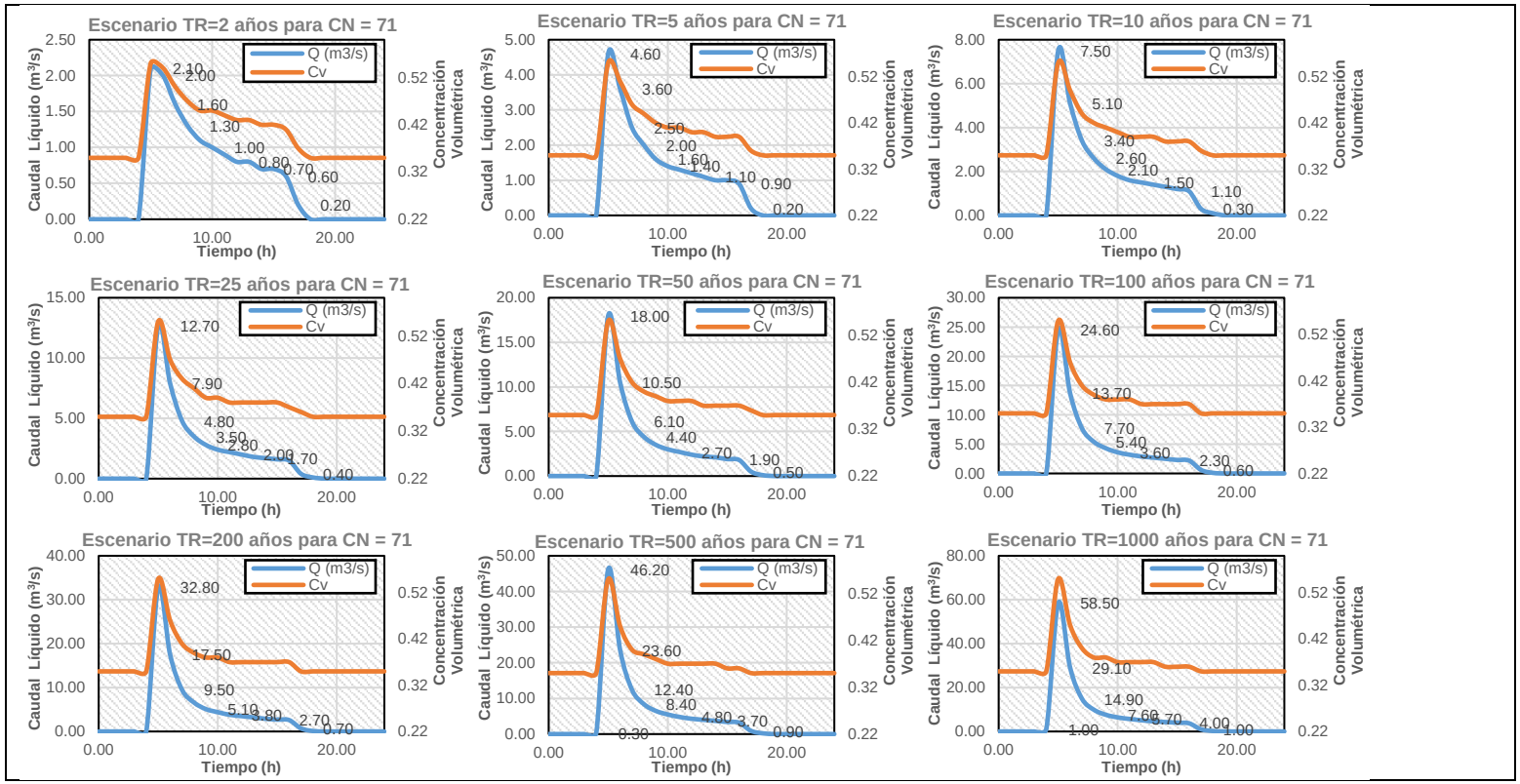
Se analizaron varios escenarios enfocados solamente en la quebrada Sahuanay; para un hidrograma líquido con número de curva de 71 (curva calculada). Cuya concentración volumétrica de sedimentos (Cv) es variable desde 35% a 55%. Los demás parámetros de entrada para la modelación fueron mencionados en el ítem 5.1.1.8.

Análisis para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=71)

Se estudió para un TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71) una creciente con un caudal líquido máximo de 2.10, 4.60, 7.50, 12.70, 18.00, 24.60, 32.80, 46.20, y 58.50 m^3/s respectivamente, cuya concentración volumétrica de sedimentos es variable de 35 % a 55 % en la rama ascendente del hidrograma y de valor máximo de 55 %, disminuyendo a 54 % y finalmente a 35 % permaneciendo constante hasta el final del hidrograma como se muestra a continuación:

Figura 35

Hidrogramas líquidos y sólidos para diferentes TR = 2, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=71) con Cv=0.35-0.55



Nota. La figura muestra los diferentes escenarios de los hidrogramas líquidos y sólidos para un CN=71 y una concentración volumétrica variable de 0.35 a 0.55.

Los resultados de la modelación con el FLO-2D se obtuvo el volumen del flujo de sedimentos en millones de m^3 (M m^3), como se detalla a continuación:

Tabla 31

Volumen del flujo de sedimentos para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71)

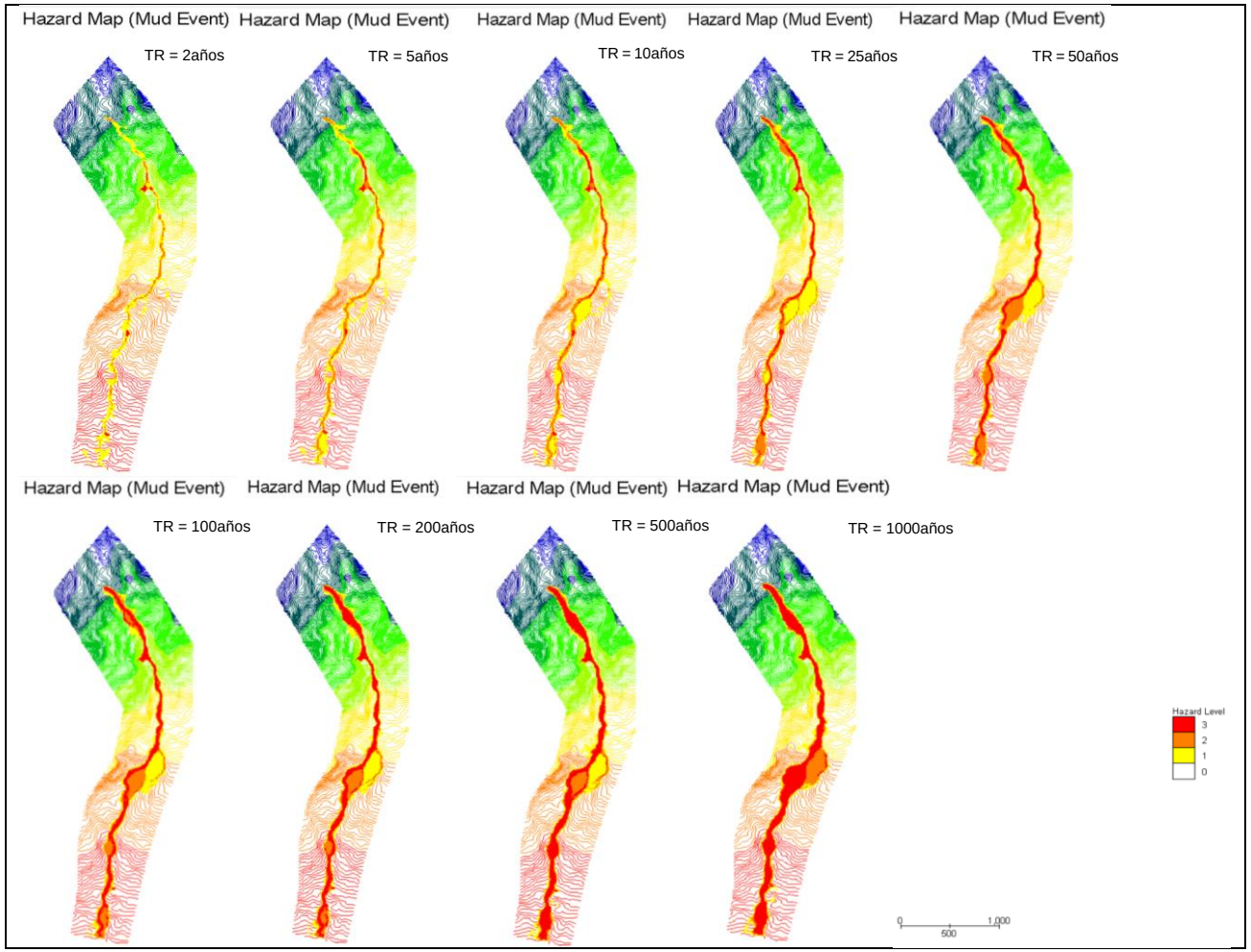
Volumen del flujo de sedimentos (M m^3)	TR=2 años	TR=5 años	TR=10 años	TR=25 años	TR=50 años	TR=100 años	TR=200 años	TR=500 años	TR=1000 años
Volumen de agua (M m^3)	0.050	0.081	0.112	0.163	0.213	0.273	0.343	0.459	0.562
Volumen de sedimentos (M m^3)	0.045	0.068	0.091	0.132	0.172	0.218	0.277	0.369	0.453
Volumen de agua más sedimentos (M m^3)	0.095	0.149	0.203	0.295	0.385	0.491	0.621	0.827	1.015

Nota. La tabla muestra los volúmenes del flujo a diferentes escenarios para CN = 71.

A continuación, se muestra los mapas de nivel de peligros (Hazard Map) generado por los flujos hiperconcentrados, para caudales líquidos de: Ql = 2.10, 4.60, 7.50, 12.70, 18.00, 24.60, 32.80, 46.20 y 58.50 m^3/s (CN = 71), en diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años:

Figura 36

Mapas de Nivel de peligros para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71)



Nota. La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 75 para los niveles de peligro alto, medio y bajo en Sahuanay.

De lo mostrado en la figura 36 se obtuvo los resultados del nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados representados en áreas de amenaza para los diferentes niveles de peligro dados en niveles bajo, medio y alto, donde el modelo predice un área total de inundación de 134,604.00; 173,808.00; 200,376.00; 239,400.00; 267,012.00; 292,968.00; 320,040.00; 341,236.00 y 356,928.00 m^2 para diferentes periodos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 100 años respectivamente dentro del área simulada tal como se muestra en la Tabla 32:

Tabla 32

Áreas de amenaza en diferentes niveles de peligro generado por flujos hiperconcentrados, para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 71)

Área de amenaza para diferentes TR		Niveles de peligro			
		Nivel 1 (bajo)	**Nivel 2 (medio)**	**Nivel 3 (alto)**	Total
Área de Amenaza, TR 2 años	(m2)	81,000.00	48,132.00	5,472.00	134,604.00
	(%)	60.18%	35.76%	4.07%	100.00%
Área de Amenaza, TR 5 años	(m2)	71,604.00	86,472.00	15,732.00	173,808.00
	(%)	41.20%	49.75%	9.05%	100.00%
Área de Amenaza, TR 10 años	(m2)	64,944.00	104,544.00	30,888.00	200,376.00
	(%)	32.41%	52.17%	15.42%	100.00%
Área de Amenaza, TR 25 años	(m2)	54,792.00	123,804.00	60,804.00	239,400.00
	(%)	22.89%	51.71%	25.40%	100.00%
Área de Amenaza, TR 50 años	(m2)	49,356.00	128,052.00	89,604.00	267,012.00
	(%)	18.48%	47.96%	33.56%	100.00%
Área de Amenaza, TR 100 años	(m2)	48,420.00	127,368.00	117,180.00	292,968.00
	(%)	16.53%	43.48%	40.00%	100.00%
Área de Amenaza, TR 200 años	(m2)	49,644.00	124,344.00	146,052.00	320,040.00
	(%)	15.51%	38.85%	45.64%	100.00%
Área de Amenaza, TR 500 años	(m2)	42,826.00	113,533.00	184,877.00	341,236.00
	(%)	12.55%	33.27%	54.18%	100.00%
Área de Amenaza, TR 1000 años	(m2)	38,976.00	109,760.00	208,192.00	356,928.00
	(%)	10.92%	30.75%	58.33%	100.00%

5.1.2.2. Escenarios de peligros generados en áreas de amenaza por flujos hiperconcentrados para diferentes periodos de retornos para CN = 75 curva extrema

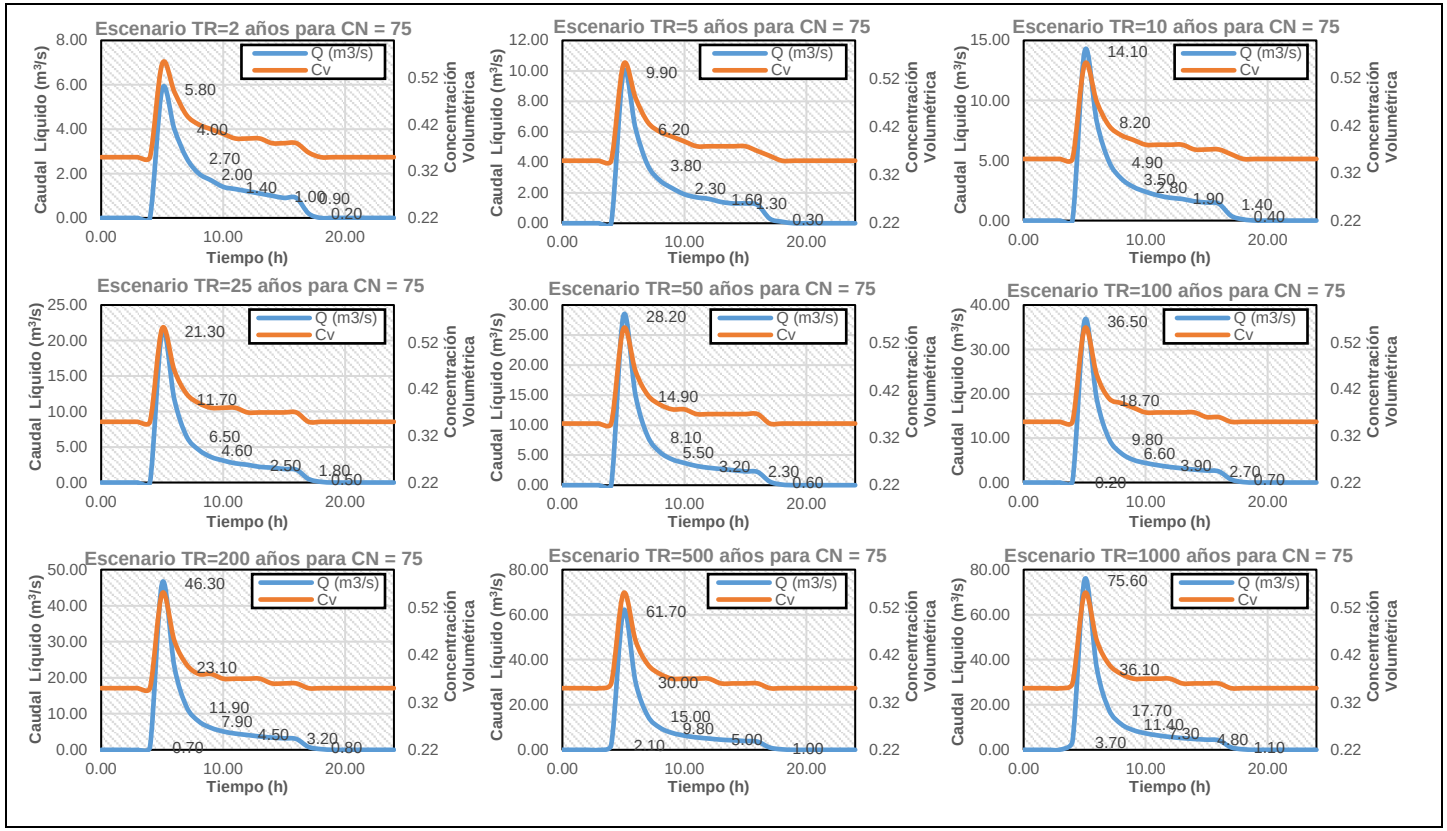
Se analizarán varios escenarios enfocados solamente en la quebrada Sahuanay; en el caso de un hidrograma líquido que presenta un número de curva de 75, considerado como una curva extrema, la concentración volumétrica de sedimentos inicial (Cv) se establecerá entre el 35% y el 45%. Los demás parámetros necesarios para la modelación serán aquellos detallados previamente en el apartado 5.1.1.8.

Análisis para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=75)

Se estudió para un TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75) una creciente con un caudal líquido máximo de 5.80, 9.90, 14.10, 21.30, 28.20, 36.50, 46.30, 61.70, y 75.60 m^3/s respectivamente, cuya concentración volumétrica de sedimentos es variable de 35 % a 55 % en la rama ascendente del hidrograma y de valor máximo de 55 %, disminuyendo a 49 % y finalmente a 35 % manteniéndose inalterado hasta la conclusión del hidrograma, tal como se muestra a continuación:

Figura 37

Hidrogramas líquidos y sólidos para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=75) con Cv=0.35-0.55



Nota. La figura los diferentes escenarios de los hidrogramas líquidos y sólidos para un CN=75 y una concentración volumétrica variable de 0.35 a 0.55.

Los resultados de la modelación con el FLO-2D se obtuvo el Volumen del flujo de sedimentos en millones de m^3 (M m^3), como se detalla a continuación:

Tabla 33

Volumen del flujo de sedimentos para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75)

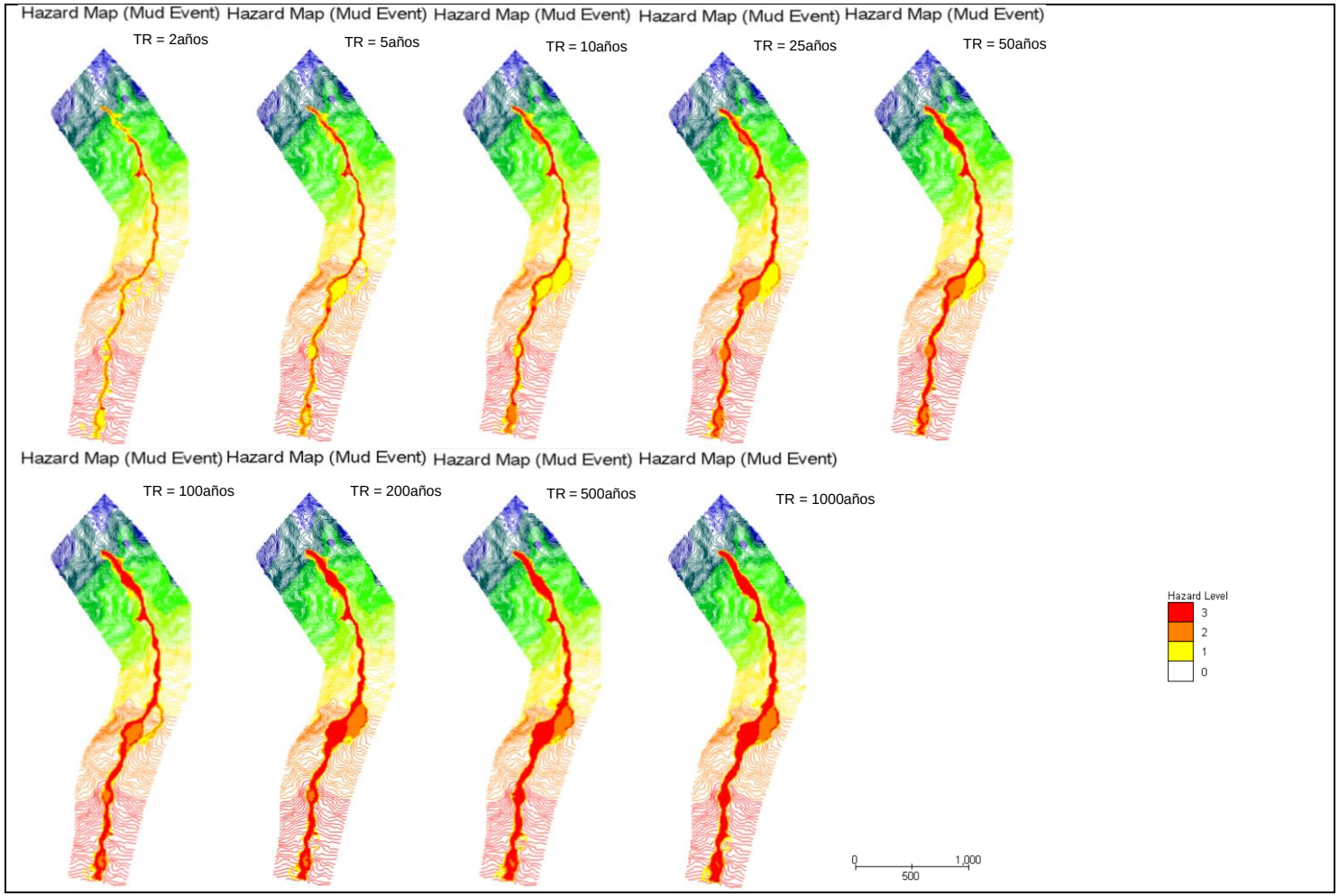
Volumen del flujo de sedimentos (M m^3)	TR=2 años	TR=5 años	TR=10 años	TR=25 años	TR=50 años	TR=100 años	TR=200 años	TR=500 años	TR=1000 años
Volumen de agua (M m^3)	0.087	0.129	0.168	0.233	0.292	0.363	0.446	0.577	0.694
Volumen de sedimentos (M m^3)	0.071	0.105	0.136	0.187	0.237	0.292	0.360	0.468	0.565
Volumen de agua más sedimentos (M*m^3)	0.158	0.234	0.304	0.419	0.529	0.654	0.806	1.045	1.259

Nota. La tabla muestra los volúmenes del flujo a diferentes escenarios para CN = 75.

A continuación, se muestra los mapas de nivel de peligros (Hazard Map) generado por los flujos hiperconcentrados, para caudales líquidos de: Ql = 5.80, 9.90, 14.10, 21.30, 28.20, 36.50, 46.30, 61.70, y 75.60 m^3/s (CN = 71), en diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años:

Figura 38

Mapas de Nivel de peligros para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75)



Nota. La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 75 para los niveles de peligro alto, medio y bajo en Sahuanay.

De lo mostrado en la figura 69 se obtuvo los resultados del nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados representados en áreas de amenaza para los diferentes niveles de peligro dados en niveles bajo, medio y alto, donde el modelo predice un área total de inundación de 181,620.00; 218,484.00; 248,544.00; 279,720.00; 305,784.00; 327,384.00; 352,152.00; 372,841.00; 385,728.00 m^2 para diferentes periodos de retorno TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 100 años respectivamente dentro del área simulada tal como se muestra en la Tabla 34:

Tabla 34

Áreas de amenaza en diferentes niveles de peligro generado por flujos hiperconcentrados, para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN = 75)

Área de amenaza para diferentes TR		Nivel de peligro			
		Nivel 1 (bajo)	**Nivel 2 (medio)**	**Nivel 3 (alto)**	Total
Área de Amenaza, TR 2 años	(m^2)	67,140.00	93,204.00	21,276.00	181,620.00
	(%)	36.97%	51.32%	11.71%	100.00%
Área de Amenaza, TR 5 años	(m^2)	57,456.00	117,252.00	43,776.00	218,484.00
	(%)	26.30%	53.67%	20.04%	100.00%
Área de Amenaza, TR 10 años	(m^2)	53,928.00	125,748.00	68,868.00	248,544.00
	(%)	21.70%	50.59%	27.71%	100.00%
Área de Amenaza, TR 25 años	(m^2)	47,736.00	128,304.00	103,680.00	279,720.00
	(%)	17.07%	45.87%	37.07%	100.00%
Área de Amenaza, TR 50 años	(m)	48,528.00	126,108.00	131,148.00	305,784.00
	(%)	15.87%	41.24%	42.89%	100.00%
Área de Amenaza, TR 100 años	(m2)	48,996.00	120,924.00	157,464.00	327,384.00
	(%)	14.97%	36.94%	48.10%	100.00%
Área de Amenaza, TR 200 años	(m2)	50,400.00	119,520.00	182,232.00	352,152.00
	(%)	14.31%	33.94%	51.75%	100.00%
Área de Amenaza, TR 500 años	(m2)	47,089.00	111,230.00	214,522.00	372,841.00
	(%)	12.63%	29.83%	57.54%	100.00%
Área de Amenaza, TR 1000 años	(m2)	43,648.00	110,144.00	231,936.00	385,728.00
	(%)	11.32%	28.55%	60.13%	100.00%

5.1.3. Determinar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

5.1.3.1. Resultados de las velocidades máximas generadas por los flujos hiperconcentrados con la aplicación del modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay para escenarios 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, CN = 71

Con la simulación realizada en el ítem 5.1.1.8 se obtienen resultados de velocidades máximas en diferentes niveles de peligro, teniendo el siguiente resumen, ver Tabla 35:

Tabla 35

Resumen de los resultados de velocidades máximas (m/s) CN = 71

Nivel de Peligro	TR=2 años	TR=5 años	TR=10 años	TR=25 años	TR=50 años	TR=100 años	TR=200 años	TR=500 años	TR=1000 años
Nivel 1 (bajo)	0.95	0.97	0.99	0.98	0.98	0.95	0.96	0.98	0.96
Nivel 2 (medio)	2.81	3.69	3.98	3.82	3.73	3.78	3.95	3.58	3.27
Nivel 3 (alto)	4.08	5.36	5.84	6.23	7.09	7.40	7.62	8.61	9.13

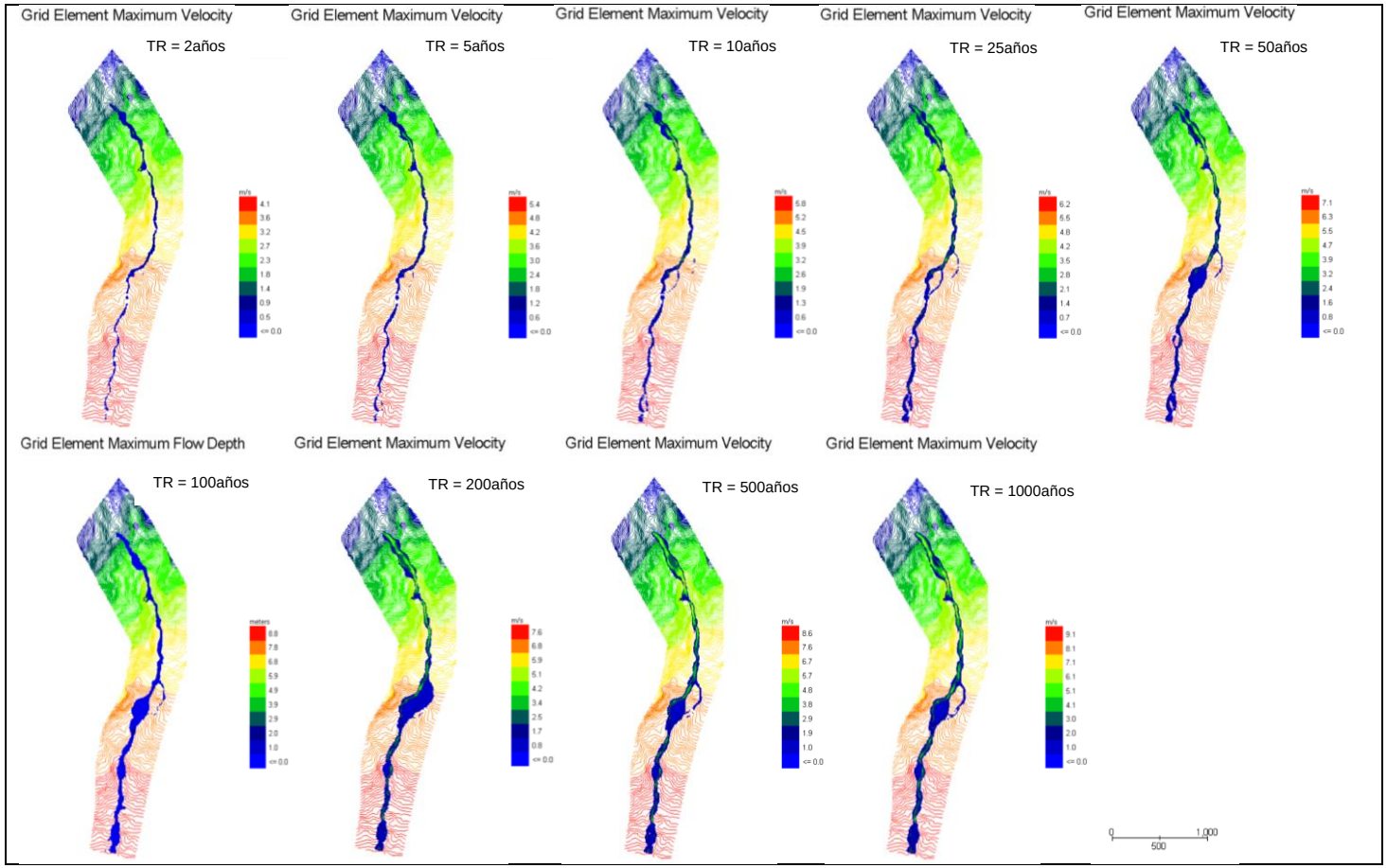
Nota. Esta tabla muestra cómo cambia las velocidades máximas de acuerdo a los niveles de peligro bajo, medio y alto para los diferentes periodos de retorno.

Análisis para Ql = 2.10, 4.60, 7.50, 12.70, 18.00, 24.60, 32.80, 46.20, y 58.50 m^3/s (CN=71) para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años respectivamente

La simulación muestra velocidades máximas generadas por los flujos hiperconcentrados de hasta 4.08, 5.36, 5.84, 6.23, 7.09, 7.40, 7.62, 8.61 y 9.13 m/s en la confluencia con la quebrada Sahuanay; y velocidades de hasta 2.81, 3.69, 3.98, 3.82, 3.73, 3.78, 3.95, 3.58 y 3.27m/s en la garganta de la quebrada, para diferentes niveles de peligros generado por los flujos hiperconcentrados tal como se mostró en la Tabla 35.

Figura 39

Velocidades máximas para TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años (CN=71)



Nota. La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 71 para las velocidades de los niveles de peligro alto, medio y bajo en Sahuanay.

5.1.3.2. Resultados de las velocidades máximas generadas por los flujos hiperconcentrados con la aplicación del modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay para escenarios 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, CN = 75

Con la simulación realizada en el ítem 4.1.1.8 se obtienen resultados de velocidades máximas en diferentes niveles de peligro, teniendo el siguiente resumen, ver Tabla 36:

Tabla 36

Resumen de los resultados de velocidades máximas (m/s) CN = 75

Nivel de Peligro	TR=2 años	TR=5 años	TR=10 años	TR=25 años	TR=50 años	TR=100 años	TR=200 años	TR=500 años	TR=1000 años
Nivel 1 (bajo)	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.98	0.98	0.97	0.98
Nivel 2 (medio)	3.80	4.00	3.97	3.86	3.87	3.89	3.83	3.41	3.55
Nivel 3 (alto)	5.24	6.11	6.39	7.36	7.44	7.92	8.61	8.98	9.83

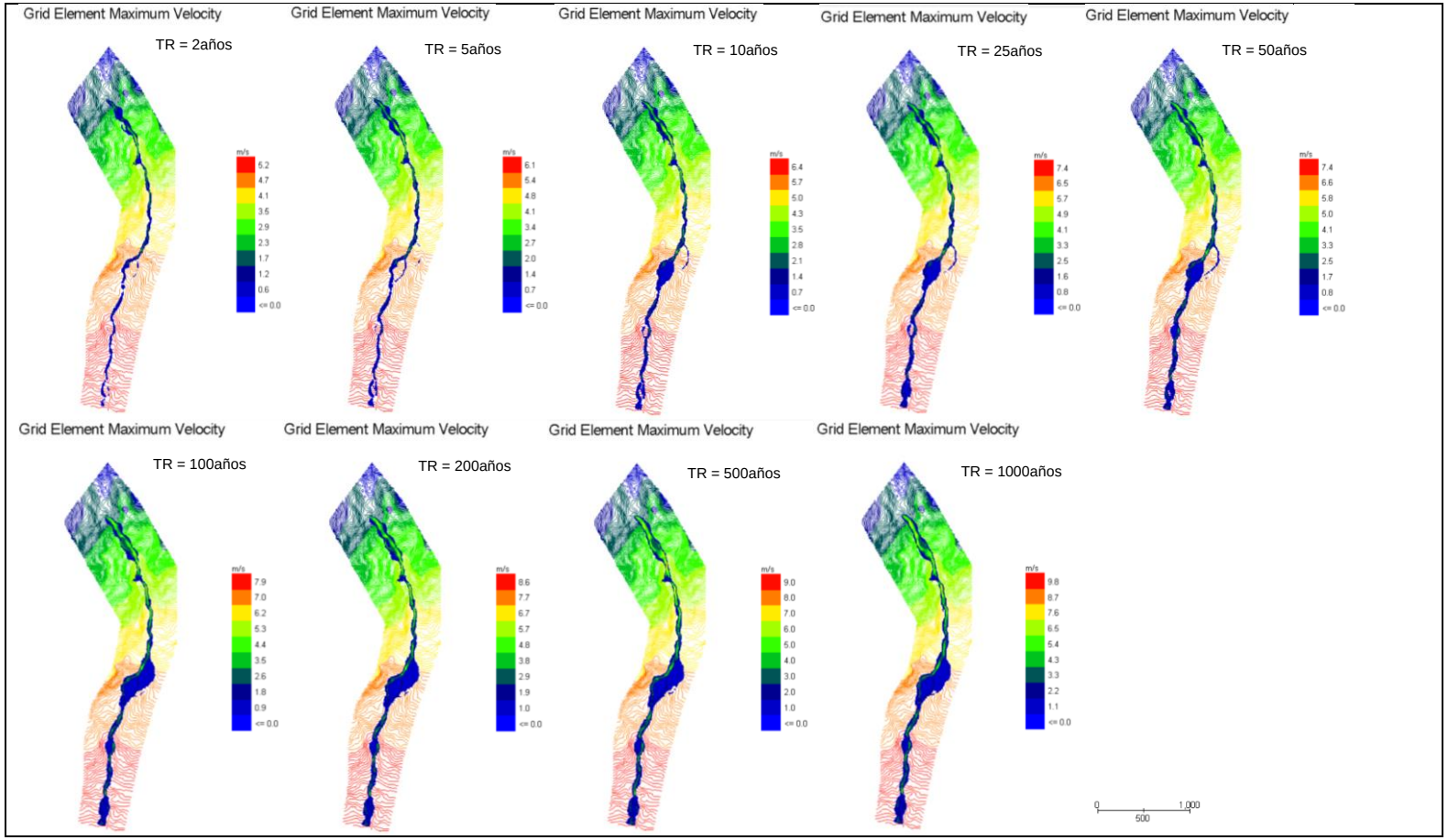
Nota. Esta tabla muestra cómo cambia las velocidades máximas de acuerdo a los niveles de peligro bajo, medio y alto para los diferentes periodos de retorno.

Análisis para Ql = 5.80, 9.90, 14.10, 21.30, 28.20, 36.50, 46.30, 61.70, 75.60 m^3/s (CN=75) para diferentes TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente

La simulación muestra velocidades máximas generadas por los flujos hiperconcentrados de hasta 5.24, 6.11, 6.39, 7.36, 7.44, 7.92, 8.61, 8.98, y 9.83 m/s en la confluencia con la quebrada Sahuanay; y velocidades de hasta 3.80, 4.00, 3.97, 3.86, 3.87, 3.89, 3.83, 3.41, 3.55 m/s en la garganta de la quebrada, para diferentes niveles de peligrosidad generado por los flujos hiperconcentrados tal como se mostró en la Tabla 36.

Figura 40

Velocidades máximas para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años (CN=75)



Nota. La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 71 para las velocidades de los niveles de peligro alto, medio y bajo en Sahuanay.

5.1.4. Establecer la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Aplicaremos la fórmula propuesta por Takahashi (1991, (Ordoñez y Ruiz, 2019) donde el caudal máximo del flujo hiperconcentrado se determina mediante el caudal de agua y material en suspensión, teniéndose la siguiente ecuación, ya planteada anteriormente:

$$Q = Ql * BF$$

$$BF = \frac{1}{1 - Cv}$$

$$Q = Ql * \frac{1}{1 - Cv}$$

Donde:

Q: Caudal total del flujo hiperconcentrado (m^3/s)

Ql: Caudal líquido (m^3/s)

BF: Factor de volumen (Bulking factor)

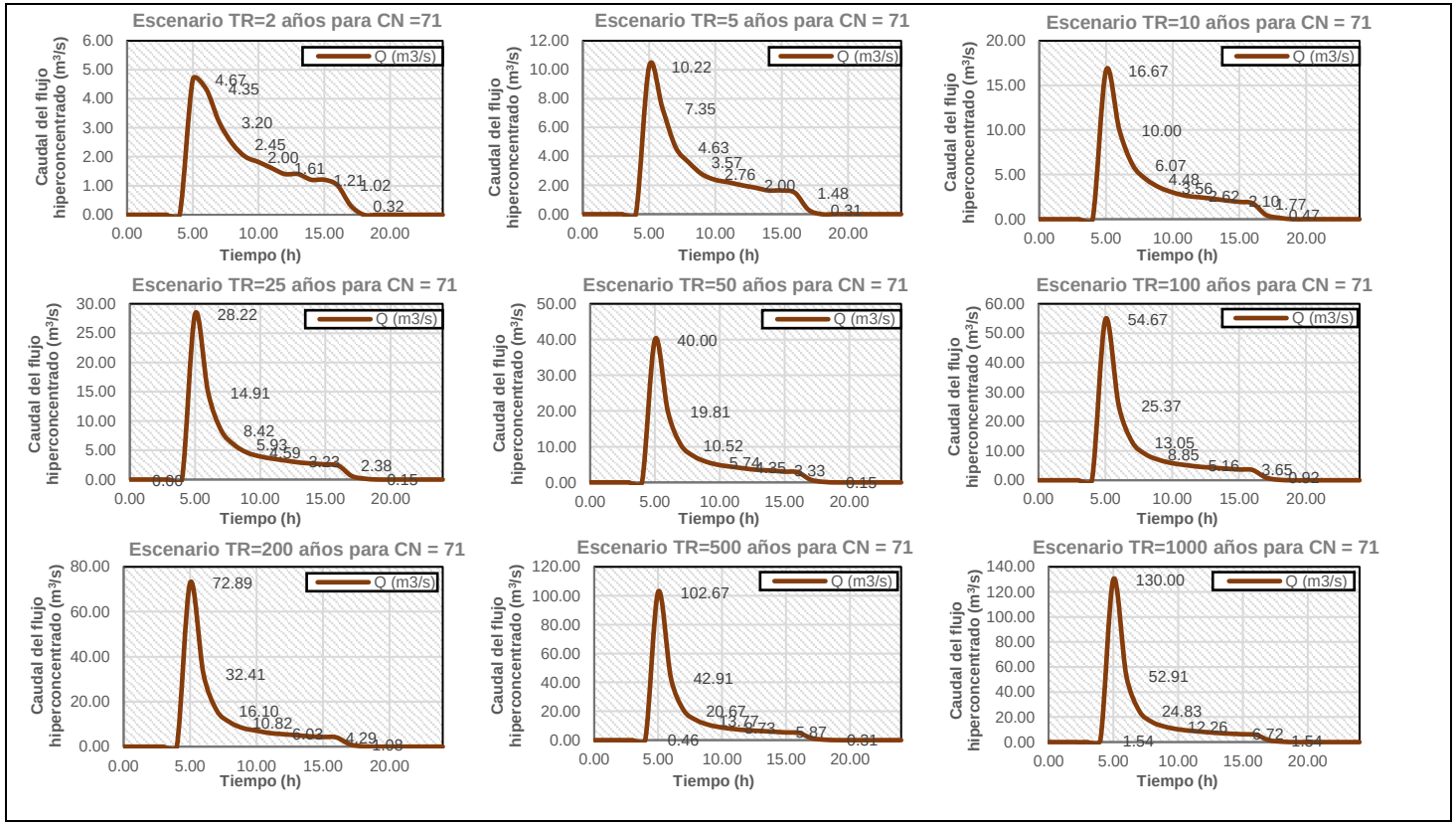
Cv: Concentración volumétrica de detritos o flujos hiperconcentrados

La concentración volumétrica (Cv) en la presente Tesis se utilizó una variación en el rango de 0.35 a 0.55, dependiendo de la magnitud del flujo que se esté analizando, siendo este caso flujo hiperconcentrado.

5.1.4.1. Resultados de caudales máximos generados por los flujos hiperconcentrados con la aplicación del modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay para escenarios 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, CN = 71

Figura 41

Hidrogramas del flujo hiperconcentrado para diferentes TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=71)

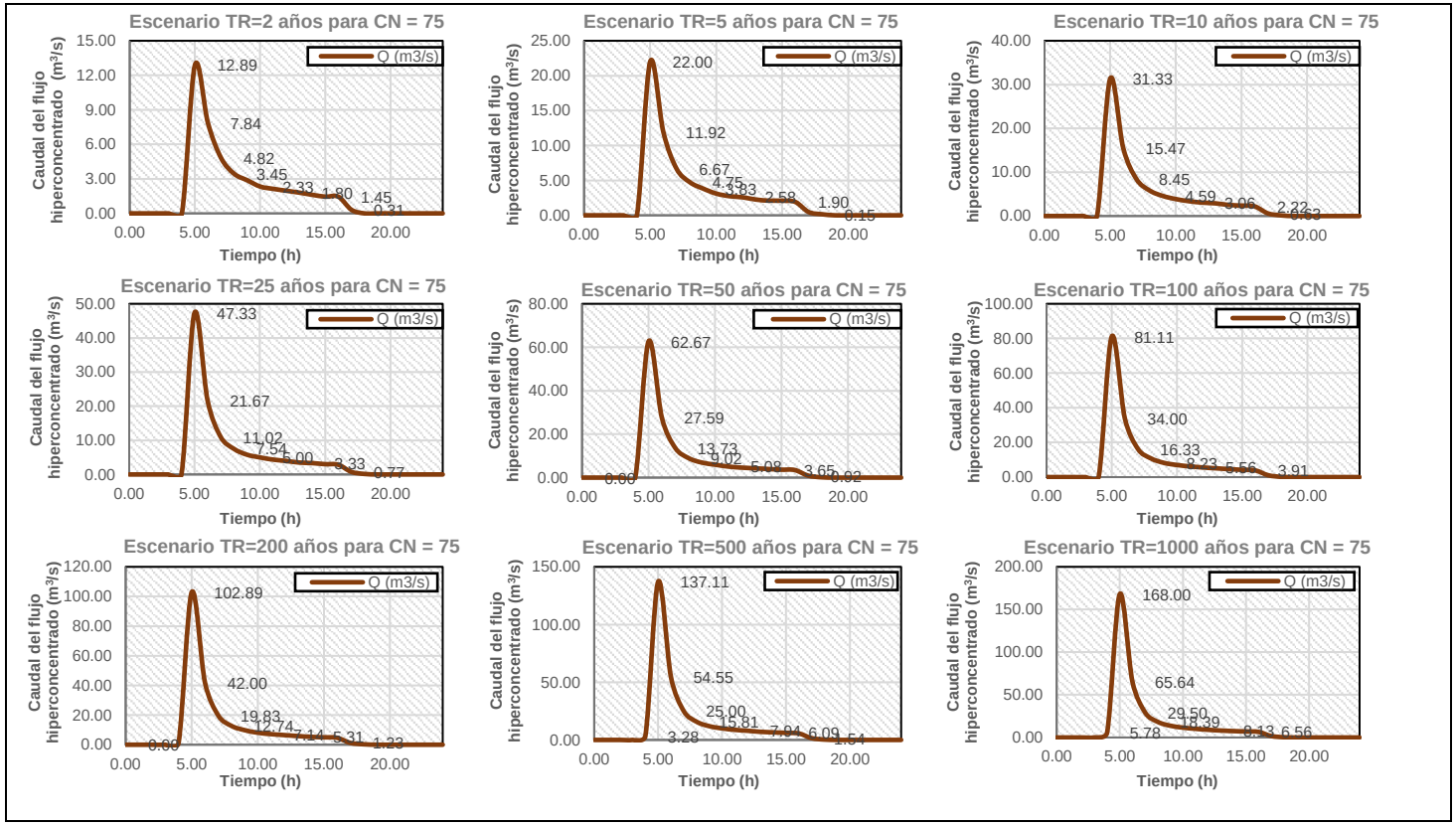


Nota. *La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 71 para los caudales del flujo hiperconcentrado.*

5.1.4.2. Resultados de caudales máximos generados por los flujos hiperconcentrados con la aplicación del modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay para escenarios 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, CN = 75

Figura 42

Hidrograma del flujo hiperconcentrado para TR=2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (CN=75)



Nota. *La figura muestra los diferentes escenarios de CN = 75 para los caudales del flujo hiperconcentrado.*

5.2. Discusión de Resultados

La discusión de resultados obtenidos del estudio de la quebrada Sahuanay del distrito de Tamburco provincia de Abancay por flujos hiperconcentrados, se tienen los siguientes:

5.2.1. Relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Tabla 37

Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

Zona de Estudio	Ordoñez y Ruiz (2019)	Análisis comparativo
Para la determinación del efecto de las precipitaciones máximas se utiliza 52 datos históricos desde 1964 al 2021, las mismas que al realizar la prueba de datos dudosos se trabajó con 50 datos, Con un nivel de significancia del 5%, se ha obtenido un buen ajuste de bondad mediante el método de Kolmogorov-Smirnov utilizando la información hidrológica y meteorológica proveniente de la estación de Granja San Antonio en Abancay. Esta estación se considera confiable y cercana al área de estudio, lo que valida la precisión de los resultados obtenidos. Así mismo se utilizó el modelo numérico FLO-2D para diferentes periodos de retorno el cual genero los diferentes niveles de peligros generados por los flujos hiperconcentrados.	La información hidrológica y meteorológica recopilada de 32 años históricos de precipitaciones provenientes de la estación de Huamachuco fue analizada con éxito a través del método de Kolmogorov - Smirnov, con un nivel de significancia del 5%. Este análisis garantiza la precisión de los resultados obtenidos, respaldando así la confiabilidad de la estación y su proximidad al área de estudio. Los resultados del modelo numérico FLO-2D revelan que el cono de deyección de la Quebrada El Tingo, que incluye el centro poblado de Vijus, representa un riesgo máximo en términos de inundaciones.	Ambas investigaciones consideran que se tiene buenas informaciones hidrológicas y meteorológica cuando la estación se encuentra cercana a la zona de estudio, el cual cuente con datos mayores a 25 datos o años históricos. Así mismo el modelo FLO-2D demuestra buena simulación en diferentes periodos de retorno el nivel de peligros generados por los flujos hiperconcentrados.

5.2.2. Identificar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Tabla 38

Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

Zona de Estudio	Villasante (2022)	Análisis comparativo
En la presente tesis se aplica el modelo FLO-2D para la determinación de áreas de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados, para diferentes periodos de retorno obteniendo los siguientes resultados: Para CN=71 (curva calculada) se tiene áreas de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados de A = 4.07, 9.05, 15.42, 25.40, 33.56, 40.00, 45.64, 54.18, 58.33% (CN = 71) y para CN = 75 (curva máxima estimada) áreas de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados de A = 11.71, 20.04, 27.71, 37.07, 42.89, 48.10, 51.75, 57.54 y 60.13% (CN = 75); en escenarios de TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente. Ya que se piensa correlacional las precipitaciones máximas generadas en diferentes periodos de retorno, con las áreas de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados siendo este último valor relacionado a la concentración volumétrica Cv variable del sedimento.	Aplica el modelo FLO-2D para la simulación del flujo de detritos En la quebrada de Chinchiña localidad de Pacsica, el cual obtiene como resultado un área de amenaza de 40.85 % aplicado a un periodo de retorno de 100 años, determinándolo como una zona de nivel de nivel de peligrosidad muy alta.	Ambas investigaciones coinciden en el uso del modelo FLO-2D para determinar el área de amenaza generada por los flujos hiperconcentrados, habiendo una ligera aproximación en la determinación del área de amenaza en % para el periodo de retorno de 100 años, esta comparación es de aporte ya que ayuda a determinar que, a partir del 40% es considerado como zona de nivel de nivel de peligrosidad de alto riesgo.

5.2.3. *Determinar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021*

Tabla 39

Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

Zona de Estudio	Yucra (2023)	Análisis comparativo
Se realiza el estudio con apoyo del Modelo FLO-2D determinándose para diferentes periodos de retorno la velocidad máxima del flujo hiperconcentrado, siendo los siguientes resultados: Para CN=71 (curva calculada) se tiene velocidades máximos generada por los flujos hiperconcentrados de V = 4.08, 5.36, 5.84, 6.23, 7.09, 7.40, 7.62, 8.61 y 9.13 m/s; y para CN = 75 (curva máxima estimada) velocidades máximos generada por los flujos hiperconcentrados de V = 5.24, 6.11, 6.39, 7.36, 7.44, 7.92, 8.61, 8.98 y 9.83 m/s, en escenarios de TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente. Ya que se piensa correlacional las precipitaciones máximas generadas en diferentes periodos de retorno, con la velocidad máxima generado por los flujos hiperconcentrados siendo este último valor relacionado a la concentración volumétrica Cv variable del sedimento.	Aplica el enfoque de simulación numérica a través del software HEC-RAS-6.1 para modelar el flujo de sedimentos, obtiene como resultado la velocidad máxima de 8 m/s aplicado a un periodo de retorno de 100 años.	Ambas investigaciones tienen una ligera aproximación en los resultados de la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados para el periodo de retorno de 100 años. Cabe mencionar que dicha velocidad dependerá de la concentración volumétrica del sedimento Cv por lo que la presente investigación tomo un valor considerable de Cv variable de 0.35 a 0.55 como valor máximo.

5.2.4. Establecer la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021

Tabla 40

Análisis comparativo del efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D

Zona de Estudio	Yucra (2023)	Análisis comparativo
Se realiza el estudio con apoyo del Modelo HEC-HMS determinándose el caudal líquido para diferentes periodos de retorno, siendo los siguientes resultados: Para CN=71 (curva calculada) se tiene caudales líquidos máximos de Ql = 2.10, 4.60, 7.50, 12.70, 18.00, 24.60, 32.80, 46.20, y 58.50 m3/s; y para CN = 75 (curva máxima estimada) caudales líquidos máximos de Ql = 5.80, 9.90, 14.10, 21.30, 28.20, 36.50, 46.30, 61.70, y 75.60 m3/s, en escenarios de TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente. Dichos caudales líquidos ayudaron a determinar el caudal del flujo hiperconcentrado considerando una concentración volumétrica Cv del sedimento variable de 0.35 a 0.55 como valor máximo, el cual se obtuvieron aplicando la fórmula propuesta por Takahashi (1991, (Ordoñez Castro de Gabrielli & Ruiz Zelada, 2019) donde el caudal máximo del flujo hiperconcentrado se determina mediante el caudal de agua y material en suspensión, obteniéndose los siguientes resultados: Para CN=71 (curva calculada) se tiene caudales máximos generado por los flujos hiperconcentrados de Q = 4.67, 10.22, 16.67, 28.22, 40.00, 54.67, 72.89, 102.67 y 130.00 m^3/s; y para CN = 75 (curva máxima estimada) caudales máximos generado por los flujos hiperconcentrados de Q = 12.89, 22.00, 31.33, 47.33, 62.67, 81.11, 102.89, 137.11 y 168.00 m^3/s, en escenarios de TR = 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años respectivamente. Ya que se piensa correlacional las precipitaciones máximas con el caudal generado por los flujos hiperconcentrados dados en diferentes periodos de retorno.	Tiene como resultado un caudal máximo liquido de 24.30 m^3/s aplicando el modelo HEC-HMS calcula la precipitación máxima que puede ocurrir en un período de 24 horas, considerando un intervalo de retorno de 100 años.	Ambas investigaciones coinciden en el uso del modelo HEC-HMS para determinar el caudal máximo líquido, habiendo una ligera diferencia en la determinación del caudal máximo para el periodo de retorno de 100 años. Por lo que la aproximación en dichos resultados dependerá de la cantidad de datos o años históricos de precipitación que en la presente tesis se usó 52 datos de precipitación máxima, del número de curva aplicada, puesto que en la presente investigación se utilizó para dos escenarios de CN, tanto para 71 curva calculada y CN = 75 considerando como curva máxima.

5.3. Prueba de Hipótesis

Luego del análisis descriptivo se procede al análisis inferencial que consiste en contrastar si existe relación entre las variables efecto de las precipitaciones máximas y nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021.

5.3.1. Hipótesis general

Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75. Por lo que se plantea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa siendo las siguientes:

La hipótesis nula $H_0: \rho = 0$ (No existe una correlación lineal).

H_0: No existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

La hipótesis alternativa $H_1: \rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal).

H_1: Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

5.3.2. Hipótesis específicas

Se determinaron las siguientes hipótesis especificas:

5.3.2.1. Hipótesis específica 1:

Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la

quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75. Por lo que se plantea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa siendo las siguientes:

- La hipótesis nula $H_0: \rho = 0$ (No existe una correlación lineal).

  H_0: No existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

- La hipótesis alternativa $H_1: \rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal).

  H_1: Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

Tabla 41

Precipitaciones máximas (mm) vs Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para los diferentes periodos de retorno de CN = 71

TR (años)	PP máx (mm)	Área (%)
2	16.64	4.07%
5	18.82	9.05%
10	20.65	15.42%
25	23.35	25.40%
50	25.62	33.56%
100	28.12	40.00%
200	30.86	45.64%
500	34.90	54.18%
1000	38.30	58.33%

Tabla 42

Precipitaciones máximas (mm) vs Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno de CN = 75

TR (años)	PP máx (mm)	Área (%)
2	16.64	11.71%

5	18.82	20.04%
10	20.65	27.71%
25	23.35	37.07%
50	25.62	42.89%
100	28.12	48.10%
200	30.86	51.75%
500	34.90	57.54%
1000	38.30	60.13%

5.3.2.1.1. Cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r" para la Prueba para la hipótesis específica 1

Aplicando el cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r" se tiene el valor de *r* = 0.988, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 71. Así mismo se tiene el valor de *r* = 0.966, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 75.

Figura 43

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno, CN = 71

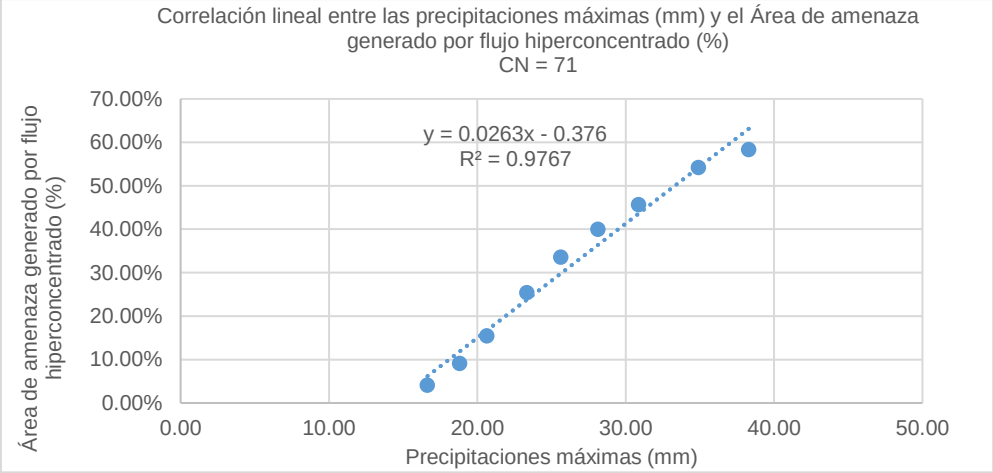
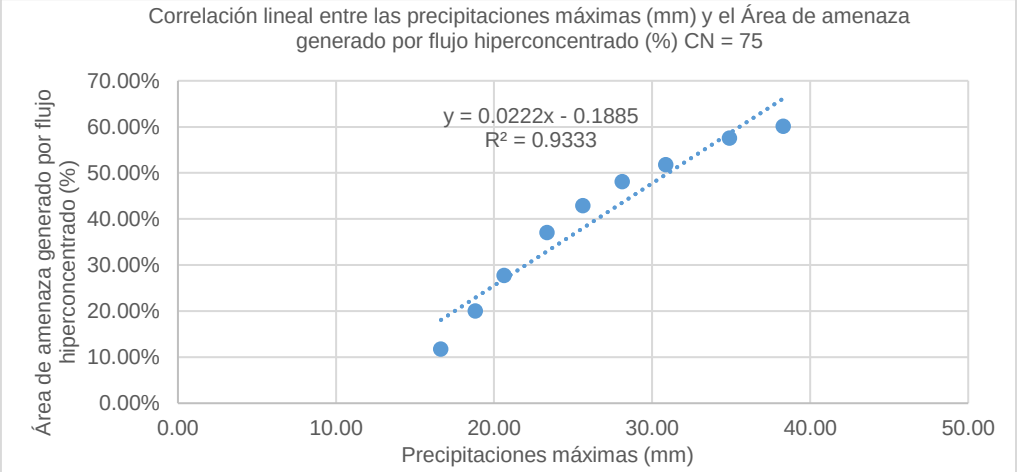


Figura 44

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el Área de amenaza generado por flujo hiperconcentrado (%) para diferentes periodos de retorno, CN = 75



5.3.2.1.2. Estadístico de Prueba para la hipótesis específica 1

Teniendo un valor de: **t = 17.101,** para CN = 71

Y teniendo un valor de: **t = 9.900,** para CN = 75

Para el cálculo del valor crítico se tiene que:

n = 9

grado de libertad gl = (n-2) = 7

α = 0.05, considerando que 5% es el nivel de significancia, el cual generalmente trabajamos con el 5%.

Valor crítico: *t (α/2, n −2)* = 2.365; tanto para CN = 71 y CN = 75.

Considerando que si:

$$|t| > El\ Valor\ crítico; entonces\ Rechace\ la\ H_0$$

$$|t| \leq El\ Valor\ crítico; entonces\ No\ Rechace\ la\ H_0$$

Decisión: Se debe rechazar la hipótesis nula H_0.

El coeficiente de correlación es diferente de cero. Por lo que, existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

En ambos CN = 71 y CN = 75 existe una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y el área (%) de riesgo generado por flujos hiperconcentrados.

5.3.2.2. Hipótesis específica 2:

Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75. Por lo que se plantea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa siendo las siguientes:

- La hipótesis nula H_0: $\rho = 0$ (No existe una correlación lineal).

  H_0: No existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

- La hipótesis alternativa H_1: $\rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal).

  H_1: Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

Tabla 43

Precipitaciones máximas (mm) vs Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno con un CN = 71

TR (años)	PP máx (mm)	Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s)
2	16.64	4.08
5	18.82	5.36
10	20.65	5.84
25	23.35	6.23
50	25.62	7.09
100	28.12	7.40
200	30.86	7.62
500	34.90	8.61
1000	38.30	9.13

Tabla 44

Precipitaciones máximas (mm) vs Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno con un CN = 75

TR (años)	PP máx (mm)	Velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s)
2	16.64	5.24
5	18.82	6.11
10	20.65	6.39
25	23.35	7.36
50	25.62	7.44
100	28.12	7.92
200	30.86	8.61
500	34.90	8.98
1000	38.30	9.83

5.3.2.2.1. Cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r" para la Prueba para la hipótesis específica 2

Aplicando el cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r", se tiene el valor de *r* = 0.980, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 71. Así mismo se tiene el valor de *r* = 0.988, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 75.

Figura 45

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71

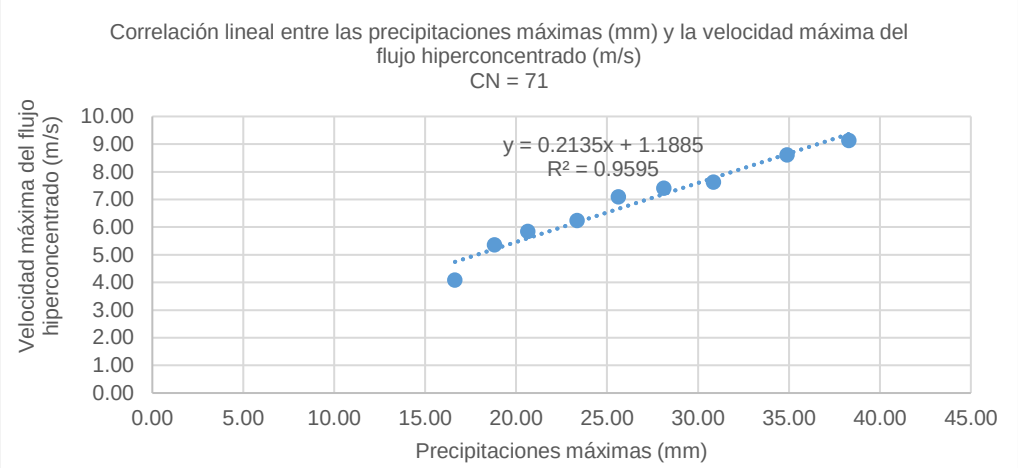
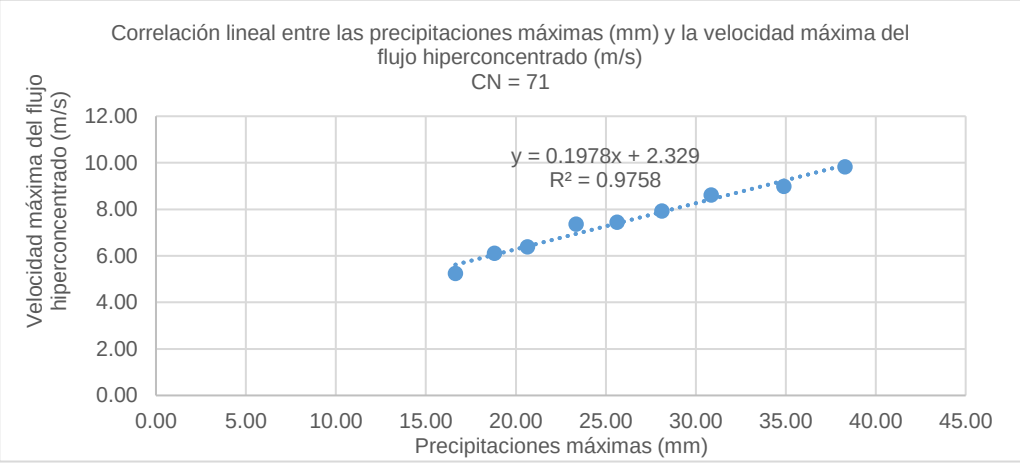


Figura 46

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima del flujo hiperconcentrado (m/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75



5.3.2.2.2. Estadístico de Prueba para la hipótesis específica 2

Teniendo un valor de: **t = 12.880,** para CN = 71

Y teniendo un valor de: **t = 16.815,** para CN = 75

Para el cálculo del valor crítico se tiene que:

n = 9

grado de libertad gl = (n-2) = 7

α = 0.05, considerando que 5% es el nivel de significancia, el cual generalmente trabajamos con el 5%.

Valor crítico: $t\ (\alpha/2,\ n-2)$ = 2.365; tanto para CN = 71 y CN = 75.

Considerando que si:

$$|t| > El\ Valor\ crítico; entonces\ Rechace\ la\ H_0$$

$$|t| \leq El\ Valor\ crítico; entonces\ No\ Rechace\ la\ H_0$$

Decisión: Se debe rechazar la hipótesis nula H_0.

El coeficiente de correlación es diferente de cero. Por lo que, existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

En ambos CN = 71 y CN = 75 existe una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima (m/s) generada por los flujos hiperconcentrados.

5.3.2.3. Hipótesis específica 3:

Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75. Por lo que se plantea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa siendo las siguientes:

- La hipótesis nula H_0: $\rho = 0$ (No existe una correlación lineal).

  H_0: No existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando

el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

- La hipótesis alternativa $H_1: \rho \neq 0$ (Existe una correlación lineal).

H_1: Existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

Tabla 45

Precipitaciones máximas (mm) vs Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71

TR (años)	PP máx (mm)	Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s)
2	16.64	4.67
5	18.82	10.22
10	20.65	16.67
25	23.35	28.22
50	25.62	40.00
100	28.12	54.67
200	30.86	72.89
500	34.90	102.67
1000	38.30	130.00

Tabla 46

Precipitaciones máximas (mm) vs Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75

TR (años)	PP máx. (mm)	Caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s)
2	16.64	12.89
5	18.82	22.00
10	20.65	31.33
25	23.35	47.33
50	25.62	62.67
100	28.12	81.11
200	30.86	102.89
500	34.90	137.11
1000	38.30	168.00

5.3.2.3.1. Cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r" para la Prueba para la hipótesis específica 3

Aplicando el cálculo de coeficiente de correlación de Pearson "r", se tiene el valor de *r* = 0.988, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 71. Así mismo se tiene el valor de *r* = 0.994, mostrando una correlación positiva muy alta; aplicado para un CN = 75.

Figura 47

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 71

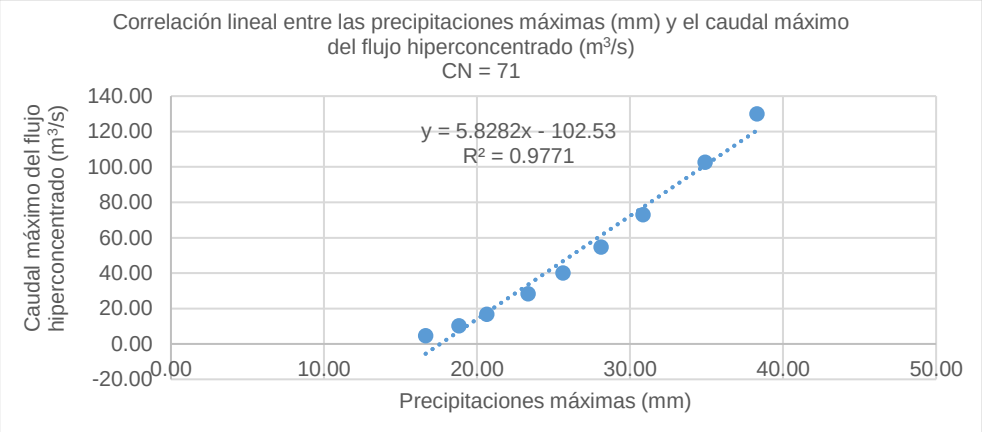
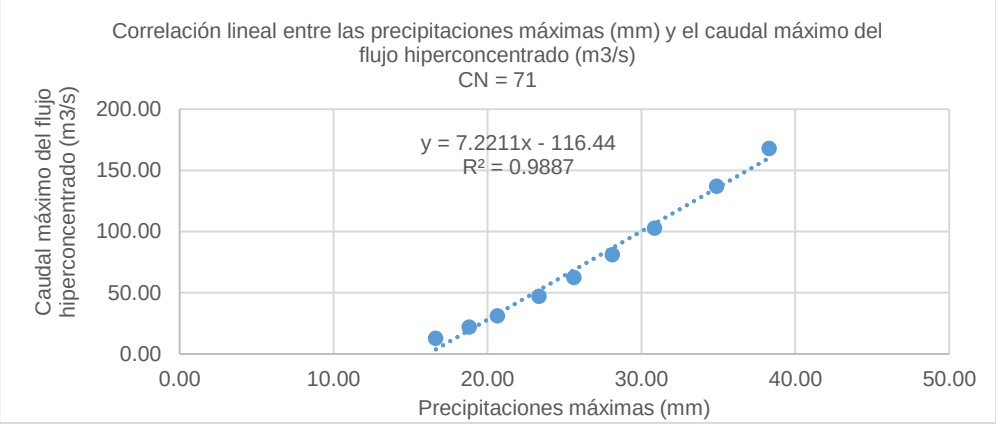


Figura 48

Correlación lineal entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo del flujo hiperconcentrado (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, CN = 75



5.3.2.3.2. Estadístico de Prueba para la hipótesis específica 3

Teniendo un valor de: **t = 17.260,** para CN = 71

Y teniendo un valor de: **t = 24.702,** para CN = 75

Para el cálculo del valor crítico se tiene que:

n = 9

grado de libertad gl = (n-2) = 7

α = 0.05, considerando que 5% es el nivel de significancia, el cual generalmente trabajamos con el 5%.

Valor crítico: *t (α/2, n −2)* = 2.365; tanto para CN = 71 y CN = 75.

Considerando que si:

$$|t| > El\ Valor\ crítico; entonces\ Rechace\ la\ H_0$$

$$|t| \leq El\ Valor\ crítico; entonces\ No\ Rechace\ la\ H_0$$

Decisión: Se debe rechazar la hipótesis nula H_0.

El coeficiente de correlación es diferente de cero. Por lo que, existe relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75.

En ambos CN = 71 y CN = 75 existe una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo (m^3/s) generada por los flujos hiperconcentrados.

VI. Conclusiones

6.1. Conclusión general

Se concluye que al relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021; se cuenta con datos estadísticos adecuados que permiten afirmar que el coeficiente de correlación no es igual a cero en todas las pruebas de hipótesis específicas, esto indica que existe una relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75; la misma que es considerada como una correlación lineal positiva muy alta entre ambas variables.

6.2. Conclusión del específico 1

Se concluye que al identificar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021; se cuenta con datos estadísticos adecuados que permiten afirmar que el coeficiente de correlación no es igual a cero, lo que indica que existe una relación significativa entre las variables efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75, considerándose como una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y el área (%) de amenaza generado por flujos hiperconcentrados.

6.3. Conclusión del específico 2

Se concluye que al determinar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac,

2021; se cuenta con datos estadísticos adecuados que permiten afirmar que el coeficiente de correlación no es igual a cero, lo que indica que existe una relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75, considerándose como una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y la velocidad máxima (m/s) generada por los flujos hiperconcentrados.

6.4. Conclusión del específico 3

Se concluye que al establecer la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021; se cuenta con datos estadísticos adecuados que permiten afirmar que el coeficiente de correlación no es igual a cero, lo que indica que existe una relación significativa entre el efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada Sahuanay, para los diferentes periodos de retorno de CN = 71 y CN = 75, considerándose como una correlación lineal positiva muy alta entre las precipitaciones máximas (mm) y el caudal máximo (m^3/s) generada por los flujos hiperconcentrados.

VII. Recomendaciones

7.1. Recomendación general

Visto los resultados al relacionar el efecto de las precipitaciones máximas y el nivel de peligro generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, siendo una correlación lineal positiva muy alta entre ambas variables; se recomienda un monitoreo continuo de los niveles y flujos de agua mediante uso de sensores para medición de precipitaciones y caudales, esto ayudará a prevenir y gestionar eficazmente situaciones en las que se alcanza o se acerca a los diferentes datos de precipitaciones o caudales máximos de los flujos hiperconcentrados para diferentes periodos de retorno; por lo que es fundamental poner en marcha un sistema de monitoreo y alerta temprana, además de elaborar un plan de rescate público. Para investigaciones posteriores, se sugiere equipar la quebrada con instrumentación para registrar eventos y facilitar estudios de flujos hiperconcentrados con mayor precisión.

7.2. Recomendación del específico 1

Visto los resultados al identificar la relación entre el efecto de las precipitaciones máximas y el área de amenaza generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, siendo una correlación lineal positiva muy alta; se recomienda a las autoridades de los distritos de Tamburco y Abancay que a través de su departamento de difusión, planifiquen la realización de talleres y charlas dirigidas a los habitantes de las comunidades afectadas con el objetivo de concientizar a la población sobre la importancia de la prevención de desastres naturales, especialmente aquellos de origen hidrogeológico.

7.3. Recomendación del específico 2

Visto los resultados al determinar la relación del efecto de las precipitaciones máximas y la velocidad máxima generada por los flujos hiperconcentrados aplicando el

modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, siendo una correlación lineal positiva muy alta; se recomienda considerar que es importante tener en cuenta que, a largo plazo, sería beneficioso tomar medidas para estabilizar la cuenca alta de la quebrada Sahuanay. Al hacerlo, se reduciría significativamente la cantidad de sedimentos que se depositan en su cauce, lo que podría abrir la posibilidad de realizar investigaciones hidrogeológicas para aprovechar el agua subterránea de la zona. Además, esta acción aumentaría la seguridad de las laderas del cerro Chuyllurpata y podría beneficiar el abastecimiento de agua para consumo humano.

7.4. Recomendación del específico 3

Visto los resultados al establecer la relación del efecto de las precipitaciones máximas y el caudal máximo generado por los flujos hiperconcentrados aplicando el modelo FLO-2D en la quebrada de Sahuanay, distrito de Tamburco, Abancay, Apurímac, 2021, siendo una correlación lineal positiva muy alta; se recomienda llevar a cabo modelos computacionales avanzados como el FLO-2D, como es de saber el modelo FLO-2D es uno de los más utilizados a nivel internacional para el modelado de flujos hiperconcentrados considerando que en la presente Tesis se realizó distintos escenarios de inundación llegándose a la más severa, por lo que se ha visto que el canal no aguantaría condiciones extremas para caudales de flujos hiperconcentrados mayores a 20 m^3/s.

7.5. Otras recomendaciones

- Se sugiere el uso de modelos bidimensionales alternativos para el estudio del flujo hiperconcentrado en los cursos de agua, considerando las interrupciones temporales en el flujo de las secciones, los cambios en la forma de estas secciones y variaciones en la concentración del agua.
- Es importante el mantenimiento periódico del canal Sahuanay y construir defensas ribereñas, como gaviones, una vez finalice la temporada de lluvias, teniendo en cuenta el material y la cantera adecuada para su construcción.

Además, se deben ampliar las canalizaciones de la quebrada y reconstruir puentes más altos y amplios para prevenir daños por objetos arrastrados de gran tamaño, así como retirar las casas ubicadas en el cauce de la quebrada.

- Es crucial llevar a cabo sistemas de alerta temprana en el deslizamiento descrito en el informe, a través de la instalación de puntos topográficos visibles alineados y su medición con equipos precisos con regularidad. Se necesitan dos estaciones meteorológicas, una en Abancay y otra en el Santuario de Ampay, para registrar la precipitación, temperatura y humedad, con el fin de estimar los volúmenes de agua esperados en épocas de lluvia. También se requiere un sismógrafo en la cuenca para monitorear la actividad sísmica local.
- A largo plazo, se deben tomar medidas para estabilizar la cuenca alta de la quebrada Sahuanay, disminuyendo así la cantidad de sedimentos que llegan a su cauce. Esta estabilización permitiría realizar estudios hidrogeológicos para la captación de aguas subterráneas, fortalecer la seguridad de las laderas y garantizar un suministro de agua para consumo.
- Se recomienda implementar modelos de lluvia adaptados a diversos escenarios de cambio climático, dado que los patrones de precipitación están experimentando transformaciones significativas como resultado de este fenómeno. Este ajuste es esencial para simular posibles futuros en los que la frecuencia e intensidad de las precipitaciones extremas aumenten, efectos que pueden influir directamente en la ocurrencia y magnitud de los flujos hiperconcentrados. Una comprensión precisa de estos cambios es fundamental, ya que puede ofrecer información valiosa para optimizar el modelo FLO-2D, mejorando así la predicción y gestión de eventos hidrológicos extremos.

VIII. Referencias bibliográficas

Autoridad Nacional del Agua, & Autoridad Administrativa del Agua Pampas - Apurímac. (2017). Estudio hidrológico de máximas avenidas: Delimitación de la faja marginal de las quebradas afluentes al rio Mariño, en el ámbito del distrito de Abancay. *Autoridad Nacional del Agua*. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3821

Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos, Autoridad Administrativa del Agua Titicaca, & Administración Local de Agua Huancané. (2010). *Evaluación de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Huancané y Suches: Estudio hidrológico de las cuencas Huancané y Suches* (p. 415) [Informe Final - Volumen I]. Autoridad Nacional del Agua. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/1736

Borja Suárez, M. (2016). *Metodología de Investigación Científica para ingenieros*. Biblioteca Nacional del Perú. https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil

Carrasco Díaz, S. (2005). *Metodología de la Investigación científica* (A. J. Paredes Galván, Ed.; 1era ed.). San Marcos. https://www.academia.edu/26909781/Metodologia_de_La_Investigacion_Cientifica_Carrasco_Diaz_1_

Castillo Navarro, L. F. (2006). *Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0077.pdf

Castillo Navarro, L. F. (2018). *Modelamiento numérico bidimensional del flujo hiperconcentrado* [Tesis para optar el grado de Magister Scientiae en Recursos

Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina]. https://hdl.handle.net/20.500.12996/3505

Celi Farfan, J. C., & Tanta Arcos, F. Y. (2019). *Modelamiento y simulación de la Quebrada Llocllamayo para control de flujo de escombros – Región de Puno* [Tesis de Pregrado, Universidad Ricardo Palma]. https://hdl.handle.net/20.500.14138/2649

CENEPRED. (2014). *[CENEPRED] Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. Versión 02. (Biblioteca SIGRID)*. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/257

Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos* (M. E. Súárez R., Ed.; Primera). McGraw-Hill. https://www.academia.edu/43519012/Ven_Te_Chow_HIDRAULICA_DE_CANALES_ABIERTOS

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada* (R. Edna Suárez Martha, Ed.; McGRA W-HILL JNTERAMERICANA, S.A.). McGraw-Hill.

Córdoba Pazos, Á. C., & Maffla Chamorro, F. R. (2021). Metodología para evaluación de amenaza por flujo torrencial detonado por lluvia, en la Microcuenca el Rollo Municipio de San Bernardo, Nariño. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, *21*(2), Article 2. https://doi.org/10.19053/1900771X.v21.n2.2021.14268

Eder, M., Barbeito, O., Ambrosino, S., Hillman, G., Moya, G., & Rodríguez, A. (2017). *Análisis y modelo hidráulico (2D) de flujos hiperconcetrados en Piedemonde Occidental de la sierra de Ambato, Catamarca, Argentina*.

Escobar Soto, P., & Poma Yaranga, V. (2018). *Análisis de amenaza por el transporte de detritos aplicada a la quebrada de Tantará, provincia de Castrovirreyna de la Región de Huancavelica* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2185

Fallas Salazar, S. J. (2020). *Modelación y mapeo de flujo de lodos y detritos en la cuenca del río Zapote* [Proyecto de graduación (licenciatura en ingeniería agrícola y de biosistemas, Universidad de Costa Rica]. https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/items/841e08c0-235f-4e26-a6f8-195d05118a65

Fuentes Romero, K. F. (2016). *Distribución de las precipitaciones máximas diarias en la Región de los Ríos* [Tesis de Pregrado, Universidad del Bio-Bio]. http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2192/1/Fuentes_Romero_Karol_Fernanda.pdf

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (M. I. Rocha Martínez, Ed.; Sexta). McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V. https://www.yumpu.com/es/document/read/61872748/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicioncompressed

Hsu, S. M., Chiou, L. B., Lin, G. F., Chao, C. H., Wen, H. Y., & Ku, C. Y. (2010). Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: A case study in Hualien County, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *10*(3), 535-545. https://doi.org/10.5194/nhess-10-535-2010

Huaman Martinez, P. J., & Tito Ramos, N. M. (2020). *Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando FLO-2D, de la subcuenca de río Sicra, Lircay—Huancavelica* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3339

Hurtado de Barrera, J. (2010). *Metodología de la investigación: Guía para la comprensión holística de la ciencia* (Ciea-Sypal, Ed.; Cuarta). Centro Internacional de Estudios Avanzados Sypal y Ediciones Quirón S.A. https://dariososafoula.files.wordpress.com/2017/01/hurtado-de-barrera-

metodologicc81a-de-la-investigaciocc81n-guicc81a-para-la-comprensiocc81n-holicc81stica-de-la-ciencia.pdf

Iruri Guzman, O. V., & Jiménez Garcia, L. F. (2021). *Delimitación de áreas críticas mediante el modelamiento de flujo de lodos con el software flo 2D en la quebrada malanche, distrito de Punta Hermosa, Lima-Perú* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. http://hdl.handle.net/10757/656076

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulus, J. L. H. (1977). *Hidrología para ingenieros* (Segunda). McGraw-Hill Latinoamericana, S.A. https://www.academia.edu/37765494/Hidrolog%C3%ADa_para_Ingenieros_LINSLEY_KOHLER_y_PAULHUS

López Gutiérrez, D. A. (2016). *Estudio Morfométrico y cálculo de caudal de creciente en la hacienda pozo rubio por método racional entre Caño Venado y Caño El Pescado* (p. 59) [Monografía]. Universidad distrital Francisco José de Caldas. https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4126/Proyecto%20C;jsessionid=E34079D0FEA006B6F343207C7EDC05F8?sequence=1

López Maza, B. E., & Álvarez Borja, G. E. (2021). *Diseño hidráulico de las obras de control de torrentes y retención de sedimentos en la Quebrada Rinconada, Distrito Salaverry—Trujillo* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Privada Antenor Orrego]. https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7842

Manual de ensayo de materiales. (2016). https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual%20Ensayo%20de%20Materiales.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (p. 222) [Manual]. http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf

Ordoñez Castro de Gabrielli, J. R., & Ruiz Zelada, A. B. (2019). *Propuesta de un modelo numérico y alternativas para el control del flujo de detritos quebrada Tingo—Pataz—Perú* [Tesis pregrado para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Ricardo Palma]. https://hdl.handle.net/20.500.14138/2717

Ordóñez Gálvez, J. J. (2019). *Movimiento en masa por lluvias intensas en el Perú*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI, Dirección de Hidrología - DHI. http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/291

Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos Epistémicos de la Investigación Cualitativa y Cuantitativa: Consensos y Disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria [Digital Journal of University Teaching Research]*, *13*(1), Article 1. https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644

Suárez Pérez, S. (2004). *Resolución 865 de 2004 (Julio 22)—Diario Oficial 45630 del 4 de agosto de 2004. Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones* (Resolución 865; p. 32). https://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Resolucion865_20040722.htm

Tupac Yupanqui, J. (Director). (2018). *Prueba de Hipótesis de Correlación* [Video recording]. Universidad Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/5749

Uparela Olivera, J. E., & García López, M. (2018). Metodología para la evaluación del riesgo por flujos de lodos y avalanchas en Colombia. *Revista de la Escuela Colombiana*

de Ingeniería, *111*, 65-76. https://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci/article/view/52/54

Valderrama Murillo, P. A., Villacorta Chambi, S. P., Madueño, M., & Chumbe, R. (2012). Origen y dinámica de los flujos de detritos del cerro Chuyllurpata y su implicancia en la seguridad física de la ciudad de Abancay-Apurímac. *Repositorio Institucional INGEMMET*, 5. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/3252

Vara-Horna, A. A. (2012). *Desde la idea hasta la sustentación: 7 pasos para una tesis exitosa* (Tercera). Instituto de Investigación de la Facultad de Ciencias Administrativas y Recursos Humanos. Universidad de San Martín de Porres. https://www.administracion.usmp.edu.pe/investigacion/files/7-PASOS-PARA-UNA-TESIS-EXITOSA-Desde-la-idea-inicial-hasta-la-sustentaci%C3%B3n.pdf

Vergara Dal Pont, I. P. (2020). *Caracterización de las amenazas geo-climáticas en los andes centrales y semi-áridos de Chile y Argentina (30-33 ^{o}S)* [Tests para la obtención del grado de Doctor, Universidad Nacional de Río Negro]. http://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/4386

Villacorta Chambi, S. P., Peña Laureano, F., Jaimes Salcedo, F., Sosa Senticala, N. L., Condori Quispe, E., Pari Pinto, W., Luza Huillca, C. A., & Rodriguez Morata, C. (2019). Evaluación integral de la cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico—[Boletín C 71]. *Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico – INGEMMET*, 178. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2409

Villacorta Chambi, S. P., Rodriguez Morata, C., Peña Laureano, F., Jaimes Salcedo, F., & Luza Huillca, C. A. (2016). Caracterización geodinámica y dendrocronología como base para la evaluación de procesos geohidrológicos en la cuenca del río Mariño, Abancay (Perú). *Serie Correlación Geológica-Instituto Geológico, Minero y*

Metalúrgico – INGEMMET, *32*(1-2), 25-42. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/2310

Villasante Escalante, A. B. (2022). *Evaluación de los niveles de riesgos por flujo de detritos en la quebrada Chinchiña localidad Pacsica, distrito Justo Apu Sahuaraura, Aymaraes, Apurímac 2021* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/476

Villón Bejar, M. (s. f.). *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Hidrográficas*. Centro Agronomo Tropical de Investigacion y Enseñanza. Recuperado 26 de marzo de 2024, de https://ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/items/show/22

Villón Béjar, M. (2005). *HIDROESTA 2* (Versión 2) [MaxSoft]. Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica. https://mega.nz/#!98lFHLTK!kycxIoh9jbXHzh3VKls4YeMzlOl_ABgAzO89B3ekYMU

Vivas, M. I. (2015). *Aplicación del modelo FLO-2D para evaluar medidas de mitigación ante la ocurrencia de huaicos*. https://institutodelperu.pe/wp-content/uploads/2015/11/Maria-Isabel.pdf

Yucra Inca, F. J. (2023). *Evaluación de riesgo por flujo de detritos y modelamiento hidrológico de la quebrada Sahuanay en el distrito de Tamburco, Abancay, 2022* [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/531

Zhang, K., Wang, S., Bao, H., & Zhao, X. (2019). Characteristics and influencing factors of rainfall-induced landslide and debris flow hazards in Shaanxi Province, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *19*(1), 93-105. https://doi.org/10.5194/nhess-19-93-2019

Zhang, K., Xue, X., Hong, Y., Gourley, J. J., Lu, N., Wan, Z., Hong, Z., & Wooten, R. (2016). iCRESTRIGRS: A coupled modeling system for cascading flood–landslide disaster

forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, *20*(12), 5035-5048. https://doi.org/10.5194/hess-20-5035-2016

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina del repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes.