

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCAVELICA**

(Creada por Ley N° 25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL – HUANCAVELICA



TESIS

**“MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS
APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RIO SICRA,
LIRCAY – HUANCAVELICA”**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA SANEAMIENTO Y MEDIO AMBIENTE

PRESENTADO POR:

Bach. Huaman Martinez, Pool Jonhni

Bach. Tito Ramos, Nils Meyer

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

HUANCAVELICA, PERÚ

2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE TESIS

En la ciudad de Huancavelica, a los un día (01) del mes de diciembre del año 2020, siendo las diecisiete horas con treinta minutos (17:30), se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los docentes: **Ing. Carlos GASPAR PACO (PRESIDENTE), M.Sc. Marco Antonio LÓPEZ BARRANTES (SECRETARIO), Mg. Jorge Luis ORTEGA VARGAS (VOCAL)**, designados con Resolución de Decano N° 197-2019-FCI-UNH, de fecha 30 de octubre del 2019, a fin de proceder con la sustentación y calificación virtual mediante el aplicativo MEET del informe final de tesis titulado: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO-2D, DE LA SUBCUENCA DEL RIO SICRA, LIRCAY-HUANCAMELICA", presentado por los Bachilleres **TITO RAMOS, Nils Meyer y HUAMAN MARTINEZ, Pool Jonhni**, para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**. Finalizada la sustentación virtual a horas 18:45 P.M., se comunicó a los sustentantes y al público que los Miembros del Jurado que abandonaran el aula virtual para deliberación por parte de los Jurados, se llegando al siguiente resultado:

TITO RAMOS, Nils Meyer

APROBADO POR MAYORIA

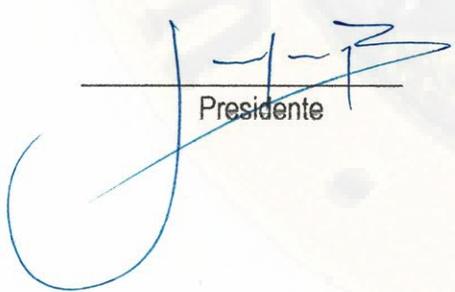
DESAPROBADO

HUAMAN MARTINEZ, Pool Jonhni

APROBADO POR MAYORIA

DESAPROBADO

En señal de conformidad, firmamos a continuación:



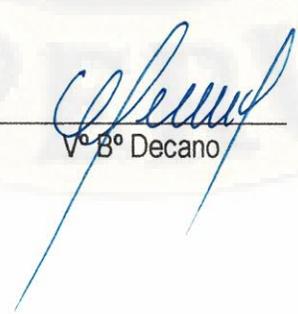
Presidente



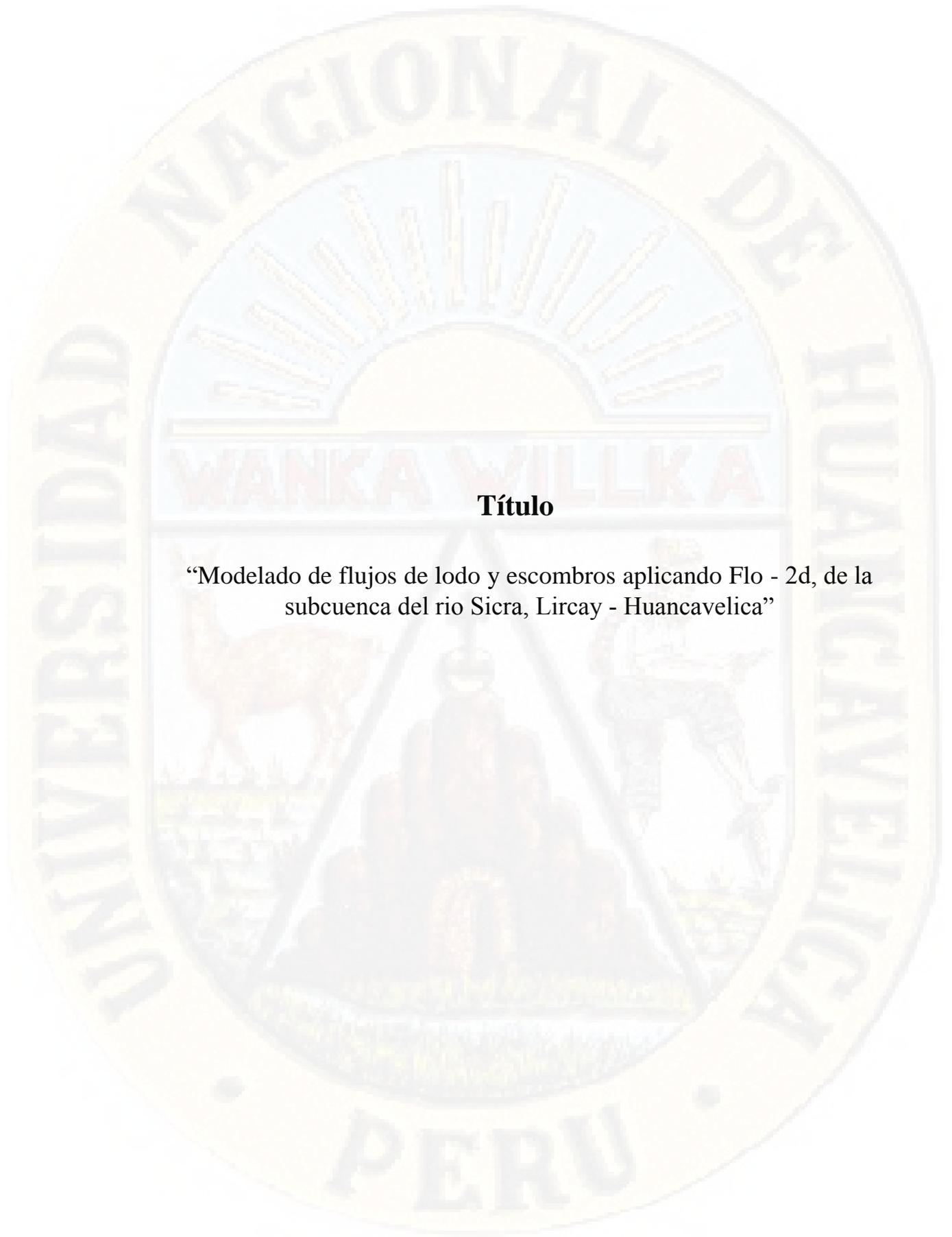
Secretario



Vocal

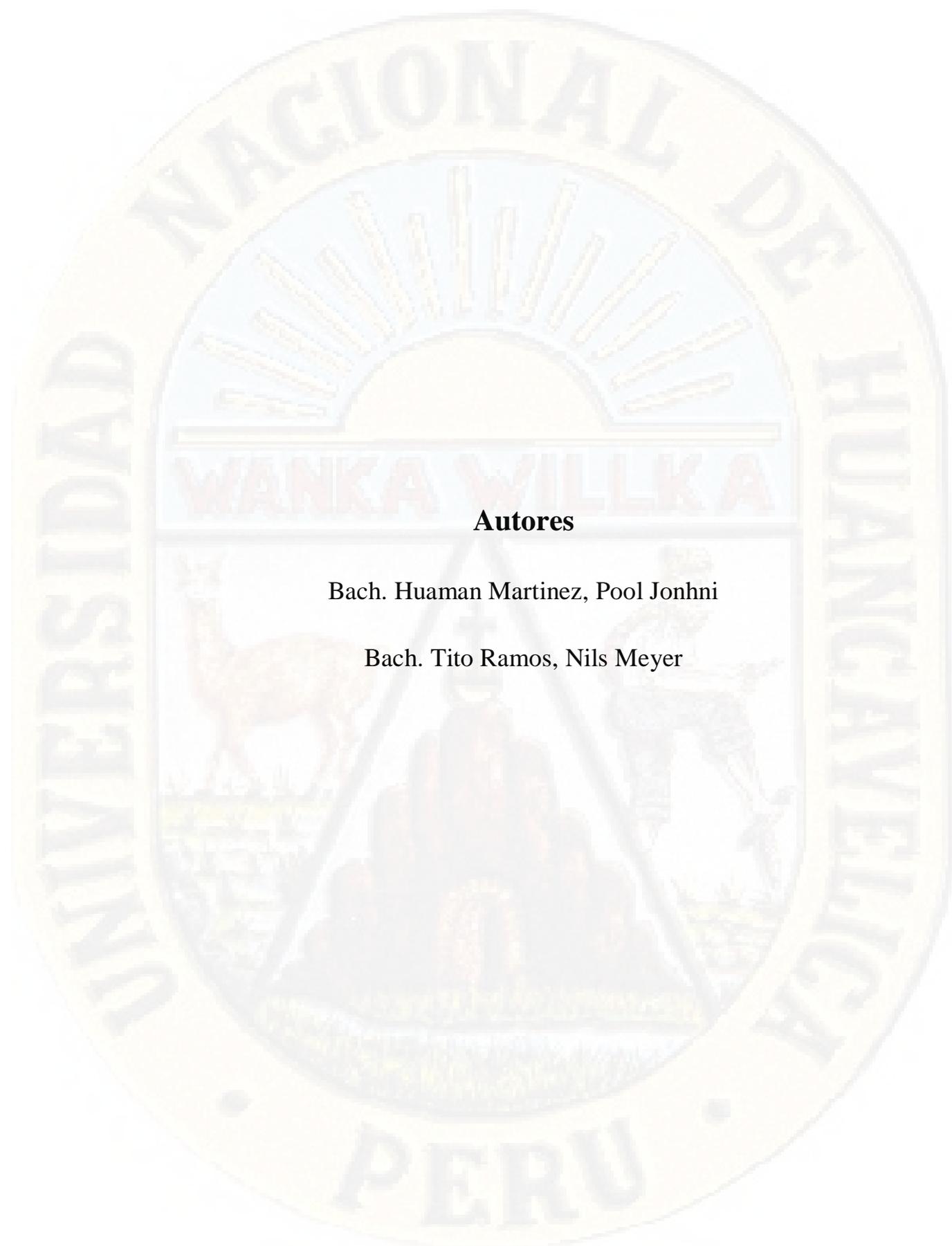


Vº Bº Decano



Título

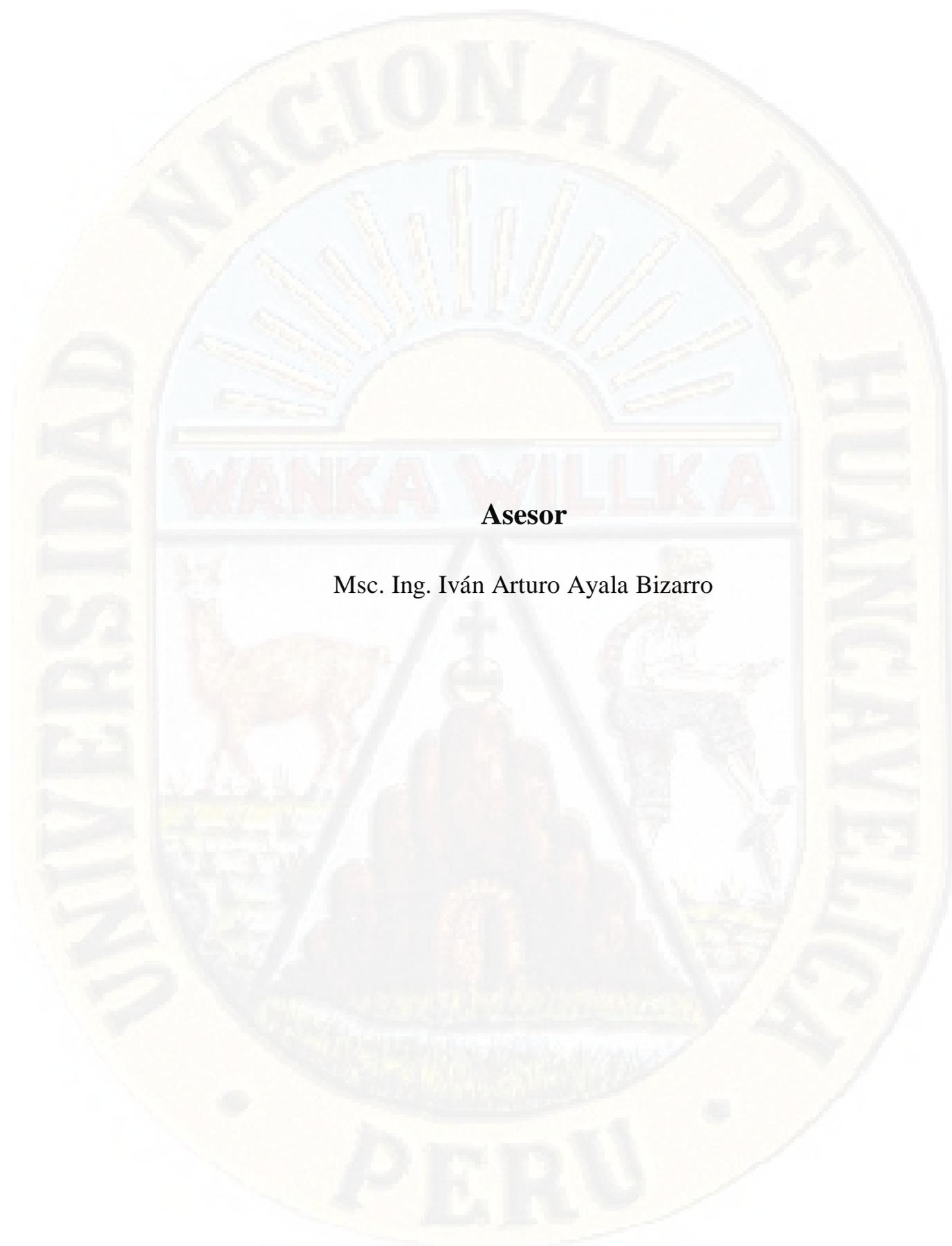
“Modelado de flujos de lodo y escombros aplicando Flo - 2d, de la subcuenca del rio Sicra, Lircay - Huancavelica”



Autores

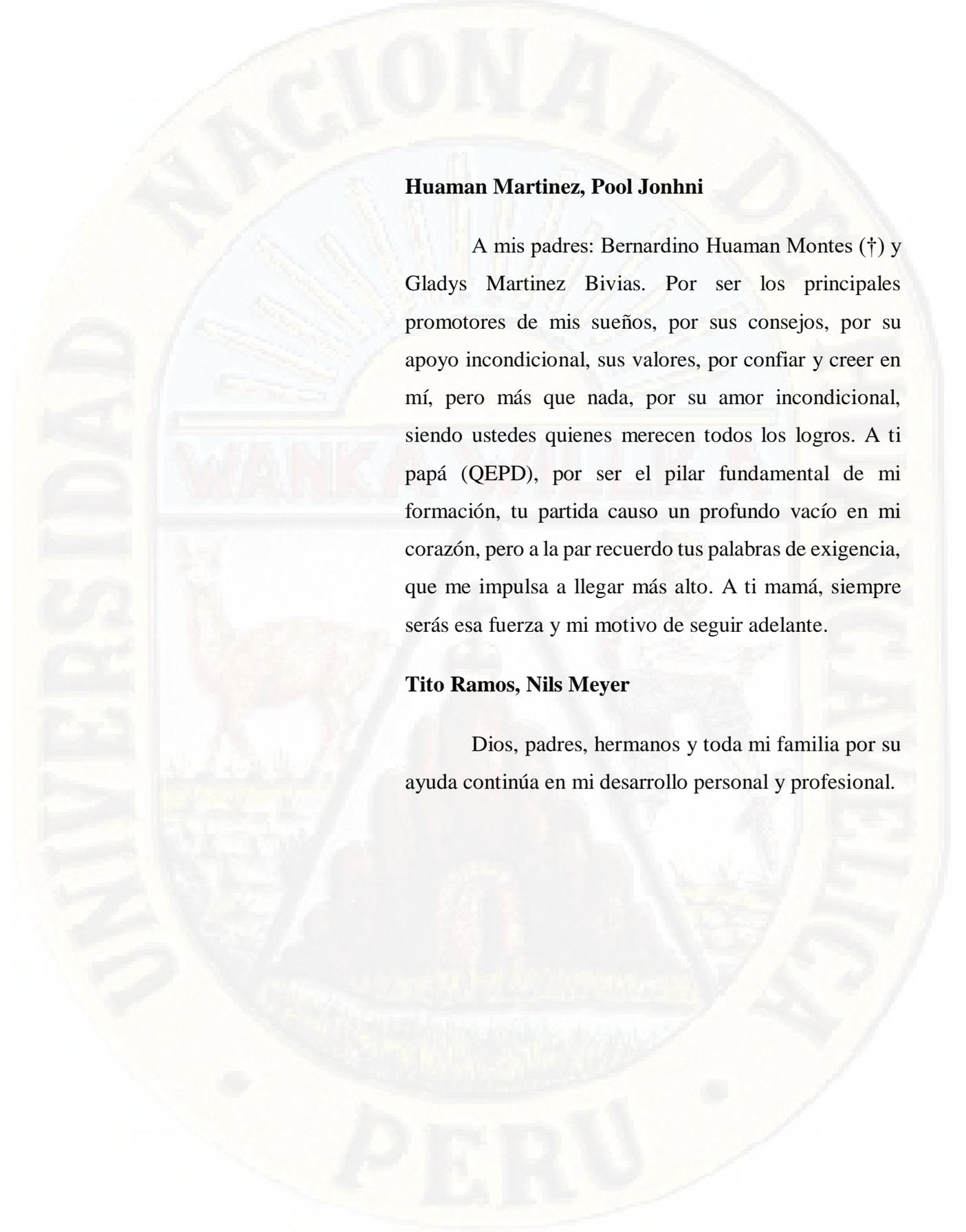
Bach. Huaman Martinez, Pool Jonhni

Bach. Tito Ramos, Nils Meyer



Asesor

Msc. Ing. Iván Arturo Ayala Bizarro



Huaman Martinez, Pool Jonhni

A mis padres: Bernardino Huaman Montes (†) y Gladys Martinez Bivias. Por ser los principales promotores de mis sueños, por sus consejos, por su apoyo incondicional, sus valores, por confiar y creer en mí, pero más que nada, por su amor incondicional, siendo ustedes quienes merecen todos los logros. A ti papá (QEPD), por ser el pilar fundamental de mi formación, tu partida causo un profundo vacío en mi corazón, pero a la par recuerdo tus palabras de exigencia, que me impulsa a llegar más alto. A ti mamá, siempre serás esa fuerza y mi motivo de seguir adelante.

Tito Ramos, Nils Meyer

Dios, padres, hermanos y toda mi familia por su ayuda continúa en mi desarrollo personal y profesional.

Agradecimiento

Mis más sinceros agradecimientos a Jim O'Brien, presidente de Flo - 2D software S.A y creador del modelo, quien mediante nos otorgó de manera amable la licencia en versión pro del software Flo - 2D sin costo alguno para su uso en la presente investigación.

Al Msc. Ing. Leonardo Franco Castillo Navarro; por las excelentes clases magistrales dictadas y sobre todo por el apoyo desinteresado en resolver ciertas dudas que existían para la presente investigación sobre el uso de software Flo - 2D.

Al Msc. Ing. Iván Arturo Ayala Bizarro, asesor de la presente tesis; por el apoyo y orientación en la elaboración de la misma, por habernos brindado la oportunidad de compartir sus conocimientos de investigación; por tener una visión del potencial humano de la tesis de pre grado que va más allá de la formación básica recibida; por habernos demostrado a lo largo de estos años paciencia, comprensión y ayuda incondicional.

Por último y no menos importante un agradecimiento especial al Ing. Anderson Lincol Condori Soto y al Ing. Percy Escobar Soto; quienes de manera amable no dudaron en compartir sus conocimientos, detallarnos información relevante para así finalmente lograr culminar el presente trabajo de investigación.

Los autores

Tabla de contenido

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Título	iii
Autores	iv
Asesor	v
Agradecimiento	vii
Tabla de contenido	viii
Tabla de contenido de cuadros	xii
Tabla de contenido de figuras	xv
Resumen	xx
Abstract	xxi
Introducción	xxii
CAPÍTULO I	24
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.1. Descripción del problema	24
1.2. Formulación del problema	26
1.2.1. Problema general	26
1.2.2. Problemas específicos	26
1.3. Objetivos	26
1.3.1. Objetivo general	26
1.3.2. Objetivos específicos	27
1.4. Justificación	27
1.4.1. Justificación teórica	27
1.4.2. Justificación metodológica	27

1.4.3.	Justificación social.....	28
1.5.	Limitaciones	28
CAPÍTULO II.....		29
MARCO TEÓRICO		29
2.1. Antecedentes		29
2.1.1.	A nivel internacional.....	29
2.1.2.	A nivel nacional.....	31
2.2. Bases teóricas		34
2.2.1.	Cuencas hidrográficas.....	34
2.2.2.	Precipitación.....	53
2.2.3.	Hidráulica de flujos de escombros.....	76
2.2.4.	Modelo numérico bidimensional Flo - 2D.....	98
2.2.4.1.	Ecuaciones de gobierno.....	99
2.2.4.2.	Modelo reológico de O'Brien y Julien.....	100
2.2.4.3.	Concentración volumétrica de sedimentos.....	110
2.2.4.4.	Lógica del Flo - 2D.....	114
2.2.4.4.1.	Atributos del modelo Flo - 2D	114
2.2.4.4.2.	Algoritmo del Flo - 2D	116
2.2.4.5.	Mapa amenaza o peligro.....	120
2.3. Bases conceptuales		124
2.3.1.	Subcuenca	124
2.4. Definición de términos		126
2.5. Hipótesis.....		129
2.6. Variables		129
2.6.1.	Variable 01	129

2.6.2. Variable 02	129
2.7. Operacionalización de variables.....	130
CAPÍTULO III	131
MATERIALES Y MÉTODOS	131
3.1. Ámbito temporal y espacial	131
3.2. Tipo investigación	132
3.3. Nivel de investigación	132
3.4. Población, muestra y muestreo.....	132
3.4.1. Población.....	132
3.4.2. Muestra	132
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	133
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	134
CAPÍTULO IV.....	135
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	135
4.1. Análisis de información	135
4.1.1. Análisis geomorfológico	135
4.1.2. Análisis hidrológico	139
4.1.3. Análisis geodinámico.....	157
4.1.4. Pre - procesamiento de flujos de lodo y escombros con el modelo numérico Flo - 2D.....	174
4.2. Discusión de resultados.....	184
4.2.1. Simulación del Flo - 2D en la Subcuenca del río Sicra	184
4.2.2. Validación del Flo - 2D.....	190
4.2.3. Discusión de resultados.....	196
CONCLUSIONES	199
RECOMENDACIONES.....	200

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	201
APÉNDICE	207
ANEXO A – HIDROLOGÍA	208
A.1 Curvas IDF de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra.....	208
A.2 Hietogramas de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra	213
A.3 Hidrograma líquido con el modelo hidrológico HEC-HMS en la subcuenca del río Sicra	222
A.4 Sección transversal del cauce del río Sicra para calibración del modelo hidrológico HEC-HMS en la subcuenca del río Sicra	229
ANEXO B – EMS.....	230
B.1 Estudio de mecánica de suelos realizado en el laboratorio de la Universidad Nacional de Huancavelica.....	230
ANEXO C – Flo - 2D.....	231
C.1 Simulación de flujos de lodo y escombros para un Tr = 50 años	231
C.2 Simulación de flujos de lodo y escombros para un Tr = 100 años	234
C.3 Planos generados en entorno GIS, con los datos obtenidos del modelo Flo - 2D y el post procesador MAPPER PRO.....	237
ANEXO D – PANEL FOTOGRAFICO	263
D.1 Panel fotográfico	263
ANEXO E – MATRIZ DE CONSISTENCIA	267

Tabla de contenido de cuadros

Tabla 1. Clasificación de pendiente en las cuencas	45
Tabla 2. Versiones del producto PISCO	62
Tabla 3. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del (NRCS, 1922)	70
Tabla 4. Grupo de suelo hidrológico, para el cálculo del CN	71
Tabla 5. Clasificación de flujos de escombros (Costa, 1998)	82
Tabla 6. Tipos de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal – cauce	85
Tabla 7. Clasificación del tamaño de los granos	86
Tabla 8. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (Limo y Arcilla)	106
Tabla 9. Esfuerzo de cedencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos	108
Tabla 10. Parámetros de resistencia del flujo laminar (Manual Flo - 2D).....	110
Tabla 11. Comportamiento de flujos de sedimentos en función de la concentración de sedimentos	111
Tabla 12. Definición de nivel de amenaza según García, Rodríguez y O’Brien.....	121
Tabla 13. Definición de la intensidad de inundación de agua (<i>Water flood</i>).....	123
Tabla 14. Definición de la intensidad de inundación de flujos de lodo y escombros (<i>Mud and debris flow</i>).....	123
Tabla 15: Operacionalización de variables	130
Tabla 16. Cuadro resumen de las características morfológicas de la subcuenca Sicra	138
Tabla 17. Cuadro resumen de las características morfológicas de la subcuenca Sicra	138
Tabla 18. Resumen de áreas y perímetros de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra	141
Tabla 19. Ubicación de las estaciones climáticas virtuales empleadas en este estudio	143

Tabla 20. Prueba de ajuste de bondad para datos de precipitación de cada microcuena de la subcuena del río Sicra	143
Tabla 21. Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno de cada microcuena de la subcuena del río Sicra.....	144
Tabla 22. Ubicación de la estación meteorológica convencional de Lircay – Angaraes	145
Tabla 23. Valores referenciales y tipos de ajuste	146
Tabla 24. Tiempo de concentración para cada microcuena de la subcuena del río Sicra	148
Tabla 25. Cálculo del tiempo de retardo para cada microcuena de la subcuena del río Sicra	148
Tabla 26. Valores de grupos hidrológicos del suelo	149
Tabla 27. Uso actual de los suelos para cada microcuena de la subcuena del río Sicra	153
Tabla 28. Valores del hidrograma líquido en el punto de afluencia	155
Tabla 29. Parámetros del método onda cinemática del cauce del río Sicra	155
Tabla 30. Calibración del coeficiente de Manning	157
Tabla 31. Zonas vulnerables a deslizamiento	165
Tabla 32. Grado de susceptibilidad del suelo según Instituto Geológico y Metalúrgico	172
Tabla 33. Resultados del análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422) ...	178
Tabla 34. Selección de matriz de flujos de lodo (limo y arcilla), de propiedades similares	179
Tabla 35. Resultados de los parámetros reológicos de esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica.....	180
Tabla 36. Valores de cobertura de usos de suelos representativos en cauce y zonas urbanas	181
Tabla 37. Resultados del número de Manning (n).....	181
Tabla 38. Salidas del programa Flo - 2D (Q = 225.00 m ³ /s - Tr = 50 años)	185
Tabla 39. Salidas del programa Flo - 2D (Q = 349.30 m ³ /s - Tr = 100 años)	186

Tabla 40. Resultado de volumen de sedimento depositado en el cauce del río Sicra
estimados de campo196



Tabla de contenido de figuras

Figura 1. Vista satelital de la subcuenca del río Sicra Lircay, Huancavelica	25
Figura 2. Representación de algunas de las propiedades principales de una cuenca	35
Figura 3. Cuencas endorreicas.....	36
Figura 4. Cuencas exorreicas.....	36
Figura 5. Cuencas arreicas	37
Figura 6. Partes de una cuenca	38
Figura 7. Cuenca hidrográfica de corriente orden 4	39
Figura 8. Influencia de la forma de la cuenca en el hidrograma	41
Figura 9. Longitud y perímetro de una cuenca.....	42
Figura 10. Curva hipsométrica de una cuenca	46
Figura 11. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión.....	47
Figura 12. Curva hipsométrica y curva de frecuencia	48
Figura 13. Perfil longitudinal de un cauce	52
Figura 14. Red de estaciones utilizadas a escala nacional para la elaboración de PISCOp con porcentaje de datos por estación considerando el período 1981-2016..	57
Figura 15. A la izquierda climatología de precipitación (1998-2014) generado a partir de datos TRMM2A25 y a la derecha <i>CHP_{clim}</i> nótese los excesivos valores en la costa sur del país.....	59
Figura 16. Coeficiente de correlación (CC), BIAS en porcentaje y RMSE obtenido en la validación independiente. Puntos rosados son las estaciones utilizadas para generar PISCOp	61
Figura 17. Línea del tiempo del producto PISCOp	63
Figura 18. Monitoreo de sequías	64
Figura 19. Hidroclimatología (perdidas de suelo por erosión hídrica - RUSLE).....	64
Figura 20. Sistema de observación de inundaciones del Senamhi (SONICS)	65
Figura 21. Monitoreo decadiario de precipitaciones del Senamhi (MIDAS)	65
Figura 22. Precipitación media diaria por cuenca para modelado hidrológico	66

Figura 23. Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS	68
Figura 24. Solución gráfica de las ecuaciones de escorrentía del SCS.....	69
Figura 25. Hidrograma unitario, principio de proporcionalidad	73
Figura 26. Hidrograma unitario, principio de superposición	75
Figura 27. Diferentes regiones dentro de un flujo de escombros	76
Figura 28. Típica relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación por corte	79
Figura 29. Clasificación de los deslizamientos y flujos, de acuerdo a la velocidad y concentración de sedimentos.....	81
Figura 30. Clasificación de flujos de escombros (Coussot, 1997)	83
Figura 31. Clasificación de flujos de escombros (Suarez, 2001)	84
Figura 32. Movimiento idealizado de un flujo viscos (Johnson y Rodine, 1984).....	88
Figura 33. Angulo de inclinación	89
Figura 34. Metodología propuesta por O'Brien (2000) para el cálculo del hidrograma de los flujos de lodo y escombros.....	93
Figura 35. Esfuerzo cortante en función de la tasa de corte o gradiente de velocidad	103
Figura 36. Viscosidad dinámica de muestras de flujo de lodos vs concentración de sedimentos.....	107
Figura 37. Esfuerzo de cedencia de muestras de flujo de lodos vs concentración de sedimentos.....	107
Figura 38. Procesos físicos simulados por el modelo Flo - 2D.....	115
Figura 39. Elementos de una celda	116
Figura 40. Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta	117
Figura 41. Niveles de peligro de inundación basados en l frecuencia e intensidad de inundación	121
Figura 42. Intensidades de inundación de flujos de lodo y escombros (<i>mud and debris flow</i>) basadas en profundidades $h(m)$ y velocidades de flujo vm/s	122
Figura 43. Vista satelital de distrito de Lircay, capital de la provincia de Angaraes	131

Figura 44. Vista satelital del cauce del río Sicra – Prog. 0+565 km al 1+744 km ..	132
Figura 45. Delimitación de la subcuenca del río Sicra	136
Figura 46. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes - subcuenca del río Sicra, (cuenca en fase de juventud)	139
Figura 47. Delimitación de 09 microcuencas más representativas de la subcuenca del río Sicra	140
Figura 48. Estaciones climáticas virtuales ubicadas en los centroides de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra	142
Figura 49. Validación por diferentes medidas bondad de ajuste del producto Pisco con los datos registrados en la estación meteorológica Lircay – 000627.....	145
Figura 50. Mapa temático número de curva (CN) en condiciones normales	151
Figura 51. Mapa temático de número de curva para la subcuenca del río Sicra	152
Figura 52. Modelo de la subcuenca del río Sicra	154
Figura 53. Hidrograma líquido para la subcuenca del río Sicra (Tr=50 años y Tr=100 años)	156
Figura 54. Hidrograma líquido calibrado para la subcuenca del río Sicra (Tr=50 años y Tr=100 años)	157
Figura 55. Colapso de un hotel en Lircay ocurrido el 26 de enero de 2017	159
Figura 56. Vista de zonas expuesta a inundación por las aguas del río Sicra	159
Figura 57. Vista de zonas expuesta a inundación por las aguas del río Sicra	160
Figura 58. Vista de la zona de la piscigranja de la ciudad de Lircay, en pleno evento de inundación ocurrido el 25 de enero 2017, por el desborde de las aguas del río Sicra	161
Figura 59. Área de inundación margen derecha e izquierda río Sicra, zona urbano marginal ciudad de Lircay, altura puente carrozable Santa Rosa aguas arriba	161
Figura 60. Vista del puente Santa Rosa, en momentos del incremento del caudal de las aguas del río Sicra, en proceso de erosión de las bases y estribos	162
Figura 61. Erosión de talud y pérdida parcial de plataforma, altura puente Chahuarma del río Sicra	163
Figura 62. Erosión y pérdida de talud de terrenos forestales y pastizales lado izquierdo del cauce y trayectoria del río Sicra.....	163

Figura 63. Vista de punto activo a deslizamientos N° 01 (D1) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	165
Figura 64. Vista de punto activo a deslizamientos N° 02 (D2) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	166
Figura 65. Vista de punto activo a deslizamientos N° 03 (D3) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	166
Figura 66. Vista de punto activo a deslizamientos N° 04 (D4) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	167
Figura 67. Vista de punto activo a deslizamientos N° 05 (D5) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	168
Figura 68. Vista de punto activo a deslizamientos N° 06 (D6) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho.....	168
Figura 69. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la provincia de Angaraes.....	169
Figura 70. Mapa de suelos con recurrencia de eventos de caídas, deslizamientos y flujos de masas, en la provincia de Angaraes, Lircay.....	170
Figura 71. Mapa de peligro por movimientos en masa para el verano 2020	170
Figura 72. Mapa de peligro por inundaciones para el verano 2020.....	171
Figura 73: Diagrama de ingreso y salida de datos para el modelamiento numérico computacional con el programa Flo - 2D.....	174
Figura 74. Modelo digital de elevaciones de la subcuenca del río Sicra, del distrito de Lircay - Angaraes	175
Figura 75. Grillado del modelo digital de elevaciones del distrito de Lircay, de 5mx5m	176
Figura 76. Hidrograma de caudal líquido y concentración de sólidos para Tr=50 años	177
Figura 77. Hidrograma de caudal líquido y concentración de sólidos para Tr=100 años	177
Figura 78. Ventana de Flo - 2D, simulación del flujo y desarrolla del hidrograma en el tiempo.....	185
Figura 79. Identificación de puntos de control en zonas críticos de suelos inestables con alta presencia de grava suelto	191

Figura 80. Medición en campo el ancho de deslizamiento ocurrido, depositado en el cauce del río Sicra.....	192
Figura 81. Identificación de puntos de control en zonas críticos caída de rocas hacia el cauce del río Sicra	192
Figura 82. Identificación de puntos de control, Caída de rocas mayores 2.00 metros de longitud, al cauce del río Sicra.....	193
Figura 83. Identificación de puntos de control en zonas críticos y con mayor vulnerabilidad a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombros hacia el cauce principal del río Sicra	194
Figura 84. Estimación de volumen de sedimentos propensos a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombros.....	194
Figura 85. Estimación de volumen de sedimentos propensos a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombros.....	195

Resumen

El propósito de la presente investigación es brindar criterios de modelación de los flujos de lodo y escombros utilizando el modelo numérico Flo - 2D. Este modelo simula flujo de fluidos no newtonianos, como aludes torrenciales, en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación, puede modelarse flujo de agua y flujos hiperconcentrados (flujos de lodo y escombros).

La subcuenca simulada en la presente tesis fue la subcuenca del río Sicra del distrito de Lircay. De fuerte pendiente en ambos lados del cauce principal, bastante acumulación de material en su cauce y con gran incremento de caudal debido a la escorrentía que permite que se originen deslizamientos y derrumbes. En general los taludes del cauce son bastantes inestables. La problemática es que, al producirse un huayco, el material que se arrastra cae directamente sobre el río produciendo su represamiento y consecuente desborde de flujos de lodo y escombros sobre el área urbana de la ciudad de Lircay.

La subcuenca del río Sicra ha sido clasificada por CENEPRED, como una subcuenca en "Peligro". Los eventos ocasionados nos recuerdan los sucesos de 2017 y 2019 como el huayco de Challhuapuquio cercana a dicha subcuenca que arrasó completamente Instituciones educativas y viviendas aledañas.

Con el presente trabajo se hace un aporte en el estudio de los flujos de lodo y escombros en nuestra región, iniciando una línea de investigación muy importante en lo que se refiere a mitigación de desastres. A la vez, promocionar el uso de esta herramienta para definir mapas de peligro de flujos hiperconcentrados; que facilita la tarea de crear un ambiente de conciencia frente a los fenómenos naturales e informar de manera fácil y técnica a la población.

Palabras Clave: Flujos de lodo y escombros, modelo Flo - 2D, mapas de peligro.

Abstract

The purpose of this research is to provide criteria for modeling mud and debris flows using the Flo - 2D numerical model. This model simulates flow of non newtonian fluids, such as torrential avalanches, in complex topographies, such as urbanized areas and floodplains, water flow and hyperconcentrated flows (mud flow and debris) can be modeled.

The sub-basin simulated in this thesis was the sub-basin of the Sicra river of the district of Lircay. With a steep slope on both sides of the main channel, a lot of material accumulation in its channel and with a large increase in flow due to runoff that allows landslides and landslides to originate. In general, the slopes of the channel are quite unstable. The problem is that, when a huayco occurs, the material that creeps falls directly on the river producing its damming and consequent overflow of mud and debris flows over the urban area of the city of Lircay.

The Sicra River sub basin has been classified by CENEPRED, as a sub-basin in "Danger". The events caused remind us of the events of 2017 and 2019 as the huayco of Challhuapuquio near said sub-basin that completely swept educational institutions and surrounding homes.

With this work, a contribution is made in the study of mud and debris flows in our region, initiating a very important line of research in terms of disaster mitigation. At the same time, promote the use of this tool to define hazard maps of hyperconcentrated flows; which facilitates the task of creating an environment of conscience in the face of natural phenomena and informing the population in an easy and technical way.

Key words: Mud and debris flows, model Flo - 2D, hazard maps.

Introducción

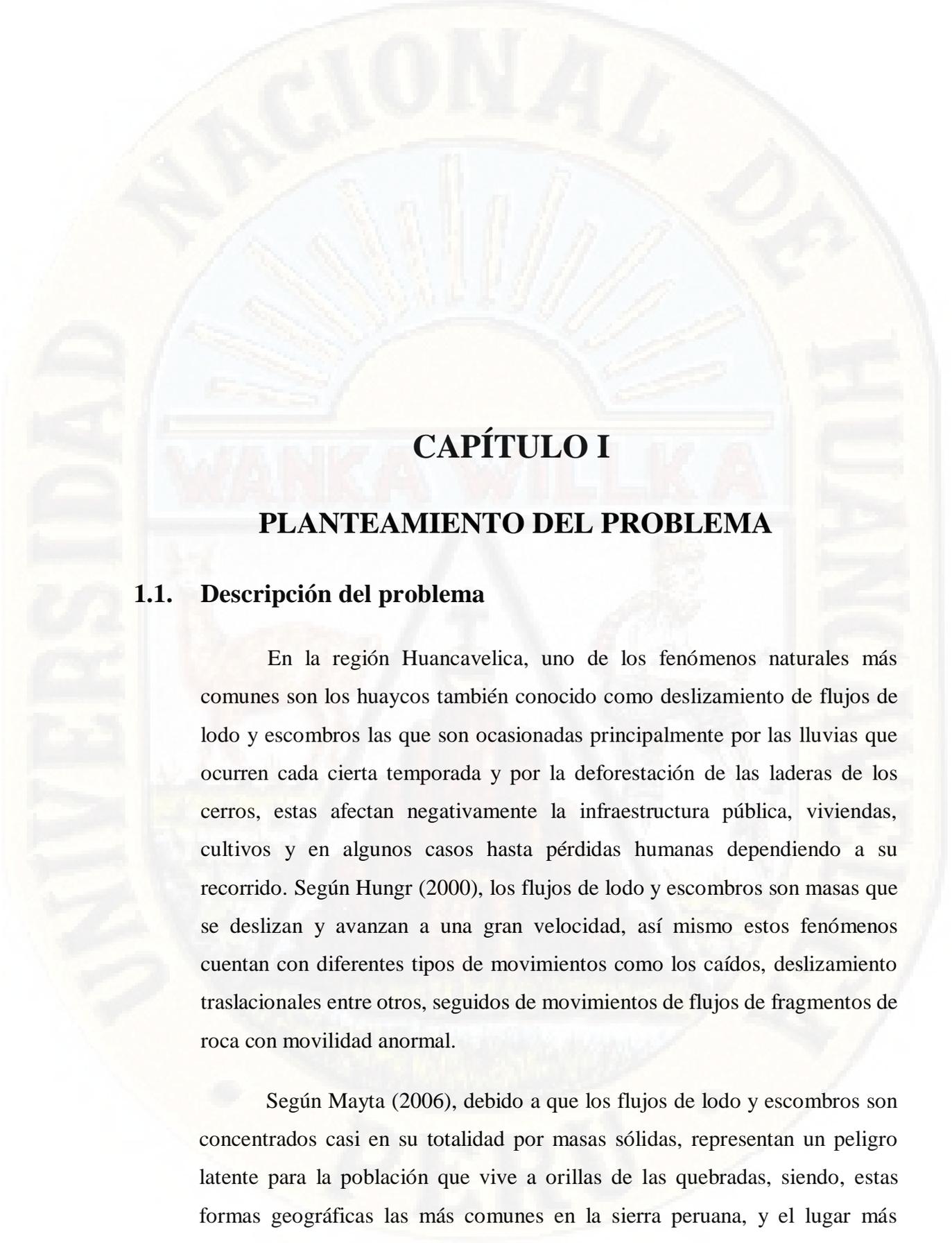
El Fenómeno del Niño (FEN) es uno de los grandes fenómenos naturales que azotan cada año a nuestro país, las temporadas de fuertes lluvias desencadenan inundaciones y huaycos. Esto ocurre esporádicamente y el resultado de su presencia son pérdidas de viviendas, obras civiles, zonas de cultivo y sobretodo pérdidas humanas.

La finalidad de esta investigación es elaborar un modelo que cuantifique flujos de lodo y escombros, el cual permita definir mapas de peligro causados por estos flujos en la zona urbana del distrito de Lircay, que se asemeje a la realidad física e hidrológica. Así mismo, una vez determinado la influencia de dichos parámetros y los daños originados por el transporte de estos flujos se podrá aplicar y prevenir en futuros estudios al transporte de sedimentos en diferentes tramos del cauce del río Sicra y de esta manera contribuir en el desarrollo de la ingeniería de infraestructura hidráulica, saneamiento y medio ambiente en nuestro país.

Para nuestro modelamiento aplicaremos el modelo numérico Flo - 2D Pro. Versión 2019, para la subcuenca del río Sicra, del distrito de Lircay, provincia de Angaraes, Huancavelica – Perú. Como antecedentes el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMET) a cargo del Departamento de Geología Ambiental obtuvo la licencia del modelo Flo - 2D versión 2003 como parte del proyecto: quebrada Paihua (Lima), así mismo en el año 2007, el Proyecto Especial Tambo – Ccaracocha (PETACC) obtuvo el modelo Flo - 2D versión 2006 en convenio con la Universidad de Miami. El modelo Flo - 2D es empleado en otros países del mundo, generando la aceptación de los investigadores. Además, el Flo - 2D es un modelo aceptado y reconocido por la FEMA (Federal Emergency Management Agency - USA).

La presentación de este trabajo de investigación se encuentra estructurada de la siguiente manera: CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, en el que se expone el planteamiento del problema, formulación del problema, objetivo: general y específico de la investigación, así como la justificación del problema. CAPITULO II: MARCO TEÓRICO, el cual aborda los antecedentes, las bases teóricas, la hipótesis,

definición de términos y definición operativa de variables e indicadores. CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS, se encuentra referido al ámbito de estudio, el tipo de investigación, el nivel de investigación, el método de investigación, del diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y el procedimiento de recolección de datos. CAPITULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS, se expone la presentación de resultados y la discusión.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

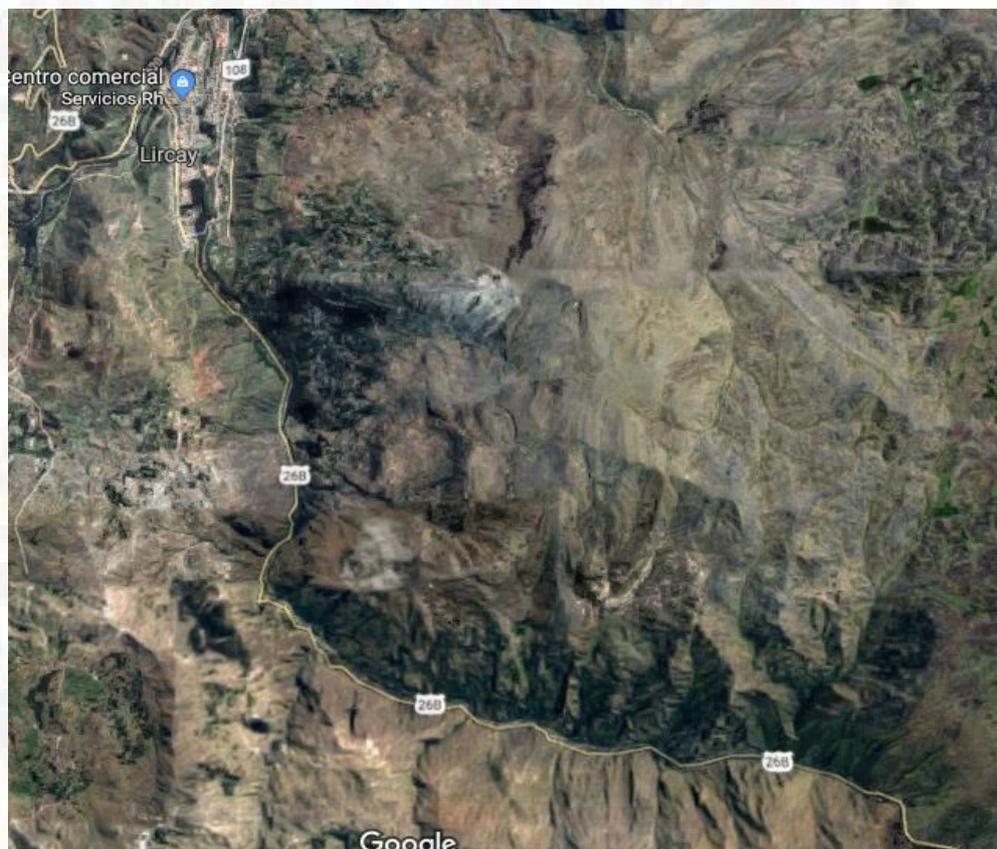
En la región Huancavelica, uno de los fenómenos naturales más comunes son los huaycos también conocido como deslizamiento de flujos de lodo y escombros las que son ocasionadas principalmente por las lluvias que ocurren cada cierta temporada y por la deforestación de las laderas de los cerros, estas afectan negativamente la infraestructura pública, viviendas, cultivos y en algunos casos hasta pérdidas humanas dependiendo a su recorrido. Según Hungr (2000), los flujos de lodo y escombros son masas que se deslizan y avanzan a una gran velocidad, así mismo estos fenómenos cuentan con diferentes tipos de movimientos como los caídos, deslizamiento traslacionales entre otros, seguidos de movimientos de flujos de fragmentos de roca con movilidad anormal.

Según Mayta (2006), debido a que los flujos de lodo y escombros son concentrados casi en su totalidad por masas sólidas, representan un peligro latente para la población que vive a orillas de las quebradas, siendo, estas formas geográficas las más comunes en la sierra peruana, y el lugar más frecuente por donde se deslizan los fluidos de rocas y lodo, además la zona baja

de toda quebrada es considerada el lugar donde el deslizamiento muestra su fuerza más destructiva enterrando todo a su paso. Por ende, es importante considerar la teoría de flujo de hiperconcentrados aplicando modelos numéricos como el Flo - 2D para, de esta manera mitigar los efectos de estos flujos.

Por tal motivo, en la presente investigación se realizó modelamiento de flujo de lodo y escombros usando el programa computacional Flo - 2D ubicada en la provincia de Lircay - Angaraes, departamento de Huancavelica.

Figura 1. Vista satelital de la subcuenca del río Sicra Lircay, Huancavelica



Fuente: Tomado de google maps, <https://www.google.com/maps/@-13.0158894,-74.7063275,8311m/data=!3m1!1e3> (Google Maps, 2018)

Por lo detallado anteriormente, se debe tener en cuenta la complejidad de la geografía de la sierra peruana, siendo esta un problema más a la labor de

los ingenieros civiles en el diseño de obras, como puentes, carreteras, represas, entre otras.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cuáles son las zonas de peligro por flujos de lodo y escombros generados por parámetros geomorfológicos, hidrológicos y geodinámicos en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Qué parámetros geomorfológicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?
- ¿Qué parámetros hidrológicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?
- ¿Qué parámetros geodinámicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Definir zonas de peligro por flujos de lodo y escombros generados por parámetros geomorfológicos, hidrológicos y geodinámicos en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros geomorfológicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.
- Identificar los parámetros hidrológicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.
- Analizar los parámetros geodinámicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación teórica

Es conveniente desarrollar la siguiente investigación porque se dispone de los conocimientos y la disponibilidad necesaria para ejecutarla, además del sustento teórico y práctico realizado por otros investigadores. Por otro lado, es conveniente realizar la tesis porque los tesisistas radican en la provincia de Lircay – Angaraes Huancavelica, donde se encuentra el río Sicra, en ese sentido se hace muy accesible.

1.4.2. Justificación metodológica

De la misma manera, el autor dispone de la metodología de investigación estudiada por Hernández, Fernández y Baptista (2014), en la cual se detalla en tipo de investigación, los métodos y el diseño a emplear, también se dispone del libro de Bernal (2010), titulado Metodología de la investigación. Ambos textos están disponibles en el internet y en la biblioteca de la Universidad Nacional de Huancavelica.

1.4.3. Justificación social

La justificación social tiene como finalidad contribuir en la gestión del riesgo de desastres y planes de mitigación de áreas de riesgo ante una ocurrencia de un evento extremo de flujos hiperconcentrados (flujos de lodo y escombros) las que ocasionarían graves daños al área urbana poblacional tanto en infraestructura, cultivos e incluso pérdidas humanas. Además, la ausencia de trabajos de investigación referentes al tema aplicados a la realidad geográfica en el Perú hace más que necesario el desarrollo del proyecto contribuyendo de esta manera a la prevención y mejor tratamiento de este tipo de desastres naturales.

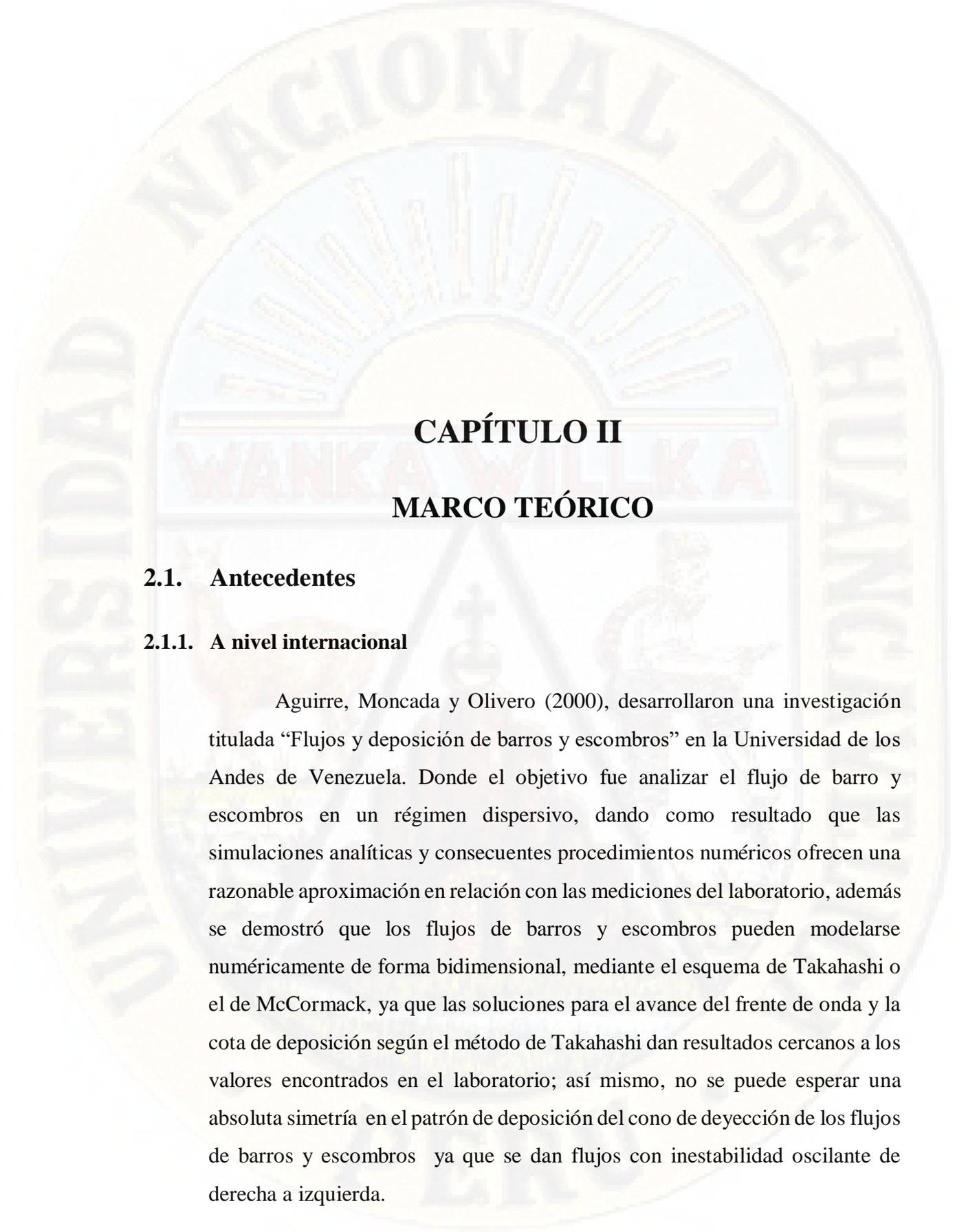
Con el mapa de zonas de riesgo será más fácil crear un ambiente de conciencia frente a los fenómenos naturales e informar a la población de manera fácil y técnica sobre la consecuencia de este tipo de desastres.

1.5. Limitaciones

Este trabajo tiene algunas limitaciones inherentes debidas, principalmente, a la falta de estaciones meteorológicas e hidrométricas dentro de la zona de estudio lo cual no permite hacer uso de métodos tradicionales y poder determinar precipitaciones y caudales reales que represente a toda la subcuenca en estudio, lo cual es un parámetro fundamental para el modelamiento en mención.

Así mismo existen datos muy limitados sobre los parámetros de medición de las características reológicas para flujos de lodo y escombros en nuestro medio. Esto impide la evaluación precisa de los diferentes factores que son causantes de dichos flujos. Razón por la cual se asumen algunos parámetros utilizando algunas relaciones empíricas.

Además, este estudio ha enfrentado a poca disponibilidad de información para el uso del modelo hidráulico Flo - 2D, ya que los manuales del mismo todas son en idioma ingles de muy complejo interpretación.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. A nivel internacional

Aguirre, Moncada y Olivero (2000), desarrollaron una investigación titulada “Flujos y deposición de barros y escombros” en la Universidad de los Andes de Venezuela. Donde el objetivo fue analizar el flujo de barro y escombros en un régimen dispersivo, dando como resultado que las simulaciones analíticas y consecuentes procedimientos numéricos ofrecen una razonable aproximación en relación con las mediciones del laboratorio, además se demostró que los flujos de barros y escombros pueden modelarse numéricamente de forma bidimensional, mediante el esquema de Takahashi o el de McCormack, ya que las soluciones para el avance del frente de onda y la cota de deposición según el método de Takahashi dan resultados cercanos a los valores encontrados en el laboratorio; así mismo, no se puede esperar una absoluta simetría en el patrón de deposición del cono de deyección de los flujos de barros y escombros ya que se dan flujos con inestabilidad oscilante de derecha a izquierda.

Oliveira (2012), realizó una investigación titulada “Estudio del impacto de los flujos de escombros en la cuenca del río San Antonio - Brasil”, donde el objetivo fue investigar la caracterización de la cuenca del río San Antonio, para ello se empleó el modelo Flo - 2D. Con este modelo se pudo simular el movimiento de agua sedimentada en zonas distorsionadas, las ecuaciones usadas son principios de conservación de masa y medición del movimiento.

Sepúlveda, Patiño y Rodríguez (2016), realizaron una investigación titulada “Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvias caso Útica - Colombia” en la Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil. Siendo el objetivo diseñar una metodología para evaluar el riesgo de los flujos de detritos en la ciudad de Cundinamarca. Para la simulación del flujo de detritos se utilizará el modelo Flo - 2D. Este modelo realiza una simulación del movimiento del flujo y analiza el comportamiento de la deposición de las partículas, en el cual se identifican las zonas de riesgo en relación a la intensidad del hecho y la posibilidad de ocurrencia. Donde el 35.2% del casco urbano se encuentra en una zona de riesgo media, y el 68.8% del casco urbano en una zona de riesgo baja.

Bateman, Medina, Hurlimann y Velasco (2017), desarrolló una investigación titulada “Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán” en la Universidad Politécnica de Cataluña. Con el empleo del modelo FLATModel el cual ha probado ser un modelo robusto otorgando buenos resultados, se han simulado flujos de eventos que han ocurrido en el pasado de las cuales se presenta uno en el pirineo axial. El modelo numérico está diseñado para trabajar con un Sistema de Información Geográfica (SIG), con malla estructurada rectangular, lo que permite una gran facilidad para recoger información del propio Instituto Cartográfico e introducirla en el modelo hidrodinámico. Así mismo se constata que la bondad de la topografía es fundamental en el proceso del fenómeno ya que pequeñas variaciones de la topografía pueden ser la causa de depósitos falsos o desviaciones del flujo.

Además, es importante destacar que procedimiento se realizó a posteriori y, por ende, la cartografía fue empleada posevento.

2.1.2. A nivel nacional

Silva (2001), elaboró una tesis titulada “Estudio de control de protección de flujos de lodo en las microcuencas de Quirío y Pedregal-Chosica” en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, para optar el título profesional de ingeniero civil. El objetivo de la investigación fue minimizar los efectos negativos a causa del fenómeno de la geodinámica externa de flujos de lodos mediante obras que protejan la vida y las propiedades de la sociedad. De la investigación se pudo concluir que un sistema de pequeñas presas es la solución más adecuada, de acuerdo a las características socioeconómicas de la población, de la misma manera la aplicación de la metodología del Sistema de Información Geográfica fue importante, ya que con la información recabada por estudios cartográficos y ecológicos se establecieron los principios básicos para la corrección de la pendiente y estabilidad de los taludes planteándose pequeñas presas de enrocado y de esta manera controlar los flujos de lodo. Después de planear el sistema de presas que otorgara un lugar a las microcuencas de Quirío y Pedregal, se dimensionaron para luego permitir la retención del lodo considerando la dimensión de avenidas de 18 m³/seg en la quebrada de Quirío y 18 m³/s en la de Pedregal establecido para un retorno de 2 años.

Castillo (2006), realizo la tesis titulada “Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú” en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, para optar el título profesional de ingeniero civil. El objetivo fue de evaluar las consecuencias de un posible flujo de escombros y lodo en la quebrada Paihua que podría bloquear el cauce del río Rímac y afectar a la ciudad de Matucana. Concluido dicho estudio el autor recomienda promocionar el uso del modelo Flo - 2D para definir mapas de riesgo de flujos hiperconcentrados debido a los buenos resultados que se obtiene.

Pinaud (2014), elaboró una tesis titulada “Estudio experimental de las características dinámicas de un dispositivo disipador viscoso a escala reducida” en la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, para optar el título profesional de ingeniero civil. Los resultados del ensayo de carga monotónica, y ensayo dinámico, ambos confirman un comportamiento bilineal respecto a la fuerza de amortiguamiento. Cabe resaltar que se obtuvo mayor amortiguamiento en el ensayo monotónico, esto debido a dos causas, en primer lugar, debido a que el flujo del líquido en el disipador en el ensayo de la mesa vibradora no se desarrolla en toda la región anular, segundo es causa de las características del flujo, ya que en la prueba sobre la mesa vibradora el movimiento es cíclico desarrollándose turbulencias y discontinuidades, lo cual hace que el fluido fluya en muchas direcciones, lo cual reduce la presión en la dirección del movimiento del pistón dando como resultado la reducción del amortiguamiento. En la otra prueba con movimiento sinusoidal en la mesa vibradora no se encontró relación alguna entre las frecuencias de movimiento y el desarrollo de la fuerza de amortiguamiento del disipador.

Gamió (2014), realizó una tesis titulada “Modelo de flujo de escombros y lodo aplicando Flo - 2D, caso subcuenca del río Shullcas” en la Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, para optar el título profesional de ingeniero civil. Siendo el objetivo principal del estudio definir las zonas de peligros de flujos hiperconcentrados ocasionados por parámetros hidrológicos y geomorfológicos para de esta manera evitar zonas vulnerables ante inundaciones, aplicando el modelo Flo - 2D en el río Shullcas.

La metodología empleada por el investigador fue el uso de las técnicas de observación, recolección y análisis, además para tener los parámetros necesarios el tesista se guio de las normas ASTM, para los parámetros geomorfológicos y diseño de los modelos digitales a través de las fotos satélite Landsat 7 y para la información hidrológica se empleó el programa HEC HMS. De la investigación se pudo concluir que para modelar los flujos

hiperconcentrados, es necesario definir el hidrograma líquido, la correcta distribución de la concentración de sedimentos y los parámetros reológicos de la mezcla, así mismo el modelo Flo - 2D emplea el modelo cuadrático de O'Brien y Julien, concluyendo que las zonas más vulnerables ante un desastre son los terrenos ubicados en la zona la progresiva la que generaría grandes pérdidas económicas y humanas.

Banda (2015), desarrolló una investigación titulada “Análisis comparativo de un modelo hidrodinámico unidimensional para flujo newtonianos y no newtonianos del río seco zona urbana Tacna” en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann - Tacna, Facultad de Ingeniería Civil, para optar el título profesional de ingeniero civil. El objetivo principal de la tesis fue elaborar y analizar un modelo unidimensional para luego hacer un análisis comparativo de un flujo newtoniano y no newtoniano en el río Seco de la ciudad de Tacna y de esta manera determinar la vulnerabilidad del cauce ante desbordes. El método empleado por el autor fue el modelo bidimensional de diferencias finitas Flo - 2D versión 2014. De donde se pudo concluir que, a partir de ensayos de granulometría, límites de Atterberg, peso específico y otros ensayos se realizaron análisis de flujos de lodos y escombros, estimando las características reológicas en función a la concentración de sedimentos, donde los parámetros reológicos empleados para la simulación se establecieron en función a la comparación de las muestras, dando como resultado un contenido de 23 % de material fino y un peso de 2.65 gramos en promedio.

Escusa (2016), desarrolló una investigación titulada “Análisis y modelamiento de flujos de escombros en la zona de Maranura La Convención - Cuzco” en la Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, para optar el título profesional de ingeniero civil. El objetivo planteado por el investigador fue la de proponer una metodología para poder estimar los peligros ocasionados por los flujos de escombros. Para ello se utilizaron dos modelos numéricos de línea reológica como son el Kanako 2D y

el Titán 2D, así mismo se emplearon instrumentos topográficos, pluviómetros y la geotecnia.

En base a los resultados se pudo concluir que el modelo Kanako 2D es el más adecuado para medir el flujo de escombros dadas las condiciones descritas, siendo esta un instrumento certero para estimar los peligros del fenómeno, a diferencia del modelo Titan 2D la cual, al ser muy sofisticada, y en contextos donde la información es limitada no es conveniente su empleo. Según los resultados los caudales de flujo de escombros no son sensibles en magnitud a las variables geotécnicas, pues éstos presentan una variabilidad similar a los hidrogramas líquidos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Cuencas hidrográficas

La cuenca es aquella superficie en la cual el agua precipitada se transfiere a las partes topográficas bajas por medio del sistema de drenaje, concentrándose generalmente en un colector que descarga a otras cuencas aledañas, o finalmente al océano. La cuenca hidrológica, junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

Una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (Aparicio Mijares, 2001).

Espacio geográfico cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por las precipitaciones y cuyos excedentes en agua o en materias solidas transportadas por el agua forman, en un punto espacial único, una desembocadura (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009).

La cuenca de drenaje de una corriente, es el área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación, se unen para formar un solo curso de agua. Cada curso de agua tiene una cuenca bien definida, para cada punto de su recorrido (Villón Béjar, 2002).

Figura 2. Representación de algunas de las propiedades principales de una cuenca



Fuente: (Chahua Janampa J. , Dinámica de flujos aluvionales en el centro poblado de Quincemil, subcuenca del río Araza, 2016)

2.2.1.1. Clasificación

2.2.1.1.1. Según su dimensión

- Cuenca Grande: Es aquella cuenca donde su área es mayor a 250 km² (Ven te Chow , 1994), donde predominan las características fisiográficas

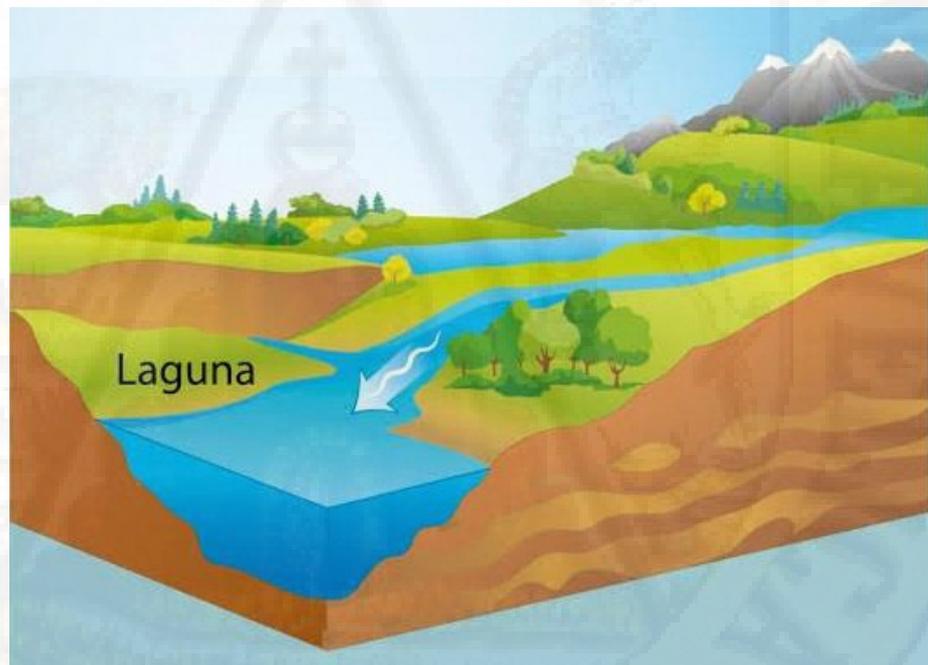
(pendiente, elevación, área, cauce). El efecto de almacenaje del cauce es muy importante.

- **Cuenca Pequeña:** Es aquella cuenca donde su área es menor a 250 km², la forma y la cantidad de escurrimiento está influenciado por las características físicas (tipo de suelo y vegetación) del suelo (Campos Aranda, 1998). La cuenca pequeña responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración.

2.2.1.1.2. Según la salida

- **Cuencas endorreicas:** El punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago (Aparicio Mijares, 2001).

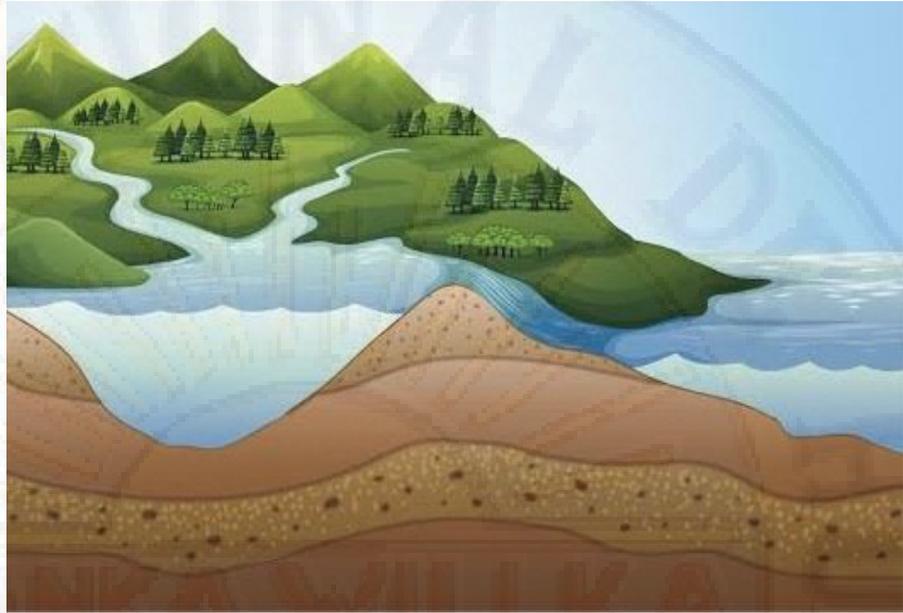
Figura 3. Cuencas endorreicas



Fuente: (Aparicio Mijares, 2001)

- **Cuencas exorreicas:** El punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca está en otra corriente o en el mar (Aparicio Mijares, 2001).

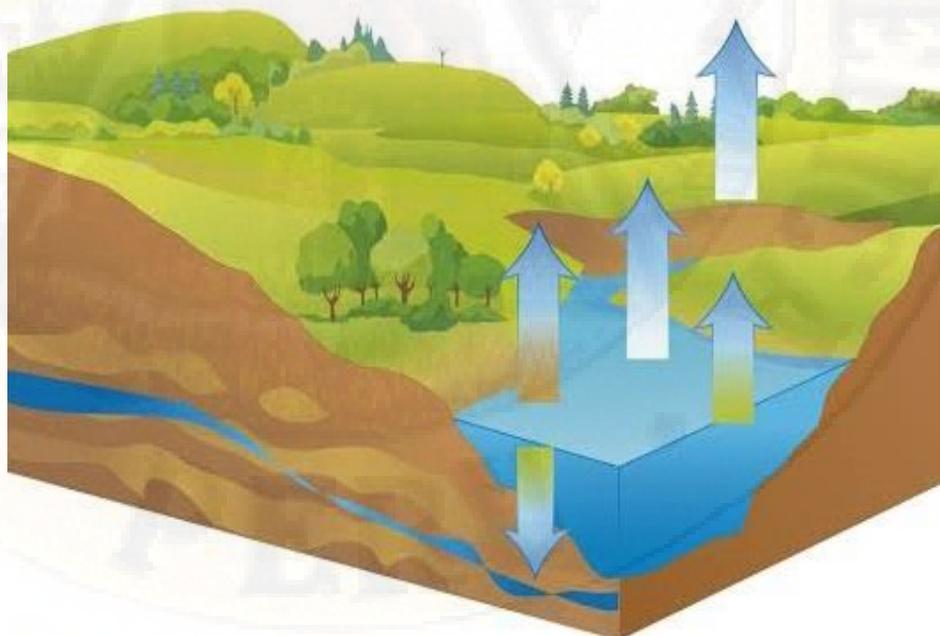
Figura 4. Cuencas exorreicas



Fuente: (Aparicio Mijares, 2001)

- **Cuencas arreicas:** Las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los arroyos, aguadas y cañadones de la meseta patagónica central pertenecen a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico.

Figura 5. Cuencas arreicas



Fuente: (Aparicio Mijares, 2001)

2.2.1.1.3. En función a la elevación

- Cuenca alta: Refiere a cuencas donde capta y almacena en los nevados y glaciares de sus cumbres, en las lagunas y represamientos de las altiplanicies, la mayor parte de las precipitaciones; así mismo tienen una menor presión demográfica.
- Cuenca media: Corresponde a cuencas de mayor pendiente relativa, con un caudal caracterizado por torrentes turbulentos, en donde el río principal mantiene un cauce definido.
- Cuenca baja o zonas de transición: Corresponde a cuencas de menor pendiente relativa, que tiene un caudal de flujo continuo, así mismo tiene cauce definido y amplia planicie de inundación, donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales (Ordoñez Galvez, 2012).

Figura 6. Partes de una cuenca



Fuente: Adaptado de (Ordoñez Gálvez, 2011)

2.2.1.2. Elementos

2.2.1.2.1. Divisoria de aguas

La divisoria de aguas es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica, así mismo marca el límite de mayor nivel topográfico entre cuencas hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos.

2.2.1.2.2. Área de la cuenca

Superficie en proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de esorrentía dirigido a un mismo cauce natural, delimitado por la divisoria de aguas, que influye directamente en la cantidad de agua que ella puede producir (Ordoñez Galvez, 2012).

2.2.1.2.3. Cauce principal

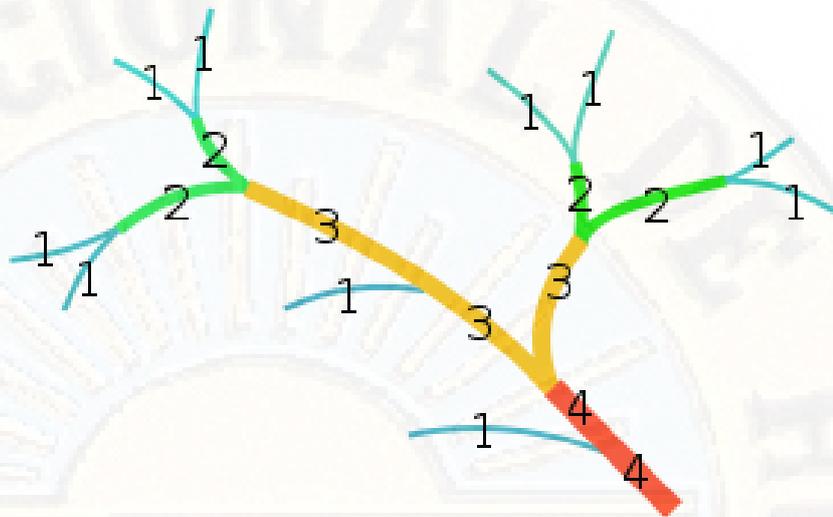
Corriente principal que recorre la cuenca, las demás corrientes se denominan cauces tributarios, delimitada por la divisoria de aguas.

2.2.1.2.4. Corrientes tributarios:

Se determina a partir del grado de bifurcación de las corrientes tributarias (Aparicio Mijares, 2001).

- Corriente de orden 1 es un tributario sin ramificaciones.
- Corriente de orden 2 solo tiene corrientes de orden uno.
- Y así sucesivamente dos corrientes de orden 1 forman una de orden 2, dos corrientes de orden 2 forman una de orden 3, dos corrientes de orden 3 forman una de orden 4, etc.

Figura 7. Cuenca hidrográfica de corriente orden 4



Fuente: Adaptado de (Aparicio Mijares, 2001)

2.2.1.3. Características físicas de una cuenca:

2.2.1.3.1. Área de la cuenca

Es el área plana en proyección horizontal, de forma muy irregular, obtenida después de delimitar la cuenca; se reporta en kilómetros cuadrados, excepto las cuencas pequeñas que se expresan en hectáreas.

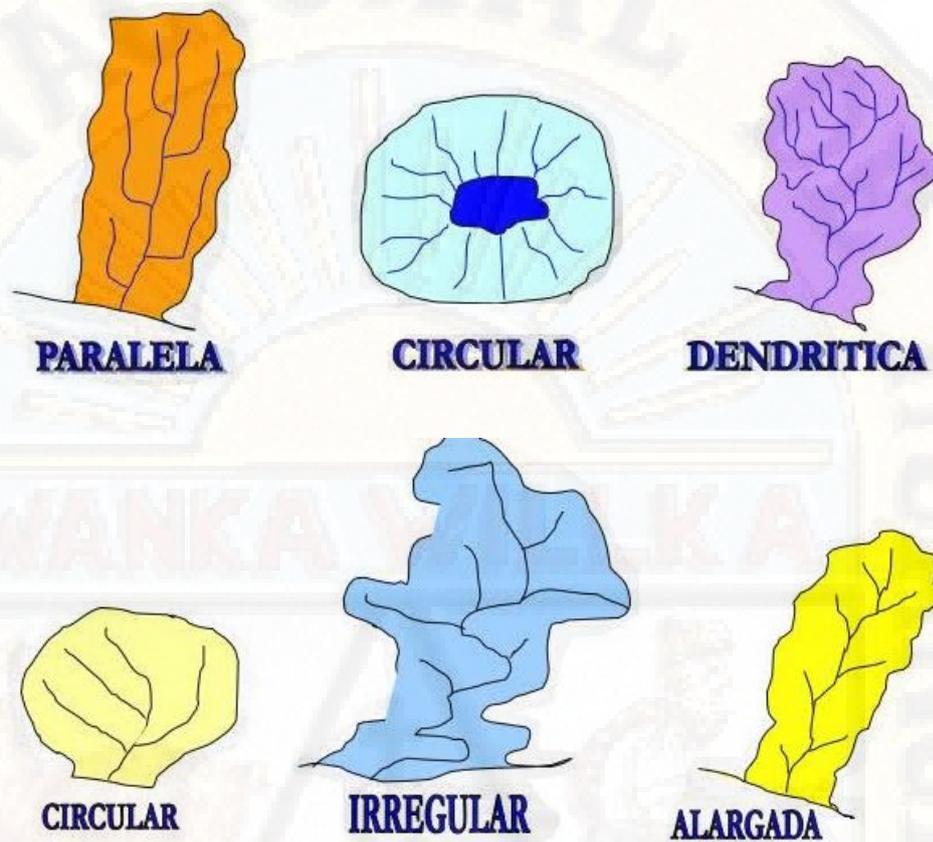
2.2.1.3.2. Perímetro de la cuenca

Borde del contorno (límite exterior) de la forma irregular de la cuenca proyectada en un plano horizontal, obtenida una vez delimitada la cuenca.

2.2.1.3.3. Forma de la cuenca

La forma de la cuenca afecta en las características de descarga de la corriente, principalmente en los eventos de flujo máximo. En general, los escurrimientos de una cuenca de forma casi circular serían diferentes a los de otra, estrecha y alargada, aunque tengan la misma área (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006).

Figura 8. Influencia de la forma de la cuenca en el hidrograma



Fuente: Adaptado de (Campos Aranda, 1998)

2.2.1.4. Parámetros geomorfológicos de la cuenca

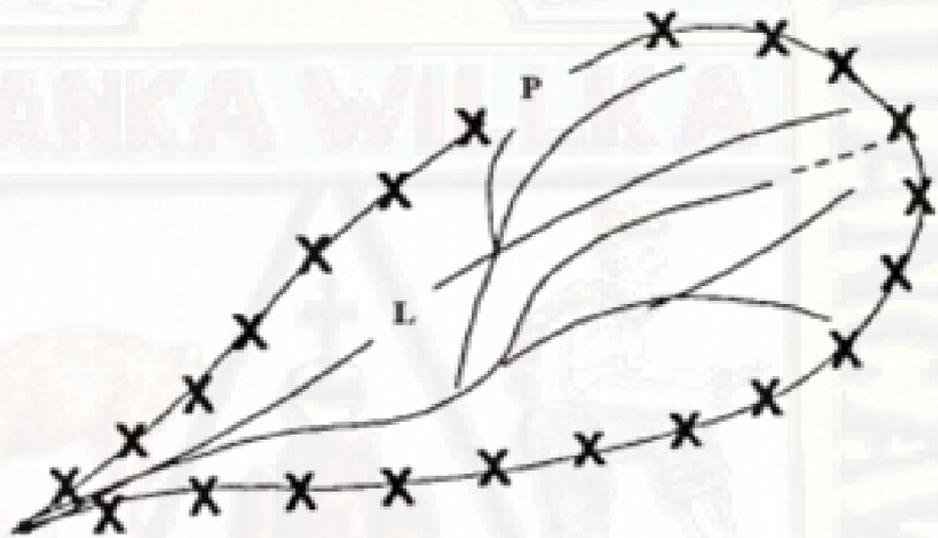
2.2.1.4.1. Longitud del cauce principal, perímetro y ancho

La longitud L de la cuenca mostrada en la **Figura 8**, viene definida por la longitud de su cauce principal, siendo la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba.

Al igual que la superficie, este parámetro influye enormemente en la generación de escorrentía y por ello es determinante para el cálculo de la mayoría de los índices morfométricos.

En cuanto al perímetro de la cuenca que se muestra en la **Figura 8**, informa sucintamente sobre la forma de la cuenca; para una misma superficie, los perímetros de mayor valor corresponden a cuencas alargadas, mientras que los de menor corresponden a cuencas redondeadas. La distancia equivalente que recorre el río entre el punto de salida aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011).

Figura 9. Longitud y perímetro de una cuenca



Fuente: Adaptado de (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011)

Finalmente, el ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L); se designa por la letra W de forma que:

$$W = \frac{A}{Lc} \quad (\text{II.1})$$

Donde:

A : Superficie de la cuenca en km².

L : Longitud de la cuenca en km.

2.2.1.4.2. Pendiente media

Se calcula como media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante; es un índice de la velocidad media de la escorrentía y, por lo tanto, de su poder de arrastre o poder erosivo.

Existen diversos criterios para evaluar la pendiente media de una cuenca, entre las que se destacan son:

- ✓ Criterio de Alvord.
- ✓ Criterio de Horton.
- ✓ Criterio de Nash.
- ✓ Criterio del Rectángulo equivalente.

2.2.1.4.3. Índice de pendiente (I_p)

El índice de pendiente, es una ponderación que se establece entre las pendientes y el tramo recorrido por el río. Con este valor se puede establecer el tipo de granulometría que se encuentra en el cauce. Además, expresa en cierto modo, el relieve de la cuenca (Villón Béjar, 2002).

Se obtiene utilizando el rectángulo equivalente, con la siguiente ecuación:

$$I_p = \sum_{i=2}^n \sqrt{\beta_i(a_i - a_{i-1})} * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (\text{II.2})$$

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T} \quad (\text{II.3})$$

Donde:

Ip : Índice de pendiente

N : Número de curvas de nivel existente en el rectángulo equivalente, incluido los extremos (lados menores).

cn : Cotas de las n curvas de nivel consideradas (km).

Bi : Fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas $a_i - a_{i-1}$.

L : Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (km).

Ai : Área entre curvas de nivel

At : Área total de la cuenca.

▪ Clasificación de pendientes en una cuenca:

Tiene una influencia directa sobre el tipo de drenaje, el diseño de los cauces, la velocidad y el tipo de escorrentía, y consecuentemente en el potencial erosivo y el modelado resultante. En este estudio, se analizaron las pendientes descriptas a continuación:

✓ Pendiente media del cauce principal (i) (%): Es un valioso indicador del grado de respuesta de un cauce ante la torrencialidad de la precipitación. En muchas ocasiones es subjetivo estimar el comienzo del cauce principal, en este caso se considera el cauce de máxima longitud.

✓ Pendiente media de la cuenca (Pend) (%): Dicho parámetro brinda información de la velocidad de escorrentía como así también de las características de los hidrogramas. Las cuencas de mayor pendiente tienden a responder con mayor celeridad ante las precipitaciones al aumentar los caudales (Horton, 1945; Strahler, 1964). La clasificación de dicho parámetro se realizó sobre la base de la propuesta por Ortiz Vera (2004), **Tabla 1**.

Tabla 1. Clasificación de pendiente en las cuencas

Pendiente media (%)	Terrenos
0 a 2	Llano
2 a 5	Suave
5 a 10	Accidentado medio
10 a 15	Accidentado
15 a 25	Fuertemente accidentado
25 a 50	Escarpado
>50	Muy escarpado

Fuente: Adaptado de (Ortiz Vera, 2004)

2.2.1.4.4. Curva hipsométrica

Es la representación gráfica del relieve de una cuenca. Representa el estudio de la variación de la elevación de los varios terrenos de la cuenca con referencia al nivel medio del mar. Esta variación puede ser indicada por medio de un gráfico que muestre el porcentaje de área de drenaje que existe por encima o por debajo de varias elevaciones.

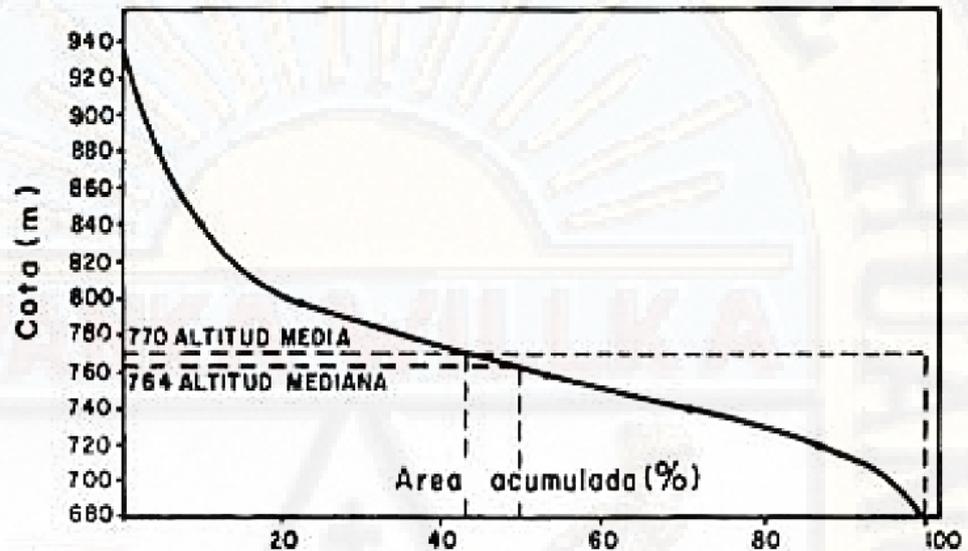
La curva hipsométrica relaciona el valor de la cota, en las ordenadas, en el porcentaje del área acumulada, en las abscisas. Para su construcción se grafican, con excepción de los valores máximos y mínimos de cota hallados, los valores menores de cota de cada intervalo de clase contra su correspondiente área acumulada. Al valor de la cota mayor encontrada corresponde al ciento por ciento del porcentaje de área acumulada.

La curva hipsométrica representa, entonces el porcentaje de área acumulado igualado o excedido para una cota determinada.

La moda de una curva hipsométrica es el valor más frecuente (mayor área) del intervalo de clase de cota que se encuentra en una cuenca hidrográfica (Monsalve Sáenz, 1998).

Cabe mencionar que, ingresando el 50% del área en el eje de las abscisas se obtiene la altitud media de la cuenca que intercepta con la curva hipsométrica **Figura 10**.

Figura 10. Curva hipsométrica de una cuenca



Fuente: Adaptado de (Monsalve Sáenz, 1998)

- Utilidad de la curva hipsométrica

De la curva hipsométrica se puede extraer una importante relación, como es la relación hipsométrica (RH):

$$R_H = \frac{A_s}{A_b} \quad (\text{II.4})$$

Donde:

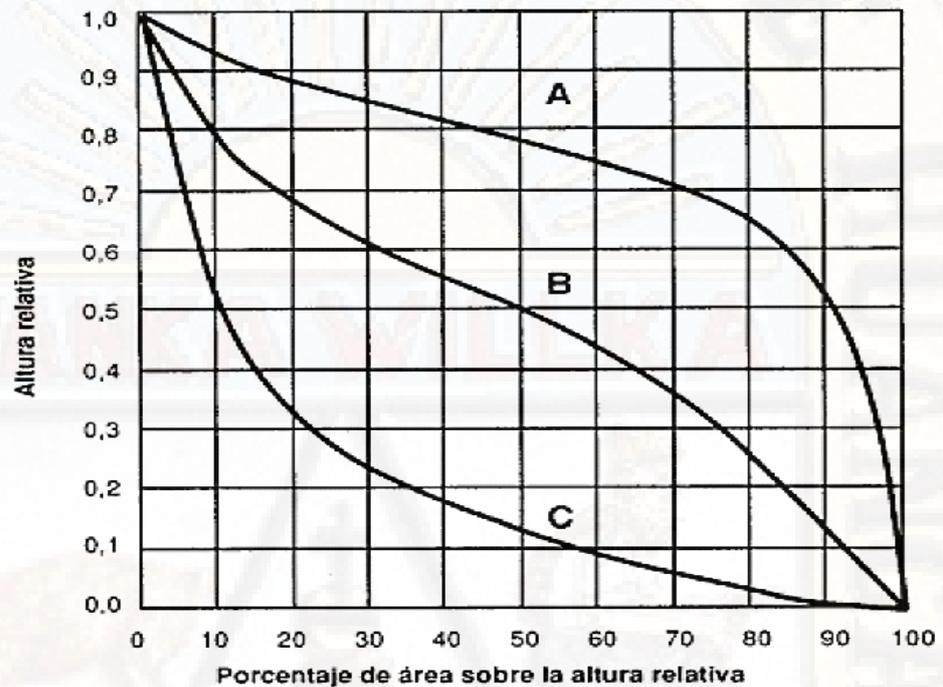
A_s : Área sobre la curva hipsométrica.

A_b : Área bajo la curva hipsométrica.

Según Strahler (Llamas, 1993). La importancia de esta relación hipsométrica consiste en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando $R_H=1$, se trata de una cuenca en

equilibrio morfológico. La **Figura 11**, muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos.

Figura 11. Modelo de curvas hipsométricas del ciclo de erosión



Fuente: Adaptado de (Ven te Chow, 1988)

Donde:

Curva A : Cuenca con gran potencial erosivo (cuenca en fase de juventud).

Curva B : Cuenca en equilibrio (cuenca en fase de madurez).

Curva C : Cuenca sedimentaria (cuenca en fase de vejez).

(Scheidegger, 1987), rechaza esta clasificación aduciendo que el levantamiento tectónico es un proceso continuo y que, a lo largo de la historia de la cuenca hay una tendencia a equilibrar las fuerzas antagónicas de construcción tectónica y degradación por erosión u otros

mecanismos. Si un paisaje muestra un carácter permanente, estos dos procesos opuestos están en equilibrio dinámico.

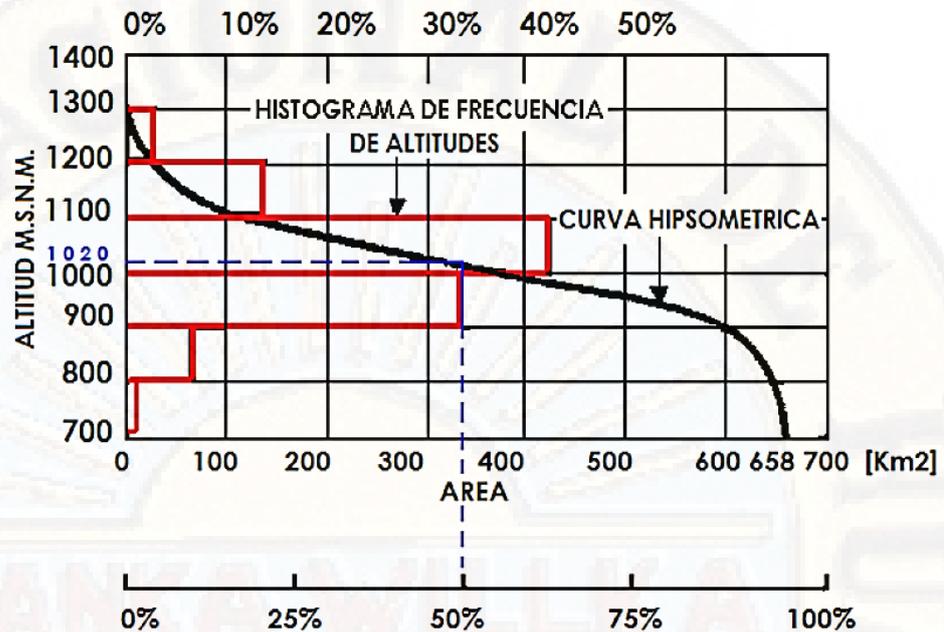
Scheidegger entonces atribuye las diversas formas de la curva hipsométrica a los niveles de actividad de los ya citados procesos. Así, la curva A corresponde a una alta actividad la curva B con una actividad media, y la curva C con una actividad baja, el nivel de actividad no tiene por qué estar relacionado con la edad de la cuenca.

2.2.1.4.5. Diagrama de frecuencias altimétricas

El análisis de frecuencia altimétrica se utiliza para describir, en altitudes sucesivas, las frecuencias de ciertos niveles, como ser altitud de sitios, puntos más altos en mallas cuadradas de muestreo, altitudes de cumbres o la de áreas de llanos o depresiones tales como hombreras, bancos y collados (Clarke, 1968).

El procedimiento tradicional de base para hallar la frecuencia altimétrica es el mismo que para la obtención de los datos que permiten construir la curva hipsométrica: el planímetro sobre cartas topográficas de las áreas existentes entre curvas de nivel de cotas sucesivas. Estas áreas constituyen las frecuencias altitudinales, expresadas en valores absolutos o relativos, correspondientes a cada intervalo de elevación. Asimismo, los datos para la realización de este análisis se obtienen del modelo digital de elevaciones de manera similar que para el análisis hipsométrico, (M.G. Racca, 2007).

Figura 12. Curva hipsométrica y curva de frecuencia



Fuente: Adaptado de (Agustín, 2009)

2.2.1.4.6. Relación de relieve (Rr)

(Schumm, 1956), propone una expresión muy simple para la descripción del relieve, en función de la longitud de la cuenca L y de la diferencia de altura entre la salida de la cuenca y el punto más alto en la divisoria de la cuenca (h):

$$R_r = \frac{h}{L} \quad (\text{II.5})$$

2.2.1.4.7. Tiempo de concentración

Tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el desagüe. Comúnmente el tiempo de concentración se define como, el tiempo que tarda una partícula de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta la salida del desagüe. Además, debe tenerse en claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante; según (Marco & Reyes, 1992) aunque muy ligeramente depende, de la intensidad y la precipitación.

Por tener el concepto de tiempo de concentración una cierta base física, han sido numerosos los autores que han obtenido formulaciones del mismo, a partir de características morfológicas y geométricas de la cuenca. A continuación, se muestran algunas de esas fórmulas empíricas (Montenegro, 2005):

Kirpich:

$$T_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (\text{II.6})$$

Temez:

$$T_c = 0.126 * \left(\frac{L_p}{S_p^{0.35}} \right)^{0.75} \quad (\text{II.7})$$

Pasini:

$$T_c = 0.023 * \left(\frac{A * L_p}{S_p} \right)^{0.5} \quad (\text{II.8})$$

Pizarro:

$$T_c = 13.548 \left(\frac{L^2}{H} \right)^{0.77} \quad (\text{II.9})$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración (hr)

L_p : Longitud del curso principal (km)

S_p : Pendiente del curso principal

H : Diferencia de cotas (m)

A : Área de drenaje (Área de la cuenca) (km²)

2.2.1.5. Parámetros relativos a la red hidrográfica de la cuenca

Una red hidrográfica es un sistema de circulación lineal, jerarquizado y estructurado que asegura el drenaje de una cuenca; específicamente una cuenca hidrográfica. Se distingue entre la cuenca teórica, que abarca la totalidad de los drenajes, y la cuenca circulante, en la que sólo se considera la parte recorrida por las arterias funcionales.

2.2.1.5.1. Densidad de drenaje

Horton (1945), definió la densidad de drenaje de una cuenca como el cociente entre la longitud total (L_t) de los cauces pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca (A):

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (\text{II.10})$$

La densidad de drenaje es un indicador de la respuesta de la cuenca ante una tormenta, por tanto, condiciona la forma del hidrograma resultante en la salida de la cuenca. A mayor densidad de drenaje, más dominante es el flujo en el cauce frente al flujo en ladera, lo que se traduce en un menor tiempo de respuesta de la cuenca y, por tanto, a un menor tiempo al pico del hidrograma.

Strahler (1952), encontró en Estados Unidos valores de D desde 0,2 km/km² para cuencas con drenaje pobre y hasta 250 km/km² para cuencas muy bien drenadas.

2.2.1.5.2. Longitud promedio de flujo superficial

Se define como la distancia media que el agua debería escurrir sobre la cuenca para llegar a un cauce y se estima por la relación que existe entre

el área y cuatro veces la longitud de todos los cauces de la cuenca, o bien, la inversa de cuatro veces la densidad de drenaje.

$$L_o = \frac{A}{4 \sum L_i} = \frac{1}{4D} \quad (\text{II.11})$$

2.2.1.5.3. Pendiente del cauce principal

La velocidad de escurrimiento de las corrientes de agua en una cuenca hidrográfica depende de la pendiente de los canales fluviales. En cuanto mayor valor tome la pendiente, mayor será la velocidad del flujo y, por lo tanto, se convierte en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación (Cahuana A. & Yugar M., 2009).

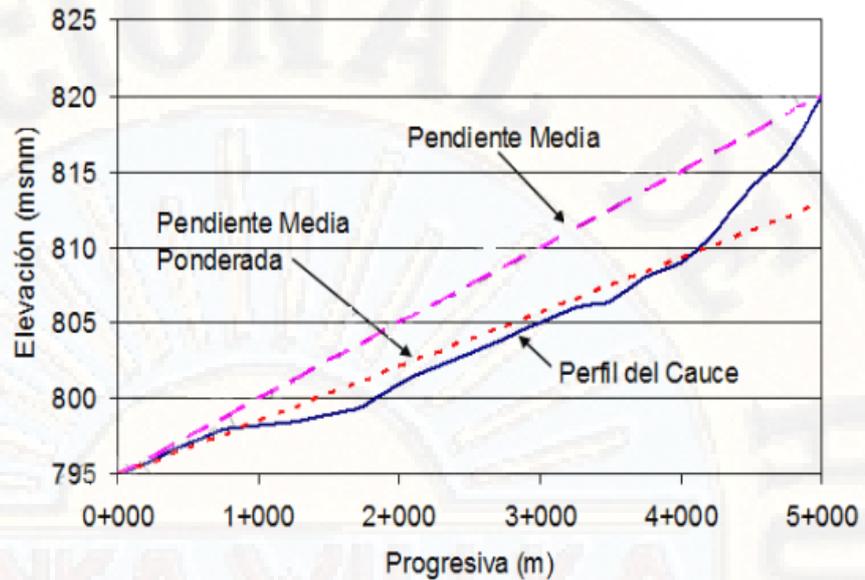
- Pendiente media del cauce principal (S_m): Es la diferencia total de elevación del cauce principal (cota máxima – cota mínima), dividida por su longitud total (L_c):

$$S_m = \frac{H_{m\acute{a}x} - H_{m\acute{i}n}}{L_c} \quad (\text{II.12})$$

- Pendiente media ponderada del cauce principal (S_{mp}): Es un valor más “razonable” para representar la pendiente media del cauce principal. Para calcularlo se traza una línea, en el perfil longitudinal del cauce, tal que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados sea igual a la comprendida entre el perfil y dichos ejes.

La **Figura 13** representan las dos pendientes definidas (media y media ponderada), (Cahuana A. & Yugar M., 2009).

Figura 13. Perfil longitudinal de un cauce



Fuente: Adaptado de (Cahuana A. & Yugar M., 2009)

2.2.2. Precipitación

Desde el punto de vista de la ingeniería hidrológica, la precipitación es la fuente primaria del agua en la superficie terrestre, y sus mediciones forman el punto de partida de la mayor parte de los estudios concernientes al uso y control del agua. En este capítulo se estudiarán dos aspectos fundamentales de la precipitación: por un lado, la manera en que se produce y algunos métodos con que se puede predecir dadas ciertas condiciones atmosféricas, para lo cual será necesario revisar algunos aspectos básicos de meteorología y, por otro, la manera en que se mide la precipitación y diversos criterios para el análisis, síntesis, corrección y tratamiento de los datos.

La precipitación, es toda forma de humedad que, originándose en las nubes, llega hasta la superficie terrestre (Campos Aranda, 1998). La precipitación incluye la lluvia, la nieve y otros procesos mediante los cuales el agua cae a la superficie terrestre, tales como el granizo y nevisca (Moran Wendor, 1989).

2.2.2.1. Precipitaciones (PISCO - SENAMHI)

2.2.2.1.1. Resumen del producto PISCO

El producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) se podría definir como una base de datos que resulta de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, reanálisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial ($\sim 5*5$ km); los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016 (13629 datos diarios), facilitando de este modo mayor disponibilidad de los datos de precipitación para su uso en diferentes actividades ligadas al análisis hidrológico con sus limitaciones respectivas.

En la actualidad, la libre disponibilidad de productos satelitales de estimación de lluvias como el "Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM), el "National Oceanic and Atmospheric Administration's Climate Prediction Center morphing technique" (CMORPH), el "Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks" (PERSIANN) y últimamente el "Global Precipitation Measurement" (GPM) son una alternativa valiosa para mejorar los vacíos de información pluviométrica en muchas partes del mundo. Siendo el campo de los recursos hídricos donde se ha desarrollado mayor investigación para evaluar las bondades de estos productos sobre todo para sus aplicaciones en el modelado hidrológico de cuencas, en la predicción de eventos extremos en tiempo real y la vigilancia de las sequías en zonas de escasa o nula información.

El SENAMHI, a través de su Dirección de Hidrología - DHI, ha desarrollado desde el 2013 diversas investigaciones para evaluar la calidad de los diferentes productos satelitales disponibles a nivel global, para lo cual realizó un arduo trabajo de validación con información de estaciones

terrenas, obteniendo resultados óptimos para algunas zonas del país y bajos para otras. La meta propuesta que inspiró dichos trabajos fue mejorar la representación espacial de lluvias en el Perú usando los datos del sensoramiento remoto como covariables para su asimilación en modelos hidrológicos y desarrollo de productos para monitoreo de sequías e inundaciones.

Esta experiencia ganada en todo este proceso tuvo su mejor momento a mediados del año 2014 cuando se obtiene para el Perú la primera base de datos espacial de precipitación a paso de tiempo mensual, a una resolución de grilla de 0.05° para una serie que se inicia en enero de 1981 hasta el presente. Dichos datos son parte de la base de datos denominada PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations), siglas en inglés para su difusión internacional. Para la construcción del producto PISCOp fue necesario utilizar como covariable, la base de datos global del proyecto CHIRPS (Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data). CHIRPS es una mezcla de datos provenientes de sensores remotos, modelos y datos provenientes de estaciones terrenas. Los datos de CHIRPS están disponibles desde enero de 1981 para una grilla global de resolución de 0.05° . ($\sim 5\text{km}$). La resolución temporal mínima es de 1 día, pero también hay posibilidad de agregaciones a mayores intervalos de tiempo.

Así, PISCOp tiene una mejora constante; entendiendo que el proceso de generación de información es dinámico y debe evolucionar en el tiempo tal como lo hacen otras bases grilladas globales climáticas; en ese sentido se ha mejorado la primera versión de PISCO producto de precipitación mensual. En ese contexto, desde el 2016 se ha generado el producto PISCO precipitación diaria. Utilizado actualmente con éxito en la calibración de modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía que operacionalmente utiliza la DHI para el pronóstico de caudales de corto plazo, elaboración de los productos del sistema de observación de inundaciones del SENAMHI

(SONICS), monitoreo decadiario de precipitaciones del SENAMHI (MIDAS), elaboración de los mapas de umbrales de precipitaciones extremas a nivel nacional, mapas hidroclimáticos de cuencas, vigilancia nacional de la sequía, para la elaboración de estudios e investigaciones hidroclimáticas entre otros.

El Producto PISCO fue generado en el marco de la meta de desarrollo de Investigación Aplicada para la Gestión del Riesgo de Desastres – PREVAED que ejecuta la Dirección de Hidrología del SENAMHI; y la autoría del mismo.

2.2.2.1.2. Metodología para la generación del producto PISCO

La generación de PISCO precipitación diario (PISCOpd) y precipitación mensual (PISCOpm) puede dividirse en 3 subprocesos:

- Control de calidad de la información pluviométrica.
- Análisis exploratorio (AE) de la información satelital.
- Mezcla de datos basado en técnicas geo estadísticas (mensual) y determinísticas (diario).

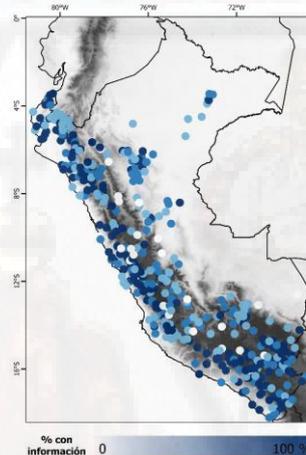
2.2.2.1.2.1. Control de calidad

Este procedimiento el más tedioso de todos, fue realizado a 681 estaciones meteorológicas gestionadas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El proceso de control de calidad se dividió en dos partes: automático y visual.

El control automático, consistió en la evaluación general de los datos de precipitación para cada estación (fechas duplicadas, comas decimales, valores -999 y/o -888), rangos fijos, coherencia temporal y espacial. Los valores que superaron los límites establecidos fueron eliminados. Debido a que un solo proceso de control de calidad no es apto para series climáticas (Hunsiker et al., 2017), fue necesario realizar a través de la visualización de datos una inspección de rupturas y/o

quebrantes evidentes en las series de tiempo y eliminación de segmentos que no eran homogéneos. Además, la completación de datos de las series mensuales y diarias fue llevado a cabo basado en una modificación del algoritmo CUTOFF (Feng et al., 2014) y mapeos de cuantiles ("quantile mapping") respectivamente. Finalizando el control de calidad de datos, solo 443 de las 681 estaciones pluviométricas fueron seleccionadas para la generación de datos PISCOp. La cantidad de años de información en % considerando el período 1981-2016 por cada estación pluviométrica antes de la completación de datos puede apreciarse en la **Figura 14**.

Figura 14. Red de estaciones utilizadas a escala nacional para la elaboración de PISCOp con porcentaje de datos por estación considerando el período 1981-2016



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

2.2.2.1.2.2. AE del producto CHIRPS mensual y diario

Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) es una base de datos de precipitación disponible al público desde 2014 creada y administrada por el U.S. Geological Survey (USGS) y la Universidad de California, Santa Bárbara (UCSB). Contiene información desde 1981 hasta el presente y una extensión espacial, con

datos únicamente en las zonas terrestres, comprendida entre las latitudes 50° S y 50° N y en longitudes 0° a 360°; teniendo una resolución espacial de 0.05°. Las resoluciones temporales son diarias, pentadiarias, decadiarias, mensuales y anuales. Las fuentes de datos utilizadas en la creación de CHIRPS fueron: (1) CHP_{clim} (Climate Hazards Precipitation Climatology); (2) Infrarrojo (IR) térmico geoestacionario; (3) TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission); (4) Modelo atmosférico de campos de precipitación del sistema de predicción climático de la NOAA (CFSv2); y (5) Observaciones in situ de precipitación obtenidas de varias fuentes incluidos servicios meteorológicos estadounidenses y nacionales.

Debido a que la utilización de los datos observados en CHIRPS no presenta un control de calidad riguroso y este control solo se extiende hasta el 2010, PISCOp es generado a partir de una modificación de CHIRP (no confundir con CHIRPS, CHIRP no utiliza para su generación los datos de pluviómetros).

Así, CHIRP es definida como:

$$CHIRP = (b_0 + b_1 \cdot (CCD)) \cdot CHP_{clim} \quad (II.13)$$

Donde:

b_0 y b_1 : Parámetros de la regresión lineal.

CCD : Es el “Cold Cloud Duration Percent”.

CHP_{clim} : Climatología utilizada por CHIRP.

En la **Figura 15** se comparan las climatologías de TRMM2A25 y CHP_{clim} , observándose excesivos valores en la costa sur del país y la mala representación de "hotspot" de lluvias por parte del CHP_{clim} . En este contexto, al no representar CHP_{clim} correctamente las climatologías de

precipitación en Perú, se optó por utilizar una climatología basada en TRMM2A25, obteniéndose de este modo una modificación del CHIRP (CHIRPM) que fue llevada a cabo a paso diario (CHIRPMd) y mensual (CHIRPMm).

La ecuación de CHIRPM está dada por la siguiente ecuación:

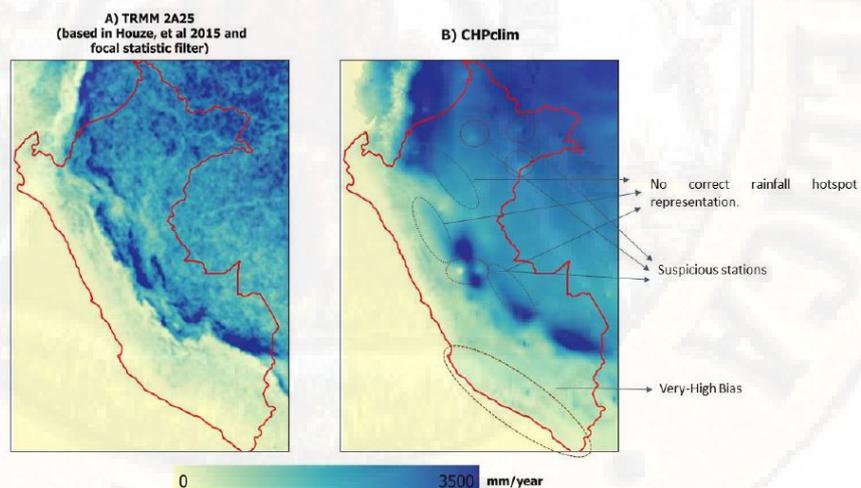
$$CHIRPM = (b_0 + b_1 \cdot (CCD)) \cdot CHP_{clim} \cdot \frac{TRMM2A25 + E}{CHP_{clim} + E} \quad (II.14)$$

Donde:

CHIRPM : Es el CHIRP modificado utilizando las climatologías del TRMM2A25.

E : Es un artificio matemático para evitar grandes desviaciones ($E = 2.5$).

Figura 15. A la izquierda climatología de precipitación (1998-2014) generado a partir de datos TRMM2A25 y a la derecha CHP_{clim} nótese los excesivos valores en la costa sur del país



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de

precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

2.2.2.1.2.3. Mezcla de la información pluviométrica y CHIRPM

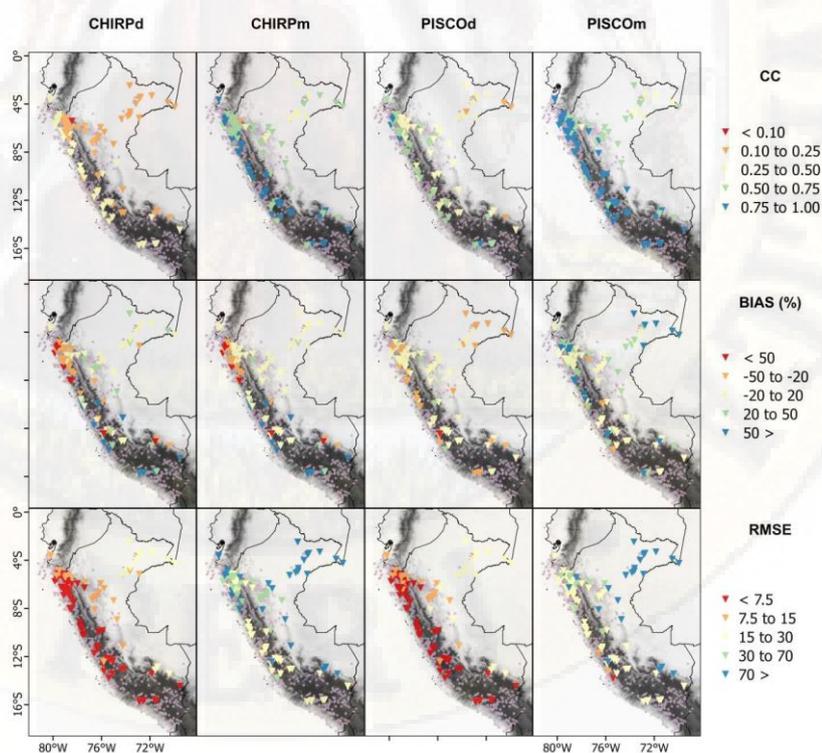
Para la mezcla a paso mensual de la precipitación se ha utilizado la técnica geoestadística Kriging con Deriva Externa (KED) por ser una técnica robusta. En esta metodología, la variable a regionalizar es la precipitación observada y la covariable es la precipitación estimada por el producto CHIRPM. A paso diario se utiliza una modificación de la técnica de interpolación “inverso de la distancia ponderada” junto a una corrección de sesgo basado en valores mensuales, además a partir de la optimización de parámetros de interpolación se plantea la caracterización de la estructura espacial. El proceso de mezcla se realizó de manera independiente para cada mes y día de las series históricas (Desde enero de 1981 hasta diciembre del 2016).

2.2.2.1.3. Validación del producto PISCOp

El método de mezcla de datos utilizados en PISCOp parten de la hipótesis de que la variabilidad espacial de la precipitación es bien capturada por el producto CHIRPM, por lo que se espera que los residuales presente autocorrelación espacial significativa (por lo menos a paso de tiempo mensuales). En la **Figura 16** se muestra los resultados de la validación independiente realizada, es decir la comparación entre el producto CHIRP, PISCOp y pluviómetros a una distancia mayor a 10 km que no fueron utilizados en el proceso de interpolación debido a su corto periodo con información (menor a 10 años), desde una perspectiva global los resultados a paso diario presentan un menor performance que los mensuales para la región costa, sierra y selva tanto para CHIRP como para PISCOp, esto es debido al hecho de que a paso mensual el comportamiento sistémico de las precipitaciones se antepone al aleatorio.

PISCOpm y PISCOpd evidencia una mejora significativa del coeficiente de correlación (CC) frente a CHIRPd y CHIRPm sobretudo en la costa y sierra, esto está relacionado a la distancia entre las estaciones utilizadas en la validación y las estaciones utilizadas en PISCOp, el bajo desempeño de PISCOp en la selva es debido a la baja densidad de estaciones que imposibilita la caracterización de la estructura espacial (mediante el variograma) de forma adecuada. A diferencia del CC que nos permite definir la variabilidad de las precipitaciones, tanto el BIAS % como el RMSE nos permite obtener información sobre las intensidades. Considerando ello, dichos estadísticos presentan un mejor rendimiento principalmente en la sierra y selva, presentando fuertes sobreestimaciones en toda la costa, sin embargo, esta región está caracterizada por presentar precipitaciones por debajo de 100 mm anuales (Manz et. al, 2016) por lo que el bajo rendimiento puede ser despreciado.

Figura 16. Coeficiente de correlación (CC), BIAS en porcentaje y RMSE obtenido en la validación independiente. Puntos rosados son las estaciones utilizadas para generar PISCOp



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

2.2.2.1.4. Versiones liberadas del producto PISCO

El producto PISCO de precipitación cuenta con 3 versiones anteriores a la descrita en este resumen, tal como se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Versiones del producto PISCO

Versión	Covariable	Escala temporal	Método de Interpolación	Imputación	Observaciones	Cobertura temporal
1	CHIRPS	Mensual	KED	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2014
1.1	CHIRPS	Mensual y diario	KED, IDW y RIDW	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2015
1.2	CHIRP	Mensual y diario	RIDW	SI	Quiebres leves artificiales	1981-2016
2	CHIRP TRMM2A25	Mensual y diario	KED y RIDWO	SI	Quiebres leves artificiales	1981-2016

Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

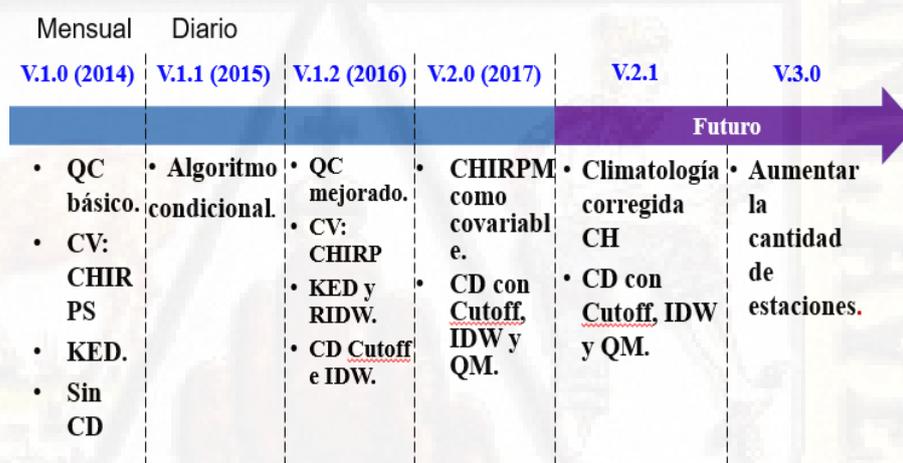
Las primeras versiones de PISCO precipitación (1.0 y 1.1) se caracterizan por la falta de completación de la serie de datos, lo cual repercute directamente en la generación de quiebres artificiales sobre todo a partir del 2010.

La versión 1.0 solo genera datos mensuales, los datos de pluviómetros no presentan completación por lo que se evidencia la formación de fuertes quiebres sobre todo a partir del 2010. Esto se debe

también a que CHIRPS solo considera mediciones de pluviómetros para el periodo 1981-2010, este tipo de inconsistencia ha sido reportada por diversos usuarios sobre todo para los Andes y la Amazonia. Actualmente el producto PISCO v1.x no presenta soporte para su continuidad.

En la segunda versión de PISCO (la cual se va utilizar para la presente investigación) se generan datos mensuales y diarios, el principal cambio radica en que el control de calidad ha sido mucho más riguroso, además de completar los datos faltantes tanto para las series diarias como las mensuales la covariable cambia de CHIRPS a CHIRPM a fin de mejorar la predicción de las intensidades.

Figura 17. Línea del tiempo del producto PISCOp



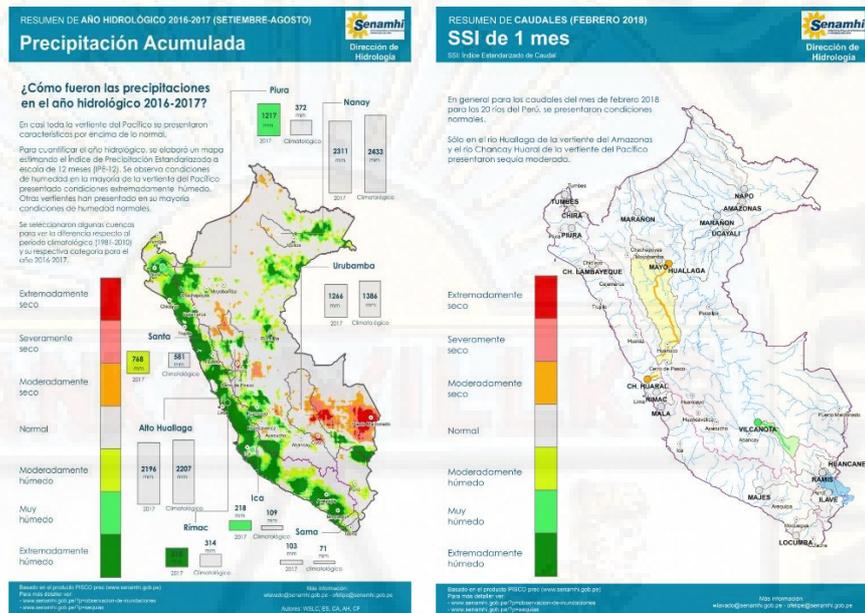
Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

2.2.2.1.5. Productos derivados de la base de datos PISCO de precipitación

Los productos derivados de la base PISCOp en el marco de las actividades de monitoreo hidrometeorológico para la prevención de riesgos de desastres, son tales como (mapas de índices de monitoreo de sequía, mapas de umbrales de precipitación extrema, sistema de observación de

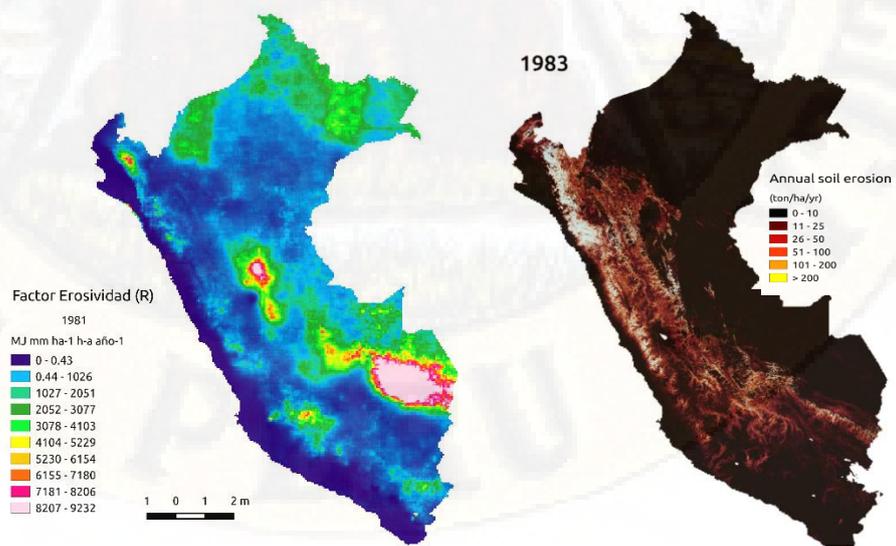
inundaciones del SENAMHI – SONICS, monitoreo decadiario de la precipitación – MIDAS, modelamiento hidrológico de cuencas, etc).

Figura 18. Monitoreo de sequías



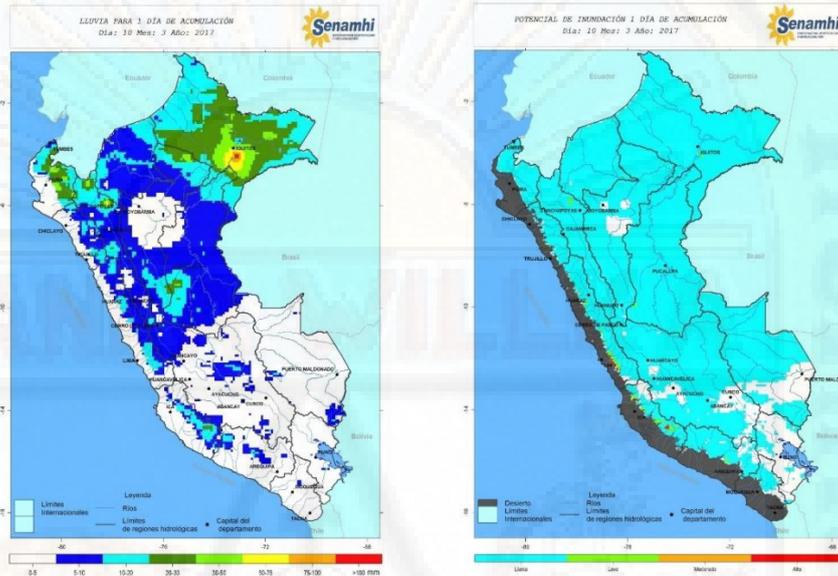
Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

Figura 19. Hidroclimatología (perdidas de suelo por erosión hídrica - RUSLE)



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

Figura 20. Sistema de observación de inundaciones del Senamhi (SONICS)



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

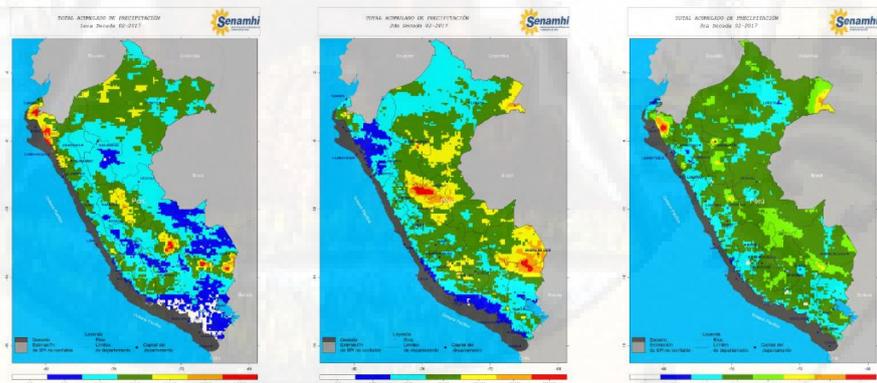
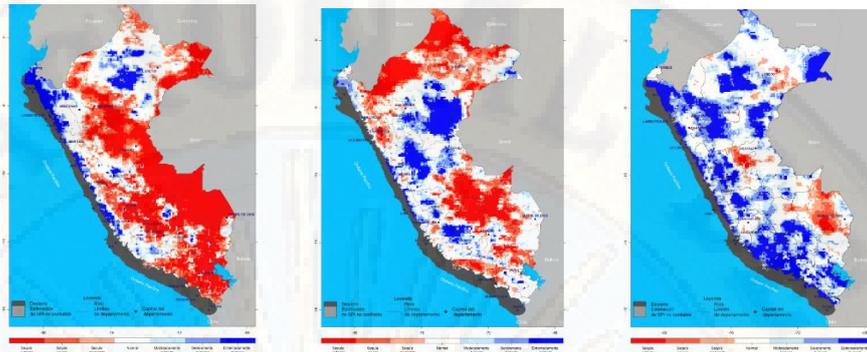
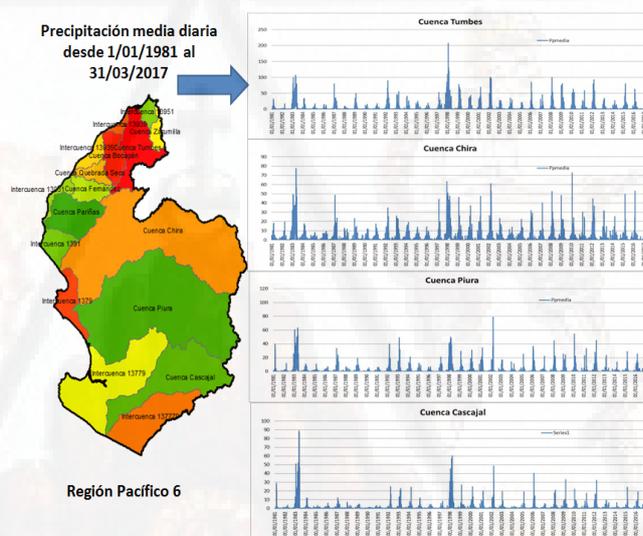


Figura 21. Monitoreo decadiario de precipitaciones del Senamhi (MIDAS)



Fuente: Aybar, C.; Lavado-Casimiro, W.; Huerta, A.; Fernández, C.; Vega, F.; Sabino, E. & Felipe-Obando, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017, Lima-Perú

Figura 22. Precipitación media diaria por cuenca para modelado hidrológico



Fuente: Felipe, O

2.2.2.2. Análisis de datos lluvia – escurrimiento

Es sumamente común que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para conocer el gasto (caudal) de diseño, en general los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento y, además, no se afectan por cambios en la cuenca, por ello, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en

una cuenca mediante las características de la misma y la precipitación (Aparicio Mijares, 2001).

Debido a que, por un lado, la cantidad y calidad de la información disponible varían grandemente de un problema a otro, no siempre se requiere la misma precisión en los resultados, se han desarrollado una gran cantidad de métodos para analizar la relación lluvia - escurrimiento.

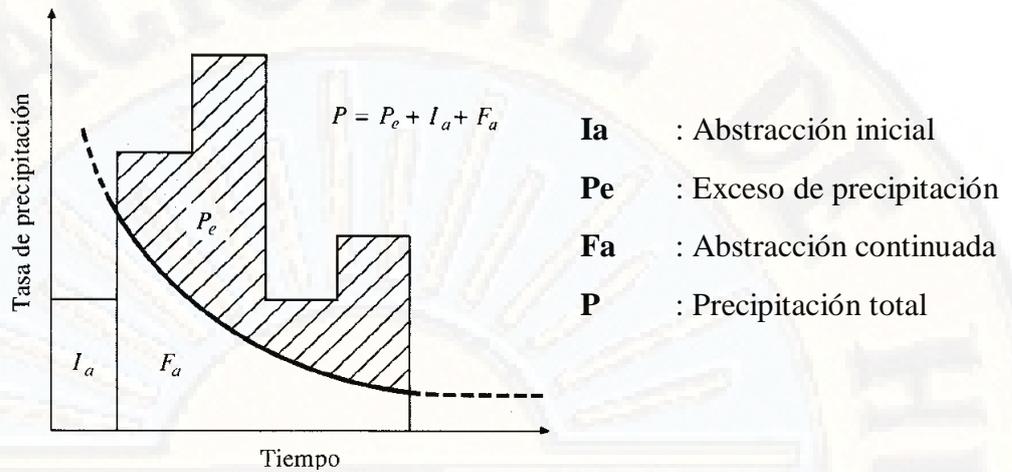
En este apartado se verá solamente el método más representativo, el método curva número (CN).

2.2.2.2.1. Tasa de infiltraciones – método SCS

El *Soil conservation Service* (1972), desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa Pe es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca Fa es menor o igual a alguna retención potencial máxima S (véase **Figura 23**) (Ven te Chow , 1994).

En resumen, el objetivo es obtener la precipitación efectiva a partir de la escorrentía directa.

Figura 23. Variables en el método de abstracciones de precipitación del SCS



Fuente: Adaptado de (Ven Te Chow, 1994)

Existe una cierta cantidad de precipitación I_a , para lo cual no ocurrirá escorrentía potencial es $P - I_a$. La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (\text{II.15})$$

Del principio de continuidad.

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (\text{II.16})$$

Combinando las ecuaciones (3.1) y (3.2) y resolviendo para P_e se encuentra.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (\text{II.17})$$

Es la ecuación básica para estimar la profundidad en exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método

NRCS. La abstracción inicial consiste principalmente en intercepción, infiltración durante los comienzos de la tormenta, y las depresiones o almacenamientos en la superficie, establecen una relación empírica para estimar esta abstracción inicial I_a , que está en función al potencial máximo de retención S .

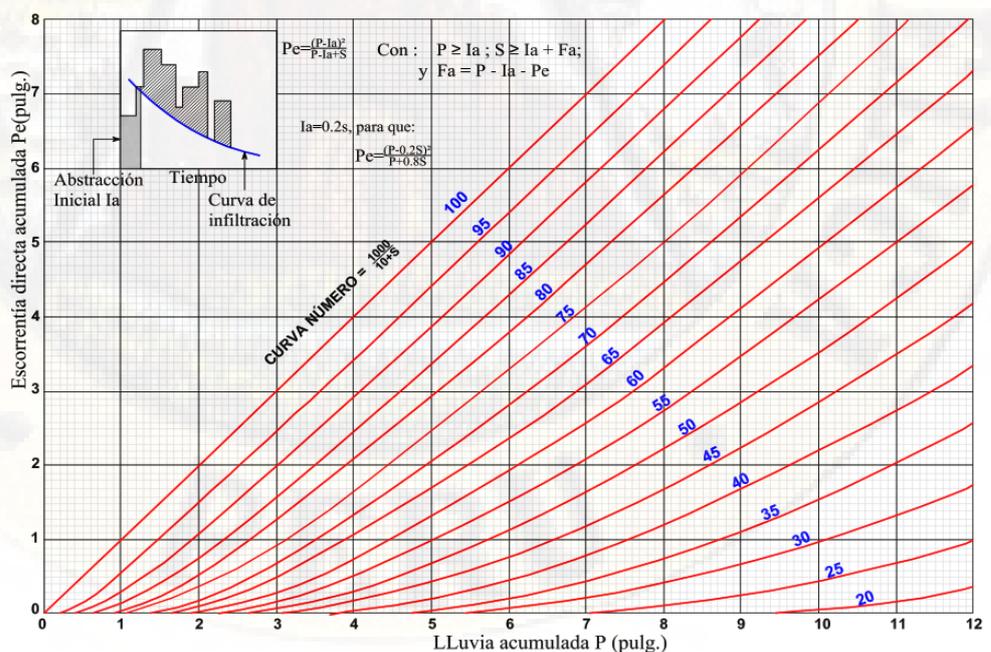
$$I_a = 0.2S \quad (II.18)$$

Remplazando en la ecuación (II.18) en (II.17), se tiene:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 * S)^2}{P - I_a + S} \quad (II.19)$$

Al representar en graficas la información de P y P_e para muchas cuencas, el NRCS encontró curvas como las que se muestra en la **Figura 24**. Para estandarizar estas curvas, se define un numero adimensional de curva CN , tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN=100$, para superficies naturales $CN<100$.

Figura 24. Solución gráfica de las ecuaciones de escorrentía del SCS



Fuente: Adaptado de (Ven te Chow , 1994)

El número de curva CN en relación a S en pulgadas (in).

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (\text{II.20})$$

El número de curva CN en relación a S en milímetros (mm).

$$CN = \frac{25400}{25 + S} \quad (\text{II.21})$$

Los números de curva que se muestra en la **Figura 24** se aplican para condiciones antecedes de humedad (AMC, por sus siglas en inglés).

Donde:

AMC I : Condiciones secas.

AMC II : Condiciones normales.

AMC III : Condiciones húmedas.

Los números de curva equivalente pueden calcularse por.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} \quad (\text{II.22})$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 - 0.13 * CN(II)} \quad (\text{II.23})$$

Tabla 3. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del (NRCS, 1922)

Grupo	Lluvia antecedentes total de 5 días
AMC	(pulg)

	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: Adaptado de (Ven te Chow , 1994)

En la **Tabla 4**, se muestra el rango para las condiciones antecedentes de humedad para cada clase. Los números de curva han sido tabulados por el NRCS con base en el tipo de suelo y uso de la tierra. Se define cuatro tipos de suelo (**Tabla 3**). Los valores de CN para varios tipos de uso de tierra en estos tipos de suelo, se pueden obtener la tabla.

Tabla 4. Grupo de suelo hidrológico, para el cálculo del CN

GRUPO	DESCRIPCIÓN
GRUPO A	Bajo potencial de escurrimiento. Suelos que tienen altas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de arena y gravas profundas, con bueno a exceso drenaje. Estos suelos tienen altas velocidades de transmisión del agua.
GRUPO B	Suelos con moderada velocidad de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas finas y gruesas, con drenaje medio y algo profundo. Son básicamente suelos arenosos.
GRUPO C	Suelos que tienen bajas velocidades de infiltración cuando están mojados, consisten principalmente de suelos que tienen un estado que impide el flujo del agua. Son suelos con texturas finas (margas arcillosas, margas arenosas poco profundas). Estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión

GRUPO D

Alto potencial de escurrimiento. Suelos que tienen muy bajas velocidades de infiltración cuando están mojados y consisten principalmente de suelos arcillosos con alto potencial de hinchamiento, suelos con estratos arcillosos cerca de su superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables.

Fuente: Adaptado de (Ayala Bizarro, 2009)

2.2.2.2.2. Hidrograma unitario.

El hidrograma unitario es ampliamente utilizado como conjunto finito de operaciones que permite dar solución la transformación lluvia escorrentía en caudal.

Así mismo el “hidrograma unitario” es el hidrograma de escorrentía directa causado por una lluvia efectiva unitaria (1cm ó 1mm), de intensidad constante a lo largo de la duración efectiva y distribuida uniformemente sobre el área de drenaje. El método del hidrograma unitario es aplicada a cuencas pequeñas a medianas (Área<5000 km²) para obtener el hidrograma real correspondiente a cualquier tormenta recibida por la cuenca. Este método se basa en cinco hipótesis que fue desarrollado por Sherman en 1932, y está basado en las siguientes.

1. Distribución uniforme, la precipitación efectiva (lluvia neta) está uniformemente distribuida en toda el área de la cuenca.
2. Intensidad uniforme, la precipitación efectiva es de intensidad uniforme en el período, tiempo en horas.
3. Tiempo base constante, los hidrogramas generados por tormentas de la misma duración tienen el mismo tiempo base a pesar de ser diferentes las láminas de precipitación efectiva, independientemente del volumen total escurrido.
4. Linealidad o proporcionalidad, las ordenadas de todos los hidrogramas de escurrimiento directo con el mismo tiempo base a

pesar de ser diferentes las láminas de precipitación efectiva, independientemente del volumen total escurrido.

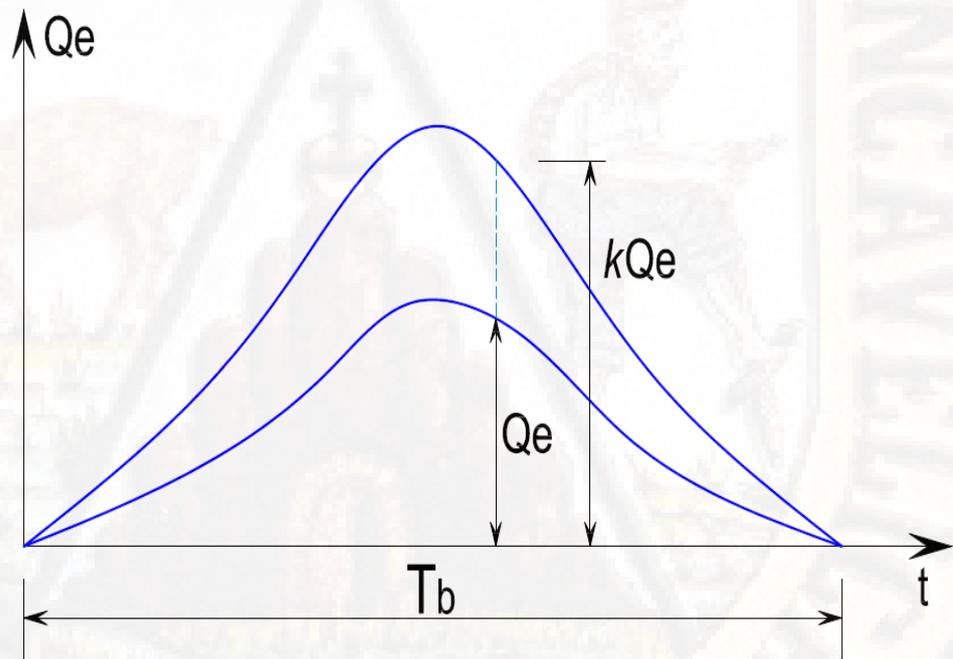
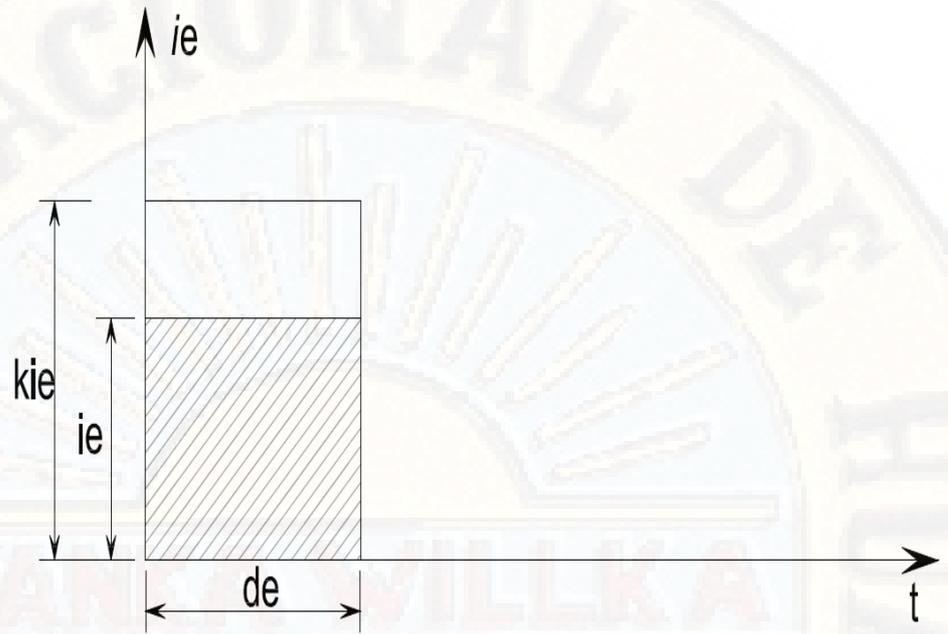
5. Superposición de causas y efectos, el hidrograma resultante de un período de lluvia dado, puede superponerse a hidrogramas resultantes de períodos lluviosos precedentes. Como los hidrogramas producidos por las diferentes partes de la tormenta se asume que ocurren independientemente, el hidrograma de escurrimiento total es simplemente la suma de los hidrogramas individuales.

Principios básicos:

La derivación y aplicación del hidrograma unitario está basada en una teoría empírica que está conformado por dos teoremas o principios básicos que se aplican en todos los casos.

Principio de proporcionalidad: Para una lluvia efectiva de una duración dada, el volumen de lluvia, que es igual al volumen de escorrentía directa, es proporcional a la intensidad de dicha lluvia. Como los hidrogramas de escorrentía directa correspondiente a lluvias efectivas de la misma duración, tienen el mismo tiempo base, se concluye que las ordenadas de dichos hidrogramas serán proporcionales a la intensidad de la lluvia efectiva.

Figura 25. Hidrograma unitario, principio de proporcionalidad



Fuente: Adaptado de (Ven te Chow , 1994)

$$\frac{P_{e1}}{P_{e2}} = \frac{i_{e1}}{i_{e2}} = \frac{Q_{e1}}{Q_{e2}} = k \quad (II.24)$$

Donde:

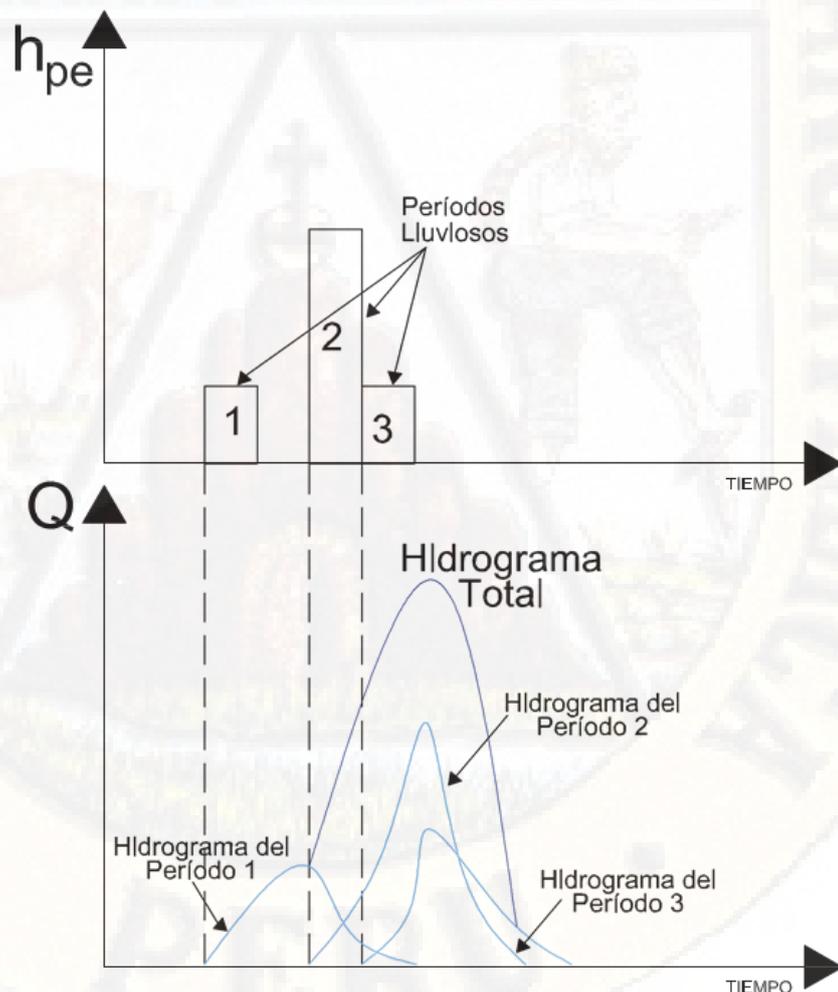
P_e : Es el volumen de lluvia efectiva.

I_e : Intensidad efectiva.

Q_e : El caudal de escorrentía directa.

Principio de superposición: Los caudales de un hidrograma total de escorrentía directa producidos por lluvias efectivas sucesivas pueden ser hallados sumando los caudales de los hidrogramas de escorrentía directa correspondientes a las lluvias efectivas individuales, teniendo en cuenta los tiempos en que ocurren tales lluvias.

Figura 26. Hidrograma unitario, principio de superposición

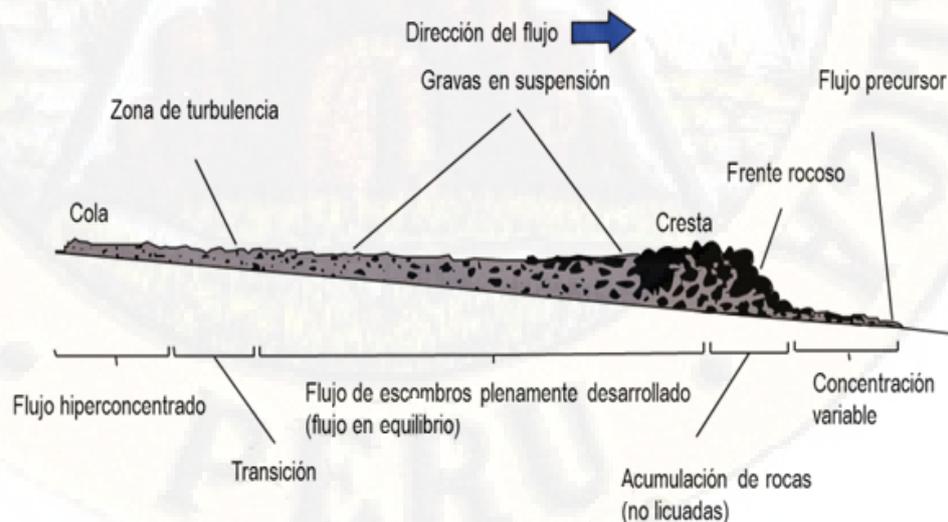


Fuente: Adaptado de (Ven te Chow , 1994)

2.2.3. Hidráulica de flujos de escombros

La hidráulica de los flujos de escombros o hidráulica torrencial, es el estudio de las avenidas torrenciales en la que se generan cuando un material sólido que represa una corriente de agua se pone en movimiento por acción de la corriente. También se le puede definir como un fenómeno generado por la combinación de agua con una masa heterogénea de material tal como suelo, rocas, etc. Este normalmente fluye a través de los cauces de los ríos en una quebrada o de pendiente marcada (Prasad & Rajaratnam, 1991). Dicho flujo acumula material a su paso y deposita material constantemente, modificando su estado de presión de poros interna, lo cual le permite modificar su mecánica a lo largo de su curso (Iverson, 1997). Generalmente, se modelan los flujos de escombros basándose en las ecuaciones que describan un flujo no permanente gradualmente variado (Hungar, 2000), teniendo en cuenta que la cantidad de momento depende de la viscosidad y el modelo reológico que se aplique (Major & Iverson, 1999), y que su continuidad se verá influida por los procesos de erosión y deposición que el flujo presente (Takahashi, 2007). La ruptura inicial es violenta y el flujo tiene gran ímpetu y está previsto de gran capacidad destructiva.

Figura 27. Diferentes regiones dentro de un flujo de escombros



Fuente: Adaptado de (Pierson, 1986)

En general, múltiples autores concuerdan en que la estructura de un flujo de escombros es fácilmente reconocible (**Figura 27**), en la cual se pueden identificar de forma sencilla tres regiones claramente definidas (Prasad & Rajaratnam, 1991). Asimismo, la concentración de los sólidos varía notablemente en función a la región que se evalúa, así como también su comportamiento.

Según la **Figura 27**, se puede dividir el flujo de escombros en la cresta, zona de lodos y la cola, cada uno con las siguientes particularidades.

- **Cresta:** Esta región muestra la punta del flujo de escombros y está constituida por una pared de rocas y escombros de gran tamaño los cuales parecen un muro de piedra en movimiento (Iverson, 2014). Normalmente presenta una gran altura y en consecuencia, su movimiento está gobernado por las fuerzas de inercia. En la experiencia, la longitud de dicha región se extiende como máximo 15 m (Takahashi, 2007).
- **Zona de lodos:** Esta región presenta un flujo completamente desarrollado. Debido a la turbulencia generada en esta zona y las fuerzas dispersivas, se pueden encontrar gravas en la parte superior del flujo como si éstas flotaran en el flujo (Iverson, 1997).
- **Cola:** El desarrollo del flujo en esta zona suele ser un flujo inmaduro, que tiende a convertirse en un flujo de lodos o un cauce en estado de hiperconcentración. Esta suele depositar los sedimentos más finos acarreados por el paso de las regiones previamente descritas.

Como se puede observar, la principal característica de cada región es la concentración de material sólido que existe en cada una, al cual se le denomina C_d , el cual representa el porcentaje de volumen de sólidos con respecto al volumen total de una muestra. La cabeza presentará un valor C_d más elevado mientras que la cola tendrá un valor de C_d marcadamente menor.

2.2.3.1. Tipos de fluidos

Un fluido es un líquido que se deforma continuamente por esfuerzos cortantes, es decir ofrece nula, pequeña o grande resistencia a las fuerzas tangenciales, o cortantes que se le aplican. Podemos clasificar los fluidos según su resistencia a las fuerzas tangenciales o cortantes como:

- a) **Fluidos newtonianos:** Se les conocen a los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña, o nula, para ser deformados. Para un fluido newtoniano, la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de deformación es lineal como se puede visualizar en la **Figura 28**. Los fluidos newtonianos abarcan a todos los líquidos puros cuya mecánica obedece a este campo con una aceptación de error mínima entre el cálculo de sus ecuaciones y la realidad.

En la hidráulica fluvial o en la ingeniería de ríos se considera este fluido como “agua limpia” y se trabaja con los conceptos de fluidos newtonianos; donde la relación entre esfuerzo cortante tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal.

- b) **Fluidos no newtonianos:** Son mezclas con comportamientos muy complejos que ofrecen mayor resistencia a la deformación, entre se ellos se encuentran: los barros, aceites muy viscosos, flujos de lodos y escombros, breas, etc. Este tipo de fluidos adquiere conductas distintas (no lineal), como se aprecia en la gráfica (B), (C) y (D) en la **Figura 28**.

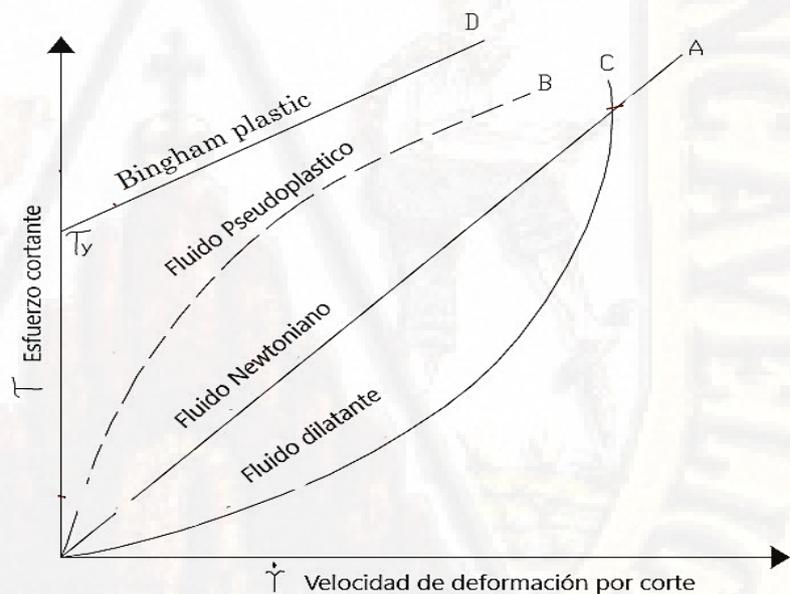
El análisis del comportamiento del flujo de escombros es muy complejo de describir y para ello se requiere idealizar el flujo como un flujo no newtoniano.

Cuando el transporte de sólidos es tan grande y la densidad de la mezcla se eleva por encima de la densidad del agua, la noción de hidráulica fluvial se disipa y se introduce los conceptos de fluidos no

newtonianos “hidráulica torrencial”, estos se dividen en tres tipos de fluidos dilatantes, pseudoplasticos y de tipo Bingham.

- **Fluidos dilatantes:** No fluyen cuando el esfuerzo aplicado es pequeño. Necesitan un esfuerzo adecuado para que empiecen a fluir (ejm: pasta dental).
- **Fluidos pseudoplasticos:** El fluido escurre más fácilmente cuanto mayor es el esfuerzo (ejm: sangre, barro, etc).
- **Fluidos tipo Bingham:** En estos fluidos hay mayor resistencia al flujo para esfuerzos mayores (ejm: arena movediza).

Figura 28. Típica relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación por corte



Fuente: Adaptado de (O'Brien & Julien, 1997)

Donde:

D : No fluyen cuando el esfuerzo aplicado es pequeño. Necesitan un esfuerzo adecuado para que empiecen a fluir. (ejm: pasta dental).

B : El fluido escurre más fácilmente cuanto mayor es el esfuerzo.
(ejm: barro)

C : En estos fluidos hay mayor resistencia al flujo para esfuerzos mayores (ejm: arena movediza).

2.2.3.2. Concepto de flujo de lodo y escombros

Existe una saturación del agua por parte del material sólido que presenta una alta gradación de diámetros. Las partículas más finas de arcilla generan una matriz de soporte que ofrece continuidad al elemento sólido, el cual se lubrica con el agua al moverse.

Se aplica normalmente a un flujo no permanente, pulsátil, de una mezcla de agua y sedimentos gruesos y finos (Aguirre Pe & T. Moncada , 1999).

Flujos de lodo:

En los flujos de lodo predominan los sedimentos de limos y arcillas. Generalmente los flujos de lodo consisten en altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas), aunque también transportan grandes bloques o cantos de rocas. De hecho, el fluido se comporta como un “Slurry” homogéneo con una onda frontal y una serie de pulsaciones.

De acuerdo con experimentos de Wan y Chien (1989), un fluido se convierte en un “Slurry” homogéneo a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m³. A medida que la concentración aumenta, la estructura de los sedimentos se flocula rápidamente y la viscosidad aumenta fuertemente, formando una especie de cohesión de la mezcla suelo – agua (Suárez Díaz, 2013).

Flujos de escombros:

Los flujos de escombros es el resultado de alguna forma de colapso en el talud. Los escombros que caen como un deslizamiento colectan humedad y se mueven a lo largo de la pendiente, éste se licua o se dilata conforme avanza, aumentando la movilidad del fluido (Hamptom, 1972).

Los flujos de escombros es un flujo antiguo conformado por una mezcla viscosa y sedimentos de todos los tamaños con acumulaciones de cantos rodados que se vuelcan en el frente de la onda y forman lóbulos, detrás del cual siguen los granos más finos (Takahashi, 1980).

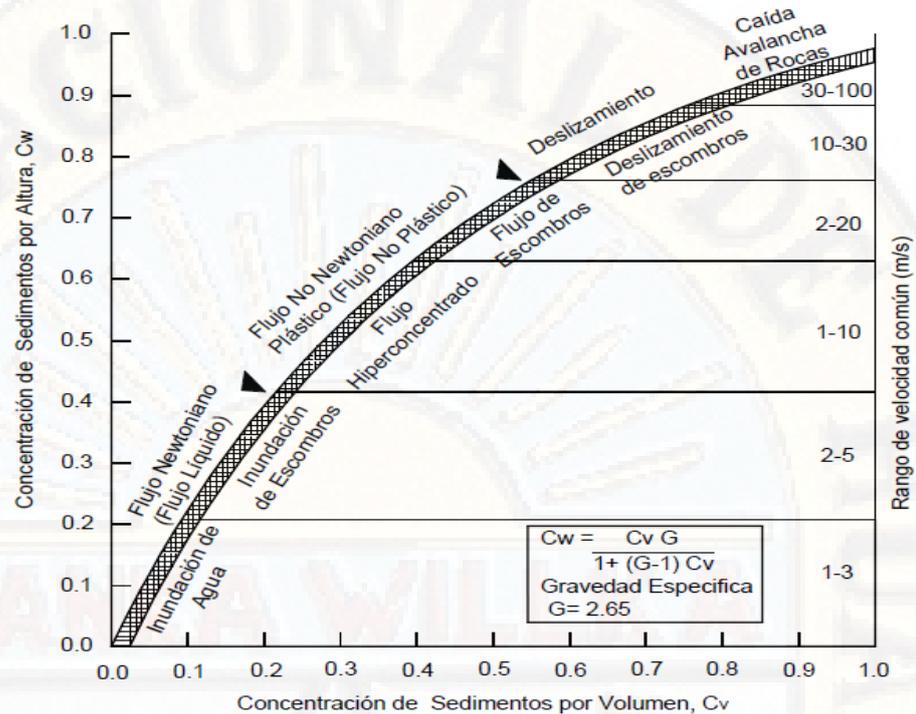
Los flujos de escombros ocurren cuando masas de sedimento pobremente graduadas, agitadas y saturadas de agua, caen precipitadamente por efecto de la atracción de la gravedad (Inverson, 1997).

2.2.3.3. Clasificación de los flujos de escombros

Los flujos de escombros no pueden ser tratados normalmente dentro del campo de la hidráulica fluvial. Sus características marcadas diferencialmente por su alta aglomeración, demandan de un estudio especial.

(O'Brien, 2000) propone que los flujos se pueden clasificar de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos (**Figura 29**).

Figura 29. Clasificación de los deslizamientos y flujos, de acuerdo a la velocidad y concentración de sedimentos



Fuente: Adaptado de (O'Brien, 2000)

Una clasificación especial de los flujos de escombros se basa en el tipo del material, el movimiento y la concentración del sedimento. Existen distintos criterios de clasificación de los flujos de escombros descritas por diferentes autores que citaremos a continuación:

- **Costa (1988)**, diferencia 3 tipos de flujo: avenidas de agua (*wáter flood*), flujos hiperconcentrados y flujos de detritos o escombros (*debris flow*).

Tabla 5. Clasificación de flujos de escombros (Costa, 1998)

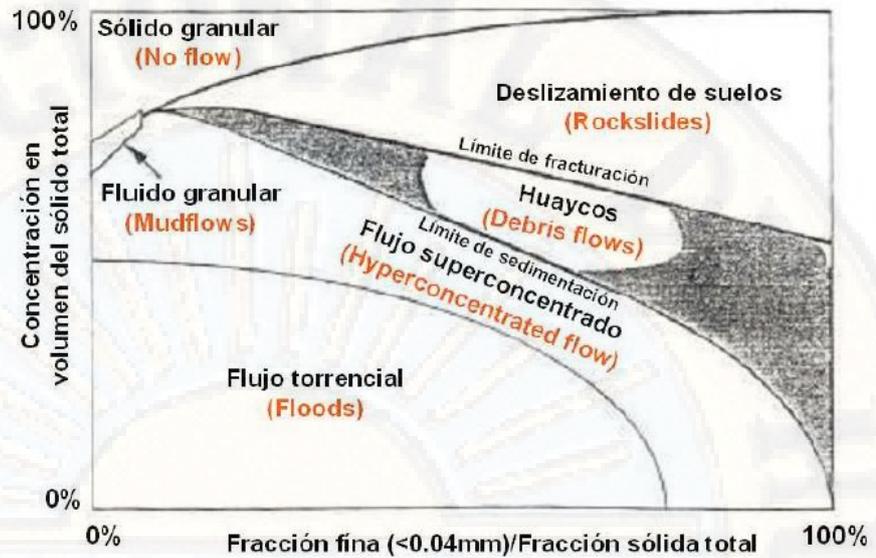
Flujo	Concentración de sedimentos	Densidad los sólidos (g/cm ³)	τ_v (dn/cm ²)	Tipo de Fluido
Avenida de Agua	1-40% en peso 0.4-20% en volumen	1.01-1.33	0-100	Newtoniano
Flujo Hiperconcentrado	40-70% en peso 20-47% en volumen	1.33-1.80	100-400	No Newtoniano
Flujo de escombros	70-90% en peso 47-775 en volumen	1.80-2.30	>400	Viscoplástico

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

Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

- **Coussot (1997)**, clasifica los flujos de escombros utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido.

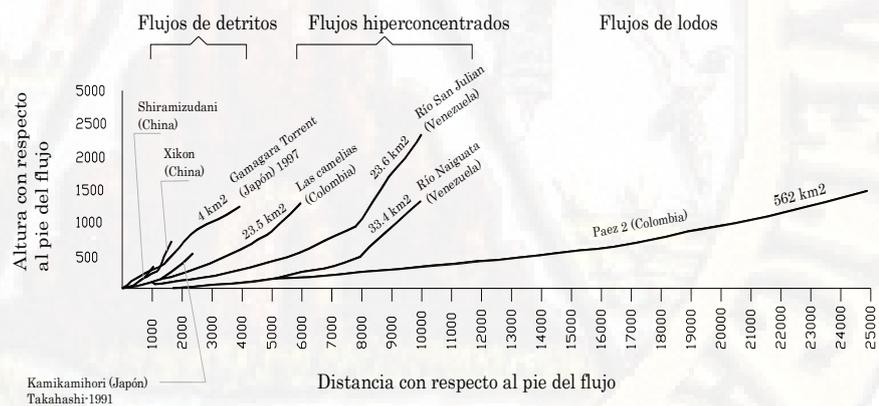
Figura 30. Clasificación de flujos de escombros (Coussot, 1997)



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

- **Suaréz (2001)**, muestra una clasificación en función del perfil característico de cada tipo de flujo. Los flujos de detritos ocurren generalmente en canales de gran pendiente y tiene una longitud de recorrido menor que los flujos hiperconcentrados y los flujos de lodo.

Figura 31. Clasificación de flujos de escombros (Suarez, 2001)



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

Para modelar los flujos, es preciso determinar el tipo de flujo que se va a presentar con base en las características de la mezcla y del

cauce principal. Para resumir los criterios generales y para determinar el tipo de flujo, se presenta la **Tabla 6**.

Tabla 6. Tipos de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal – cauce

Características de los sedimentos	Concentración de sedimentos de la mezcla (kg/m ³)	PENDIENTE DEL CANAL				
		> 100% (45°)	100 a 50%	50 a 20%	20 a 10%	10 a 5% < 5%
		Tipo de flujo				
Más del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	<90	Flujo hiperconcentrado		Flujo de lodo		
	>90	Flujo de lodo				
	<300	Flujo hiperconcentrado				
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				

Fuente: Adaptado de (Suarez, 2009)

2.2.3.4. Composición de flujos de lodo y escombros

Generalmente los flujos de escombros son relacionados con el concreto fresco. Incluso aunque la apariencia es similar al mortero, la composición de los flujos de escombros varía enormemente debido a que éste es un flujo de múltiples fases de granos desordenados con aire y agua mezclados entre sí. El tamaño de partículas varía desde materiales finos hasta cantos rodados sostenidos (suspendidos) en una matriz viscosa. Por lo tanto, entre los principales componentes tenemos: el agua, la matriz fina (partículas de arcilla) y los granos gruesos (Castillo, 2006).

En ese sentido se detalla las principales componentes del flujo de lodo y escombros.

- a. El agua es el principal agente para el transporte del flujo de lodo y escombros debido a su propiedad de contener a las partículas finas y

gruesas, así como envolver a todo el material que se presente en su camino.

- b. Las partículas de arcilla se originan principalmente por la meteorización seguida por una transformación química, así mismo la solidez de la arcilla seca es alta, cuando esta se encuentra humedad tiende a bajar proporcionalmente.

La plasticidad del suelo depende del contenido de arcilla, a mayor presencia de arcilla incrementa el valor de la plasticidad, y viceversa, finalmente a mayor contenido de arcilla húmeda define un tipo de flujo de lodo.

- c. El grano de suelo incluye varios tipos de partículas que consiste mineral inerte y fragmento de rocas que se forman por la meteorización que conservan la estructura de la roca madre, su densidad generalmente varían entre 2650 kg/m³ y 2750 kg/m³.

Se usa la siguiente clasificación simple.

Tabla 7. Clasificación del tamaño de los granos

Arcilla	Limo	Arena Fina	Arena Gruesa	Grava	Cantos	Bolones
2um	20um	200um	2mm	2cm	0.2 m	

→
Incremento del diámetro de partículas

Fuente: Adaptado de (International Society of Soil Science, 2000)

Dependiendo de la fuente de escombros, el flujo podría ser un flujo de lodo con material fina predominante o podría presentarse como fragmentos de rocas dispersos en una matriz de agua y finos.

2.2.3.5. Propiedades de los flujos de escombros

Las propiedades del flujo cambian en forma significativa no solamente en cuanto a las características del flujo sino también en la forma como los sedimentos son transportados. Un flujo de detritos puede convertirse en flujo de lodos y escombros al disminuir la concentración de partículas sólidas o el flujo de lodos puede convertirse en flujo de detritos al aumentar la concentración (Oviedo Mena, 2009).

2.2.3.5.1. Velocidad

- La velocidad del flujo de escombros observado varía de 0.5 m/s a 20 m/s. Las razones de esta gran variedad de velocidad son debido a la clasificación, geometría del canal, pendiente, tamaño y sinuosidad. En una observación en Japón (Okuda, 1980 en Valderrama, 2006) la velocidad en el tramo superior estuvo por encima de los 10 m/s, pero en el área del abanico la velocidad fue de 5 m/s.
- La velocidad está relacionada con la geometría del canal, pendiente y tipo de flujo.
- Para el caso de flujos de lodo, Johnson y Rodine (1984) utilizan la sobre elevación en las curvas como parámetro para calcular la velocidad del flujo.

$$\omega = \sqrt{g \cdot \psi \cdot \cos(\delta) \cdot \tan(\beta)}$$

Donde:

ω : Velocidad promedio.

ψ : Radio de la curva.

δ : Pendiente del canal.

β : Sobre inclinación del flujo en curva.

Por medio de un análisis de estabilidad simple para un ancho y longitud unitario completamente saturado, de altura h , con pendiente $\text{sen}(\theta)$ y con ángulo de fricción ϕ , se obtiene el criterio de **iniciación del movimiento de flujos de escombros**.

- Según el criterio de Mohr – Coulomb, el esfuerzo de corte límite τ_L para un material de suelo no cohesivo es:

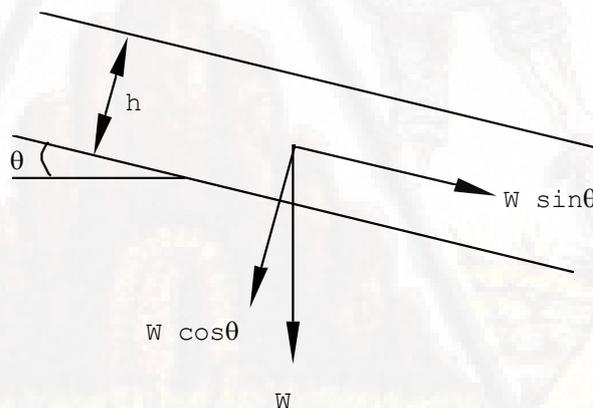
$$\tau_L = \bar{\sigma} \cdot \tan(\phi) \quad (\text{II.25})$$

- De la mecánica de suelos:

$$\bar{\sigma} = \sigma - u_p \quad (\text{II.26})$$

$$u_p = \gamma_w \cdot h \cdot \cos(\theta) \quad (\text{II.27})$$

Figura 33. Ángulo de inclinación



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

Del gráfico:

$$w = \gamma_{sat} \cdot h \quad (\text{II.28})$$

$$\sigma = W \cdot \cos(\theta) \quad (\text{II.29})$$

$$\tau = W \cdot \text{sen}(\theta) \quad (\text{II.30})$$

- Finalmente; para la condición de equilibrio límite, igualando $\tau_L = \tau$:

$$\tan(\theta) = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_{sat}} \cdot \tan(\phi) \quad (\text{II.31})$$

ó

$$\tan(\theta) = \frac{C_v \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w)}{C_v \cdot (\gamma_{sat} - \gamma_w) + \gamma_w} \cdot \tan(\phi) \quad (\text{II.32})$$

(Criterio de iniciación del movimiento)

2.2.3.5.3. Ángulo de deposición

Al disminuir la velocidad, las partículas desaceleran, aumentando el espesor y finalmente sedimentándose. Este proceso puede ocurrir por la disminución de la pendiente, aumento del ancho del canal o presencia de obstáculos que aumenten la resistencia al flujo. Primero se depositan las partículas de mayor tamaño, mientras las partículas finas tratan de recorrer una distancia mayor antes de producirse la sedimentación. Generalmente los flujos de escombros corren a lo largo de cañones estrechos y cuando encuentran un área más amplia tratan de detenerse, formando abanicos de deposición. Observaciones de campo indican que hay cierto ángulo de pendiente límite donde la oleada del flujo de escombros pierde su capacidad de viajar a velocidad uniforme y desacelera, empezando a depositarse la masa de la mezcla. Como primera aproximación, el ángulo de 10° parece significativo para el comienzo de la deposición (Oviedo Mena, 2009).

Finalmente se sugiere asumir un rango de ángulos de deposición entre 10° y 14° para flujos abiertos o no confinados y de 8° a 12° para flujos canalizados o confinados.

2.2.3.5.4. Caudal del flujo de escombros

Para la estimación de los caudales máximos de los flujos de escombros existen 2 metodologías más usadas, la de JICA (*Japan International Cooperation Agency*) y la de O'Brien (2000).

- La metodología usada por JICA se basa en los desarrollos de Takahashi. Según Takahashi el volumen de lodo y escombros es igual a:

$$V_s = V_a \cdot \left(\frac{C_d}{C^* - C_d} \right) \quad (\text{II.33})$$

Donde:

V_s : Volumen de escombros en m^3 .

V_a : Volumen de agua en m^3 .

C_d : Densidad volumétrica del flujo de lodo y piedras.

C^* : Densidad volumétrica de sedimentos del lecho.

Y C_d se estima según la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{\rho \cdot \tan(\theta)}{(\sigma - \rho)(\tan(\phi) - \tan(\theta))} \quad (\text{II.34})$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido de escombros (t/m^3).

σ : Densidad de lodos y piedras (t/m^3).

θ : Angulo del talud.

ϕ : Angulo de fricción.

Basado en el criterio anterior Takahashi estima el caudal máximo de escombros como una función del caudal líquido, y el caudal del material fino como una función del caudal líquido.

$$Q_s = \left(\frac{C^*}{C^* - C_d} \right) \cdot Q_p \quad (\text{II.35})$$

$$Q_f = \left(\frac{\rho - 1}{\rho - \sigma} \right) \cdot Q_p \quad (\text{II.36})$$

$$Q_t = Q_s + Q_f \quad (\text{II.37})$$

Combinando todos los criterios anteriores se obtiene:

$$Q_t = \left(\left(1 + \frac{V_s}{V_a} \right) + \left(\frac{\rho - 1}{\sigma - \rho} \right) \right) \cdot Q_p \quad (\text{II.38})$$

Donde:

V_s : Volumen de escombros en m^3 .

V_a : Volumen de agua en m^3 .

ρ : Densidad del fluido de escombros (t/m^3).

σ : Densidad de lodos y piedras (t/m^3).

Q_p : Caudal líquido (m^3/s).

- La otra metodología empleada es la propuesta por O'Brien (2000), donde el hidrograma de flujo de escombros se estima a partir del

hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor que es una función de la concentración volumétrica de sedimentos (C_v):

$$Q_t = BF \cdot Q_L \quad (\text{II.39})$$

$$BF = \frac{1}{1 - C_v} \quad (\text{II.40})$$

Donde:

Q_t : Caudal total de flujo de escombros (m^3/s).

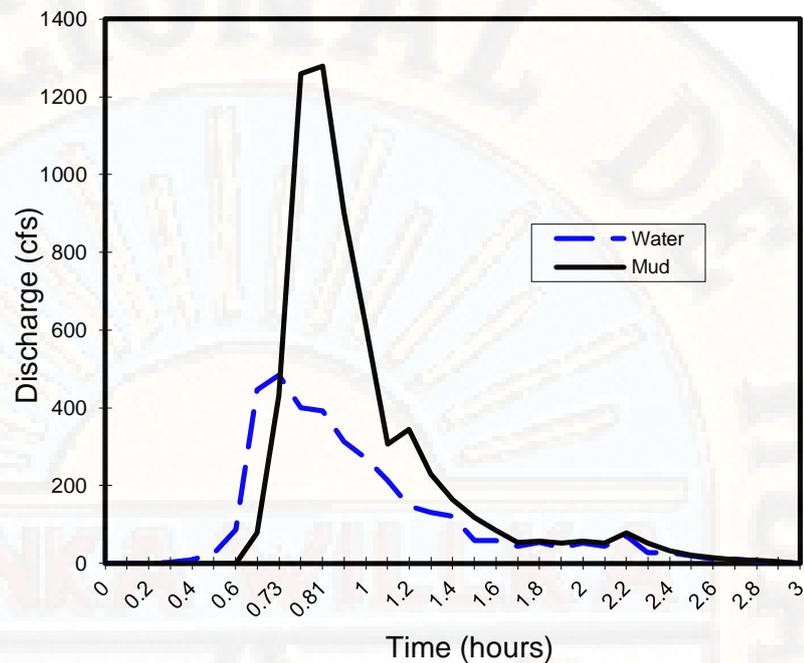
Q_L : Caudal líquido (m^3/s).

BF : Factor de volumen (*Bulking Factor*).

C_v : Concentración volumétrica de escombros.

Según la referencia de O'Brien, para flujos de escombros, el valor de C_v varía entre 0.20 (para flujos bajos) y 0.45 (para flujos altos).

Figura 34. Metodología propuesta por O'Brien (2000) para el cálculo del hidrograma de los flujos de lodo y escombros



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

2.2.3.6. Modelos matemáticos reológicos de flujos de escombros

Los primeros modelos matemáticos para la caracterización de los flujos de escombros partieron de la base de la resistencia de los materiales, de acuerdo a la ecuación de Coulomb (Johnson y Rodine, 1984). Posteriormente se involucraron modelos hidráulicos como los de Bingham y Bagnold, los cuales fueron adaptados al comportamiento de fluidos producto de la mezcla de suelo y agua.

Hay esencialmente dos caminos para la investigación del comportamiento de los flujos de escombros:

- Considerar la masa entera (fluido y sólido) como un “fluido” con propiedades particulares. El modelamiento con este tipo de análisis se aproxima muy bien a los flujos con considerables finos, por ejemplo, para el caso de flujos de lodo.

- La otra posibilidad considera el agua (en algunos casos con finos) y material grueso por separado. A menudo se refiere a modelos de flujo granular, estos modelos se basan íntimamente en el conocimiento de las partículas y de su distribución de tamaño.

2.2.3.6.1. Fluido newtoniano o modelo de Manning

Mediante el modelo de Manning es que se ha realizado la representación hidráulica del flujo de agua con características de flujo newtoniano.

En los fluidos newtonianos como los gases y el agua, la tasa de deformación es proporcional a los esfuerzos de cortante:

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{II.41})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

η : Es el parámetro de viscosidad.

$\frac{\partial v}{\partial y}$: Tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades.

2.2.3.6.2. Modelo viscoso de Coulomb

Es un tipo de fluido no newtoniano; es decir, que presenta mayor resistencia a ser deformado. Requieren que el esfuerzo al corte exceda alguna cantidad mínima antes de observar una tasa de esfuerzo al corte. (Castillo, 2006).

El modelamiento matemático de flujos de residuos se inició utilizando el modelo viscoso de Coulomb, el cual se asimila al fluido Bingham (Juárez, 2009).

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (\text{II.42})$$

Donde:

c : Cohesión.

σ_n : Esfuerzo normal.

ϕ : Ángulo de fricción interna.

Johnson (1970), propuso que la resistencia dinámica total es una combinación de resistencia de cedencia, friccionales y resistencias viscosas llamado este el **modelo viscoso de Coulomb**.

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) + \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{II.43})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

η : Es el parámetro de viscosidad.

$\frac{\partial v}{\partial y}$: Tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades.

2.2.3.6.3. Modelo de Bingham

Este modelo es muy bien relacionado con el flujo de lodo debido a la presencia de granulometría fina. El esfuerzo de cedencia τ_y y la viscosidad η son los dos parámetros.

$$\tau(y) = \tau_y + \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{II.44})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

τ_y : Es el parámetro de esfuerzo de cedencia.

η : Es el parámetro de viscosidad.

$\frac{\partial v}{\partial y}$: Tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades.

Este modelo ha sido frecuentemente usado en el pasado en flujos de lodo y flujos hiperconcentrados (O'Brien y Julien, 1985; Fei, 1983). Yano & Daido (1965) usaron el modelo de fluido de Bingham para describir el flujo de lodo. Este modelo es probablemente el más popular en China y en Japón (Chen, 1987). Johnson (1970) uso este modelo para describir el flujo de escombros permanentes en un canal circular.

2.2.3.6.4. Modelo de fluido dilatante

Desarrollado por Takahashi en 1991, con base en los trabajos de Bagnold (1954). Hay mayor resistencia al flujo para esfuerzos mayores. Se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{II.45})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

η : Es el parámetro de viscosidad.

$\frac{\partial v}{\partial y}$: Tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades.

2.2.3.6.5. Modelo cuadrático de O'Brien y Julien

Presentado por (O'Brien & Julien, 1985).

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C1 \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{II.46})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante.

τ_y : Es el parámetro de esfuerzo de cedencia.

η : Es el parámetro de viscosidad.

$C1$: Es el parámetro turbulento-dispersivo.

$\frac{\partial v}{\partial y}$: Tasa de deformación al corte o gradiente de velocidades.

Más adelante explicaremos a fondo este modelo, pues es el modelo matemático reológico utilizado por el modelo numérico Flo - 2D.

2.2.4. Modelo numérico bidimensional Flo - 2D

El modelo Flo - 2D fue conceptualizado en 1986 para predecir la hidráulica del flujo de lodo. La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de EE. UU apoyó el desarrollo del modelo inicial y la primera aplicación a Telluride, Colorado, en 1988. En los últimos 30 años, Flo - 2D se ha convertido en el modelo de inundación disponible comercialmente más utilizado. Lo que diferencia a Flo - 2D de otros modelos hidrológicos e hidráulicos es su capacidad para simular inundaciones urbanas en alta resolución y detalles ilimitados, incluido el sistema de drenaje pluvial. Usando elementos tan pequeños como tres metros,

Así mismo, Flo - 2D desarrollado por la Flo - 2D software Inc. es un modelo hidrológico-hidráulico bidimensional (2D) es capaz de simular la propagación de crecidas o flujo de escombros en cuencas hidrográficas, y es único debido a su capacidad de simular en un único paquete todos los procesos

físicos que gobiernan el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación. Así mismo es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de *momentum* en forma completa, utilizando un esquema geométrico con celdas de dimensión constante y finalizado en el cálculo celda por celda y en 8 direcciones de las variables hidráulicas que como resultado brinda parámetros aproximados como:

1. Profundidad.
2. Velocidad.
3. Caudal.

2.2.4.1. Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones que gobiernan el modelo numérico hidrológico – hidráulico computacional Flo - 2D, considera las ecuaciones de continuidad dentro del método de diferencias finitas, así mismo representan la ecuación expandida de la conservación de la masa, principio de Einstein en una versión en dos dimensiones.

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \quad (\text{II.47})$$

Donde:

h : Es la profundidad hidráulica.

V_x : Componente de la velocidad media en dirección x.

V_y : Componente de la velocidad media en dirección y.

i : Es la intensidad de lluvia efectiva ($i = 0$, si el dato de entrada es el caudal o un hidrograma, y podría ser no cero en la superficie del flujo).

t : Es el tiempo.

- Ecuación de Movimiento:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial x}{\partial y} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (\text{II.48})$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \cdot \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial y}{\partial t} \quad (\text{II.49})$$

Donde:

S_{ox}, S_{oy} : Componentes de la pendiente de fondo en las direcciones x e y.

S_{fx}, S_{fy} : Pendientes de fricción en las direcciones x e y.

g : Aceleración de la gravedad.

2.2.4.2. Modelo reológico de O'Brien y Julien

Los parámetros reológicos son la viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia (τ_y) de la mezcla agua-sedimento.

Una manera directa de calcular la viscosidad es empleando un "reómetro" que es similar a un viscosímetro que construye todo el diagrama de esfuerzo vs. tasa de deformación. Usualmente en estos aparatos sólo se analiza la matriz del fluido (limos y arcillas con tamaños menores a 0,072 mm), es decir sólo se analiza la matriz más viscosa de la mezcla sin considerar el material grueso. Sin embargo, el uso de esta metodología resulta ser complicado y a la vez muy costosa.

(O'Brien & Julien, 1988), Majo & Pierson, (1990) y (Lan, 1991), investigaron flujos de lodo con altas concentraciones de sedimento fino en la matriz fluida. Estos estudios mostraron que los flujos de lodo se comportan

como los fluidos de Bingham con bajas tasas de corte. En matrices fluidas con bajas concentraciones de sedimento, los esfuerzos turbulentos dominan en el flujo. Altas concentraciones de partículas gruesas combinadas con bajas concentraciones de partículas finas son requeridas para generar esfuerzos dispersivos. El modelo cuadrático de esfuerzo al corte propuesto por (O'Brien & Julien, 1985), describe el régimen continuo de flujo viscoso a flujo turbulento/dispersivo.

Para la simulación flujos de lodo, el comportamiento reológico del flujo debe ser tratado como un continuo con componentes de agua y sedimento mezclados. Los flujos de sedimento hiperconcentrado como lodo y flujos de escombros envuelven la interacción entre fluidos complejos y procesos de sedimentos; turbulencia, esfuerzos viscosos, cambio de momento de la partícula sedimento fluido, arrastre de partículas y colisión de partículas de sedimento. La cohesión fina del sedimento controla el comportamiento no newtoniano de la matriz fluida. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia el cual debe ser excedido por una fuerza aplicada para iniciar el movimiento de fluido.

Para grandes tasas de esfuerzo al corte tal como podría ocurrir en abanicos aluviales pronunciados, los esfuerzos turbulentos pueden ser generados. En un flujo turbulento, un incremento de la componente de esfuerzo al corte, del esfuerzo dispersivo, puede provenir de la colisión de partículas de sedimento bajo grandes tasas de deformación del flujo. Los esfuerzos dispersivos ocurren cuando las partículas grandes del sedimento dominan el flujo y el porcentaje de sedimento fino cohesivo (limos y arcillas) es pequeño.

El esfuerzo cortante en los flujos hiperconcentrados, incluyendo los que se describen como los flujos de escombros, flujos de barro y las inundaciones de barro, se puede calcular a partir de la suma de las cinco componentes de esfuerzo de corte.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (\text{II.50})$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante total.

τ_c : Esfuerzo de cedencia cohesivo.

τ_{mc} : Esfuerzo de corte de Mohr-Coulomb.

τ_v : Es el esfuerzo de corte viscosa.

τ_t : Es el esfuerzo cortante turbulento.

τ_d : Es el esfuerzo cortante dispersivo.

Cuando se escribe en términos de tasas de corte ($\partial v / \partial x$) y con $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$, se obtiene la siguiente ecuación cuadrática reológica (O'Brien & Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (\text{II.51})$$

Donde:

η : Es la viscosidad dinámica de la mezcla.

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (\text{II.52})$$

$$C = \rho_m \cdot l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad (\text{II.53})$$

C : Denota el coeficiente de esfuerzos cortante inerciales.

ρ_m : Es la densidad de la masa de mezcla.

l : Es la longitud de la de la mezcla de Prandtl.

C_v : Es la concentración volumétrica de sedimentos.

d_s : Es el tamaño del sedimento.

(Bagnold, 1954), definió la concentración de sedimento lineal como:

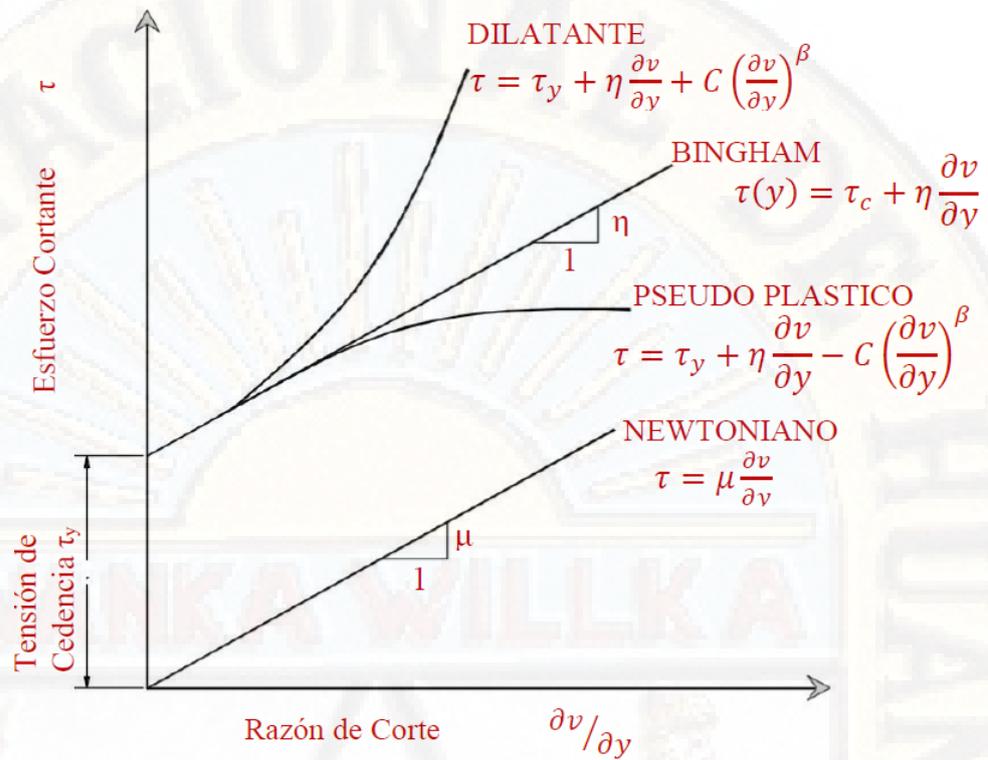
$$f(\rho_m, C_v) = \alpha_i * \rho_m \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (\text{II.54})$$

Donde α_i es un coeficiente empírico igual a 0.01 y C_* es la máxima concentración estática en volumen para las partículas de sedimentos que es aproximadamente 0.615.

Los dos primeros términos de esfuerzos en el modelo reológico cuadrática se conocen como los esfuerzos tangenciales de Bingham **Figura 35**. La suma del esfuerzo de fluencia y viscosa define el esfuerzo cortante total de un flujo de lodo de cohesión en régimen de flujo viscoso.

El último término es la suma de esfuerzos de corte dispersivo y turbulento, que define un régimen de flujo de inercia para una inundación de barro y flujo de escombros. Este término es una función del cuadrado del gradiente de velocidad.

Figura 35. Esfuerzo cortante en función de la tasa de corte o gradiente de velocidad



Fuente: Adaptado de (Ccama Lipa, 2018)

Para definir todos los términos de esfuerzo de corte para su uso en el modelo Flo - 2D, se integran las ecuaciones en la profundidad y se reescriben en la gradiente adimensional.

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (II.55)$$

Donde:

S_f : Pendiente de fricción total.

S_y : Gradiente de cedencia.

S_v : Gradiente viscoso.

S_{td} : Gradiente dispersivo turbulento.

Los términos de gradiente viscoso y turbulento pueden escribirse en términos de profundidad y velocidad media, donde la pendiente viscosa se puede escribir como.

$$S_v = \frac{K \cdot \eta \cdot V}{8 \cdot \gamma_m \cdot h^2} \quad (\text{II.56})$$

Donde:

γ_m : Es el peso específico de la mezcla de sedimentos.

K : Es el parámetro de resistencia para los flujos laminares.

La pendiente del esfuerzo turbulento dispersivo, es dado como:

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 \cdot V^2}{h^{4/3}} \quad (\text{II.57})$$

Donde la resistencia del flujo n_{td} de las componentes del esfuerzo de cortantes turbulentos y dispersivos es una función exponencial de la concentración de sedimentos y el coeficiente de Manning donde los componentes de las pendientes de fricción son entonces combinados en la siguiente forma:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m \cdot h} + \frac{K\eta}{8 \cdot \gamma_m} \cdot \frac{V}{h^2} + \frac{n_{td}^2 \cdot V^2}{h^{4/3}} \quad (\text{II.58})$$

En 1988 O'Brien y Julien, realizaron un análisis de laboratorio de muestras recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs. Las propiedades de las muestras de los flujos de lodo en términos de distribución del tamaño de sedimento y contenido de arcilla fueron resumidas en la Tabla II.9. Las muestras con alto contenido de arcilla fueron ensayadas para determinar el límite líquido y el índice plástico.

Tabla 8. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (Limo y Arcilla)

Muestras tipo	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	-	-

Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

La matriz fluida compuesta de sedimentos finos (limos y arcillas) fue preparada para ensayarse en un viscosímetro; de 10 a 15 mediciones de esfuerzos cortantes versus tasa de deformación fue realizado para cada concentración. La concentración volumétrica fue variando añadiendo agua después de cada ensayo.

Finalmente, de los resultados se concluyó que la viscosidad η y el esfuerzo de cedencia τ_y se incrementan potencialmente con la concentración de sedimentos C_v y pueden ser expresados en una ecuación semi-empírica como (Flo - 2D, 2003).

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (\text{II.59})$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (\text{II.60})$$

$$\eta = \eta_t + \eta_d + 0,0538 \cdot \eta_t \cdot e^{6,0896 C_v} \quad (\text{II.61})$$

Donde:

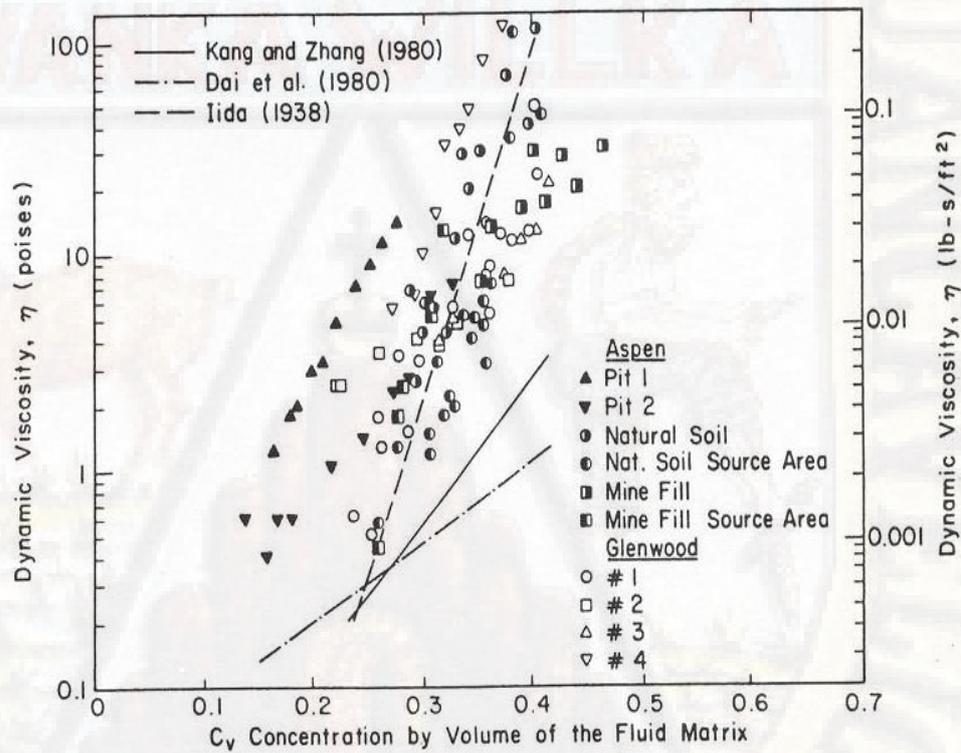
α_i, β_i : Son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio.

C_v : Es la concentración volumétrica de sedimentos.

η_t : Es la viscosidad turbulenta.

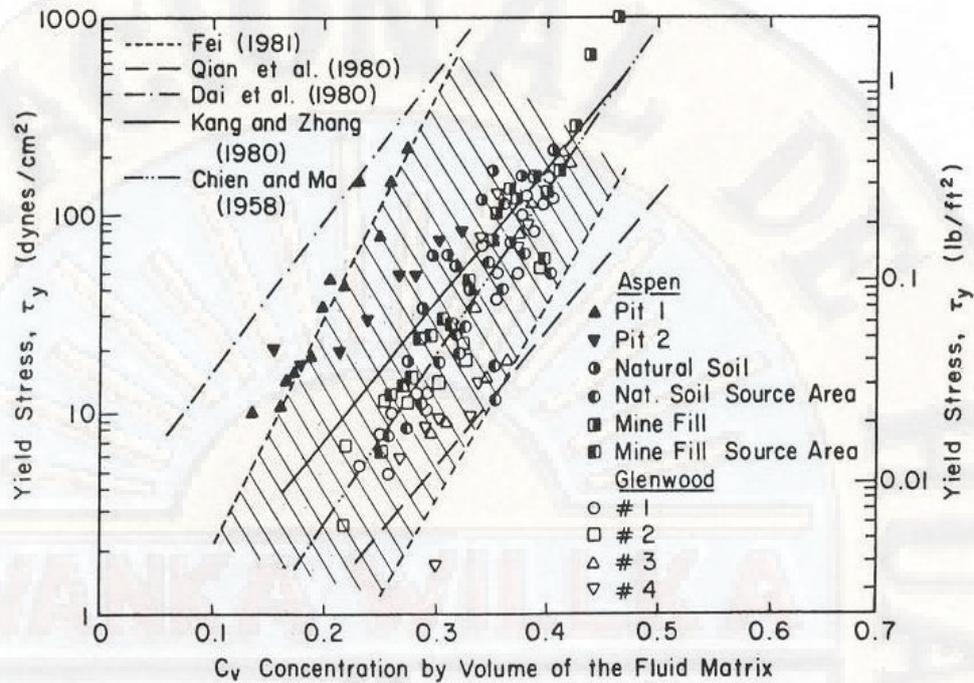
η_d : Es la viscosidad dispersiva.

Figura 36. Viscosidad dinámica de muestras de flujo de lodos vs concentración de sedimentos



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

Figura 37. Esfuerzo de cedencia de muestras de flujo de lodos vs concentración de sedimentos



Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

La viscosidad de la matriz fluida es también una función del porcentaje y del tipo de limos y arcilla y de la temperatura del fluido. Los flujos de barro muy viscosos tienen altas concentraciones del sedimento y en correspondencia, altas tensiones de cedencia y pueden dar lugar a flujo laminar, aunque los flujos laminares en naturaleza son extremadamente raros. Los flujos menos viscosos (crecidas de barro) son siempre turbulentos. O'Brien y Julien (1985) resumieron los resultados de investigaciones previas que se presentan en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Esfuerzo de cedencia y viscosidad como una función de la concentración de sedimentos

Yield Stress and Viscosity as a Function of Sediment Concentration				
Source	$\tau_y = \alpha_1 \cdot e^{\beta_1 \cdot C_v}$		$\eta = \alpha_2 \cdot e^{\beta_2 \cdot C_v}$	
	α_1	β_1	α_2	β_2
Field Data				
Aspen pit 1	0.181	25.7	0.036	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
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
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Available from the Literature				
Iida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.6	17.48	0.0075	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.0047	22.2	-	-

Fuente: Adaptado de (Castillo, 2006)

Para cada elemento de la malla y cada paso de tiempo, el modelo calcula el cambio en los volúmenes del agua y de sedimento y el correspondiente cambio en la concentración de sedimentos. Como resultado de la simulación se informan la cantidad de agua y sedimento que abandonan el área del estudio (salida) y los volúmenes de agua y sedimento almacenados en la planicie o en el cauce. Asimismo, el modelo calcula la extensión del área inundada por el barro y las profundidades y velocidades de flujo máximas como una función del sedimento disponible (Jaime, 2007).

2.2.4.2.1. Parámetro de resistencia al flujo laminar (K)

La resistencia al flujo laminar es un parámetro adimensional que varía de 24 a 50 000, donde el valor para K es 24 en canales lisos anchos rectangulares. Inicialmente se sugiere un valor de 2480 para análisis de flujos de lodo.

Si el valor de K es ingresado, éste será utilizado por el modelo. Sin embargo si $K = 0$, el modelo computará K en función de la rugosidad de Manning:

$$n < 0.01, K = 24 \quad (\text{II.62})$$

$$0.01 < n < 0.25, K = 1\,460\,865,81 \cdot n^{2.381} \quad (\text{II.63})$$

$$0.25 < n, K = 2480 \quad (\text{II.64})$$

Así mismo los valores de K están clasificados de acuerdo al tipo de superficie en la que pasa el flujo, las cuales están resumidas en la tabla siguiente:

Tabla 10. Parámetros de resistencia del flujo laminar (Manual Flo - 2D)

Superficie	Rango de K
Concreto/asfalto	24 – 108
Arena escasa	30 – 120
Superficie gradual	90 – 400
Arcilla escasa – suelo de marga erocionada	100 – 500
Poca vegetación	1000 – 4,000
Hierba corta de pradera	3,000 – 10,000
Cesped de hierba añil	7,000 – 50,000

Fuente: Adaptado de (Woolhiser, 1975)

Donde en esta tabla se clasifica el tipo de superficie en la que se está trabajando por el parámetro de flujo laminar (K).

2.2.4.3. Concentración volumétrica de sedimentos

Para un evento de flujo de escombros, se estima una distribución de C_v en el tiempo partiendo de un valor cercano a 0.2 y aumentando gradualmente hasta 0.35 o 0.45 dependiendo del tipo de sedimento de la cuenca. Si la cuenca produce flujo de detritos entonces se deben utilizar valores cercanos a 0.45. El pico de C_v debe ubicarse unos minutos antes del

pico del hidrograma líquido. Una clasificación dada por O'Brien en su manual de Flo - 2D se observa en la **Tabla 11**. Eventos de avenidas grandes tal como avenidas de 100 años puede contener demasiada agua para producir eventos de flujos de lodo viscosos. Eventos de lluvias más pequeñas tal como tormentas con período de retorno de 10 a 25 años puede tener mayor tendencia a crear flujos de lodo viscosos. La mayoría de cuencas con una historia de eventos de flujos de lodo y escombros tendrán un suministro de sedimento sustancial. Aún, tormentas muy pequeñas pueden generar oleadas de flujo de lodo.

La mayoría de flujos de lodo tienen un patrón distinto al desarrollo de una avenida. Inicialmente, agua limpia fluye de la cuenca lluvia escorrentía hasta llegar al vértice del abanico. Esto puede ser seguido por una oleada u ondas frontales de lodo y escombros (40 a 50% concentración por volumen). Cuando el pico llega, la concentración de sedimentos promedio generalmente decrece al rango de 30 a 40% por volumen. Sobre la rama decreciente del hidrograma, las oleadas de altas concentraciones pueden ocurrir.

En esta tabla se clasifican los tipos de flujos, la concentración volumétrica, la concentración en peso y las características de estos.

Tabla 11. Comportamiento de flujos de sedimentos en función de la concentración de sedimentos

Concentración de sedimentos			
Descripción del tipo de flujo	En volumen	En peso	Características del flujo
Deslizamientos	0,65 – 0,80	0,83 – 0,91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques.
	0,55 – 0,65	0,76 – 0,83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar.
Flujos de lodo (Mud flow)	0,48 – 0,55	0,72 – 0,76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.

	0,40 – 0,45	0,65 – 0,69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
Avenida de lodo (Mud flood)	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie horizontal; aparece la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie.
	0,30 – 0,35	0,54 – 0,59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo
	0,20 – 0,30	0,41 – 0,54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición inmóvil.
Inundación de agua (Water flood)	< 0,20	< 0,41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Fuente: User's manual Flo - 2D

La concentración de sedimentos (C_v), se puede expresar con distintas relaciones en las que ayuda a definir el tipo de flujo que se presenta. De estas relaciones mostramos las principalmente la concentración de sedimentos por volumen y la concentración de sedimentos por peso. Donde la concentración de sedimento por volumen C_v es dado por:

$$C_v = \frac{\text{Volumen del sedimento}}{\text{volumen del agua + sedimento}} \quad (\text{II.65})$$

Y la concentración de sedimentos por peso se expresa así.

$$C_v = \frac{C_w \cdot \gamma}{\gamma_s - C_w \cdot (\gamma_s - \gamma)} \quad (\text{II.66})$$

Donde:

γ : Peso específico del agua.

γ_s : Peso específico del sedimento.

C_w : Es la concentración del agua.

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

$$\gamma_m = \gamma + C_v \cdot (\gamma_s - \gamma) \quad (\text{II.67})$$

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y de momentum en el modelo Flo - 2D es resuelto mediante un esquema central de diferencias finitas. Además, el modelo emplea para el cálculo de la velocidad la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica.

En métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales, los cálculos se llevan a cabo en una malla localizada en plano $x - t$. La malla $x - t$ es una red de puntos definida al tomar incrementos de distancia de longitud incrementos de tiempo de duración Δt . Los esquemas numéricos transforman las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas de diferencias finitas.

Para la solución del método de diferencias finitas, el Flo - 2D emplea un esquema explícito, que consiste en un esquema simple que requiere de valores pequeños Δx y Δt para la convergencia del procedimiento numérico.

Para la estabilidad numérica de los cálculos, una condición necesaria pero no suficiente para la estabilidad de un esquema explícito es la condición de Courant - Friedrich - Lewy (CFL). El paso de tiempo Δt es limitado por:

$$\Delta t = C \cdot \frac{\Delta x}{(v + c)} \quad (\text{II.68})$$

Donde:

C : Es el número de Courant ($0.3 < C < 1.0$).

Δx : Es el ancho del elemento de la malla cuadrada.

v : Es la velocidad promedio de la sección transversal calculada.

c : Es la celeridad de la onda calculada.

Para el tránsito de onda dinámica, otro criterio de estabilidad numérica aplicado en el modelo es el de Ponce y Theurer (1982). Este criterio está en función de la pendiente del lecho, la descarga y el tamaño del elemento de grilla. El paso de tiempo es limitado por:

$$\Delta t < \frac{\zeta S_o \Delta x^2}{q_o} \quad (\text{II.69})$$

Donde q_o es la descarga unitaria, S_o es la pendiente del lecho y ζ es un coeficiente empírico (Ponce y Theurer, 1982).

Los pasos de tiempo Δt generalmente varían de 0.1 segundo a 60 segundos. El modelo comienza con un paso de tiempo mínimo y lo aumenta hasta que uno de los criterios de estabilidad numérica sea excedido, entonces el paso de tiempo es disminuido. Si los criterios de estabilidad continúan siendo excedidos, entonces el paso de tiempo es disminuido hasta que el paso de tiempo mínimo sea alcanzado. Los pasos de tiempo son una función de la descarga del flujo para un elemento de grilla y de su tamaño.

2.2.4.4. Lógica del Flo - 2D.

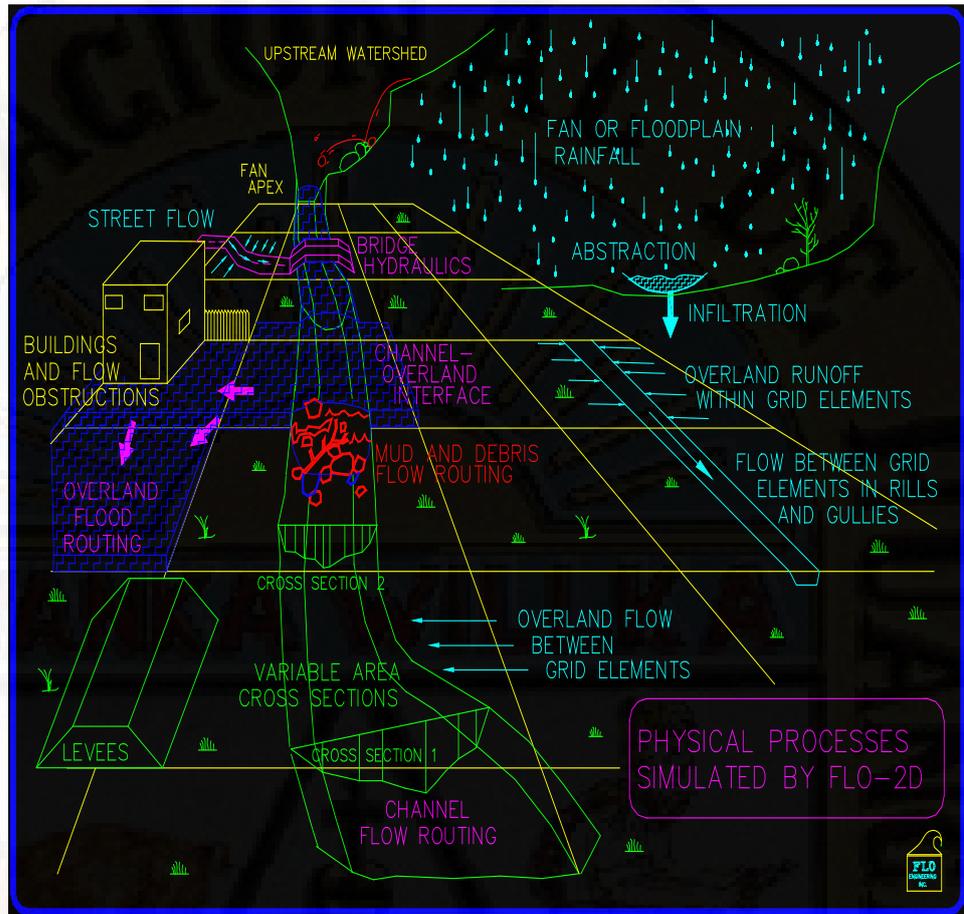
2.2.4.4.1. Atributos del modelo Flo - 2D

El Flo - 2D es un modelo de tránsito de avenidas bidimensional, actualmente Jim O'Brien es el presidente de Flo - 2D software S.A, y creador del modelo.

El modelo hidráulico Flo - 2D ha sido aprobado por FEMA para estudios ribereños y análisis de avenidas. Entre los principales atributos de este modelo se encuentran:

- Tránsito de hidrogramas de avenida.
- Flujo no confinado superficial en 8 direcciones.
- Modelación de ríos y canales.
- Las calles son modeladas como canales rectangulares.
- Análisis hidrológico: lluvias, evaporación, infiltración y abstracción.
- Simulación de flujos de lodo.
- Transporte de sedimentos.
- Estructuras hidráulicas.

Figura 38. Procesos físicos simulados por el modelo Flo - 2D

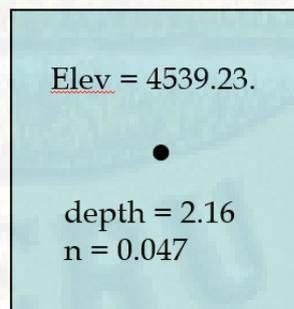


Fuente: User's manual Flo - 2D

2.2.4.4.2. Algoritmo del Flo - 2D

Los elementos de celda son presentados por (elevación, tirante del flujo, valor de n , ancho del contorno o grilla).

Figura 39. Elementos de una celda



Fuente: User's manual Flo - 2D

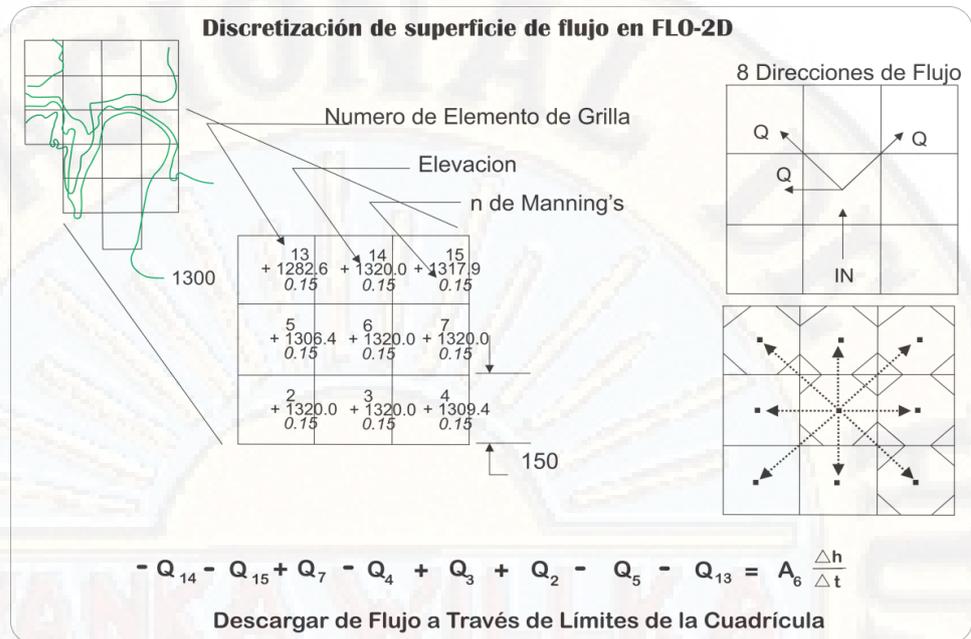
La topografía de la superficie se discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning) y factores de reducción del flujo que atraviesa la celda.

El procedimiento computacional para flujos superficiales involucra el cálculo de la descarga a través de cada uno de las fronteras en las ocho direcciones del flujo. Las direcciones de flujo incluyen las cuatro direcciones de la brújula y las cuatro direcciones diagonales.

El cálculo hidráulico de cada elemento de grilla empieza con una estimación de la profundidad del flujo en la frontera del elemento de grilla. La profundidad estimada del flujo es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de grilla que comparten descarga en una de las ocho instrucciones. Los otros parámetros hidráulicos son también promediados para computar la velocidad de flujo incluyendo resistencia de flujo (n de Manning), área del flujo, pendiente, elevación, elevación de la superficie de agua y perímetro mojado.

El Flo - 2D solucionará ya sea la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica completa para computar la velocidad. La ecuación de Manning es luego aplicada en una dirección usando el promedio de la pendiente de la superficie de agua para calcular la velocidad. Si la ecuación de onda difusiva es seleccionada, la velocidad es entonces calculada para todas las ocho direcciones del flujo en cada elemento de grilla. Si la opción de onda dinámica completa es aplicada, la velocidad de onda difusiva calculada es utilizada como primera aproximación en el método de segundo orden de Newton Raphson de tangentes para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica completa, el cual es una ecuación diferencial parcial de segundo orden no lineal.

Figura 40. Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta



Fuente: Adaptado de (Escobar Soto, 2018)

El algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos donde cada elemento de grilla posee un único valor de rugosidad, elevación y profundidad del flujo:

1. El promedio de los valores de rugosidad y geometría del flujo entre dos elementos de grilla son calculados.
2. La profundidad del flujo d para el cálculo de la velocidad a través de la frontera de grilla para el siguiente paso de tiempo $(i + 1)$ es estimado de los pasos de tiempo previos i usando una función lineal (promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos).

$$dx^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad (\text{II.70})$$

3. La velocidad es calculada usando la ecuación de onda difusiva como primera aproximación. La única variable no conocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad.

4. Si la ecuación de onda dinámica completa es seleccionada por el usuario, la velocidad de onda difusiva prevista para ese paso de tiempo es usado como un dato inicial en la solución de Newton - Raphson. Se hace nota que para flujos de sedimentos hiperconcentrados, como flujos de lodo y escombros, el cálculo de la velocidad incluye los términos adicionales de viscosidad y esfuerzo de cedencia.
5. La descarga Q a través de la frontera de la planicie de inundación (o entre dos elementos de canal) es calculado multiplicando la velocidad por el área transversal del flujo.
6. Los incrementos de descarga para el paso de tiempo a través de las 8 fronteras son sumados.

$$\Delta Q_x^{+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad (\text{II.71})$$

7. y la variación en volumen es distribuido sobre el área de almacenamiento disponible dentro del elemento de grilla o canal para determinar el incremento en la profundidad del flujo.

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / \text{Area} \quad (\text{II.72})$$

8. Donde ΔQ_x es el delta de la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación para el elemento de grilla y para el paso de tiempo Δt entre el tiempo i e $(i + 1)$.
9. El criterio de estabilidad numérica es luego chequeado para la nueva profundidad del flujo del elemento de grilla. Si cualquier criterio de estabilidad es excedido, el tiempo de simulación es reseteado para el tiempo previo y el incremento del paso del tiempo es reducido.

10. La simulación prosigue incrementándose el paso de tiempo hasta que el criterio de estabilidad sea excedido.

2.2.4.5. Mapa amenaza o peligro

Alrededor del mundo, la cartografía de riesgo de inundación aluvial se utiliza para regular el desarrollo para evitar daños por inundaciones y pérdida de vidas. El riesgo de inundación en una ubicación específica es una función de la intensidad de inundación y la probabilidad. La intensidad de la inundación se determina por la velocidad del flujo. La probabilidad de inundación está inversamente relacionada con la magnitud de la inundación; Es decir, grandes inundaciones ocurren con menor frecuencia (García, López, Noya, Bello, & González, 2003).

El riesgo de inundación se define entonces como una función discreta combinada de la intensidad del evento (gravedad del evento) y el período de retorno (frecuencia). Diferentes países adoptan diferentes criterios para definir una intensidad del peligro, algunas de las cuales son las siguientes:

- USA : $f(h)$
- Austria : $f(h, \frac{v^2}{2g})$
- Switzerland : $f(h, v, h)$

De estos criterios se puede observar que el mapa de amenaza por inundación depende de un tirante, una velocidad y un periodo de retorno.

Los criterios del mapa de riesgos presentados aquí se propusieron por primera vez para dos abanicos aluviales en Caracas, Venezuela y posteriormente se aplicó a otras cuencas urbanizadas. Este enfoque sigue las normas Suizas y Austriacas que establecen tres zonas para delinear los niveles de riesgo de inundación, como se muestra en la **Figura 41**.

Figura 41. Niveles de peligro de inundación basados en l 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%

Fuente: Adaptado de Office Federal de i OEconomie Des Aux (OFEE)

La intensidad de la inundación está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad es inversamente proporcional a la magnitud de la inundación. Por eso, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia, pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes, pero menos dañinos.

Los colores de mapa se traducen en áreas de peligro potencial específicas como se muestra en la **Tabla 12**, Los colores de los mapas se traducen en áreas con características específicas de amenaza potencial.

Tabla 12. Definición de nivel de amenaza según García, Rodríguez y O'Brien

Niveles de amenaza	Color en el mapa	Descripción
Alto	Rojo	Las personas están en peligro, tanto dentro como fuera de las casas. Las edificaciones pueden ser destruidas
Medio	Naranja	Las personas están en peligro fuera de las casas. Las edificaciones pueden sufrir daños y posiblemente destrucción, dependiendo de los materiales con los que han sido construidas
Bajo	Amarillo	El peligro para las personas es bajo o inexistente. Las edificaciones pueden sufrir un ligero daño, pero los sedimentos pueden afectar el interior.

En **MAPPER** podemos introducir valores de profundidad de flujo y velocidades que definen los umbrales de intensidad. Para el caso de las inundaciones de agua, las intensidades de inundación podrían definirse por los valores de la **Tabla 13**, mientras que los flujos de lodos y escombros que son más destructivos que las inundaciones de agua se definen por los valores de la **Tabla 14**, los criterios de intensidad de los flujos de lodo y escombros son más complejos.

Tabla 13. Definición de la intensidad de inundación de agua (*Water flood*)

Flood intensity	Máximum depth h(m)	Logical operation	Product of max Depth h times max velocity v(m²/s)
High	H > 1.0m	OR	V * H > 1.0m ² /s
Medium	0.2m < H < 1.0m	OR	0.2m ² /s < V * H < 1.0m ² /s
Low	0.2m < H < 1.0m	AND	V * H < 0.2m ² /s

Fuente: Adaptado de Office Federal de i OEconomie Des Aux (OFEE), 1997

Tabla 14. Definición de la intensidad de inundación de flujos de lodo y escombros (*Mud and debris flow*)

Flood intensity	Máximum depth h(m)	Logical operation	Product of max Depth h times max velocity v(m²/s)
High	H > 1.0m	OR	V * H > 1.0m ² /s
Medium	0.2m < H < 1.0m	OR	0.2m ² /s < V * H < 1.0m ² /s
Low	0.2m < H < 1.0m	AND	V * H < 0.2m ² /s

Fuente: Adaptado de Office Federal de i OEconomie Des Aux (OFEE), 1997

Los criterios de peligro abarcan la probabilidad de ocurrencia de un evento de agua o de flujos de lodo durante tres días de inundación seleccionado. Esto requiere una simulación Flo - 2D de los tres eventos de frecuencia de inundación.

El modelo predice las profundidades y velocidades máximas para cada período de retorno inundación determina el riesgo sobre la base de los criterios anteriores. Un gráfico interpolado de color sombreado de los

elementos de la cuadrícula representa el riesgo de inundación bajo, medio y alto.

Este método representa una verdadera medida del riesgo de inundación y se utiliza efectivamente en otros países. Las ventajas de este método son claramente evidentes. No se necesitan alturas de inundación de base, contornos de inundación o elevación de un edificio de primer piso de un mapa de tasas de seguro contra inundaciones de FEMA para interpretar el peligro de inundación. Desde una perspectiva del mapa FEMA DFIRM, esto significa que la elevación de inundaciones por sí sola no es necesariamente una indicación de riesgo de inundación. El método del mapa prescrito proporciona una oportunidad inmediata para que el público en general entienda si un edificio o vecindario dado está dentro de un área de alto riesgo de inundación. El administrador de llanuras de inundación puede planificar, regular y establecer una zona de manera decisiva en base a este mapa de riesgo de inundación y puede comunicar fácilmente el proceso de planificación y el peligro para la comunidad (Rozelle, Bausch, McNabb, & Robles-Kyle, 2011).

2.3. Bases conceptuales

2.3.1. Subcuenca

Se habla de subcuencas para referirse a los territorios que drenan por cursos de agua que desembocan en el curso principal de una cuenca; es decir, la cuenca se subdivide en subcuencas que corresponden a los cursos de agua que finalizan en el curso principal (Avendaño, 2016).

Comentario “una subcuenca es toda área en la que su drenaje va directamente al cauce principal de la cuenca que, como uno de los resultados del proceso hidrológico, la precipitación, se produce un flujo superficial que durante su recorrido van formando quebradas y ríos, las cuales al unirse forman un curso de agua principal así mismo es importante señalar que las cuencas están conformadas por un grupo de subcuencas de menor tamaño”.

2.3.1.1. Hidrológicas

Para la simulación de los flujos de lodo y escombros es necesario realizar un análisis hidrológico de la subcuenca y su influencia sobre el hidrograma líquido, lo cual es una gráfica que muestra la tasa del flujo como función del tiempo en un lugar dado de la corriente. En efecto, el hidrograma es "una expresión integral de las características fisiográficas climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Ven te Chow , 1994).

Para la estimación del hidrograma, es necesario realizar un análisis geomorfológico de la subcuenca, el tiempo de retardo, el número de curva (CN) y la precipitación máxima de 24 horas.

2.3.1.2. Geomorfológicas

La geomorfología tiene por objeto la descripción de las formas del terreno, la explicación de su génesis, es decir de su origen y evolución a través del tiempo geológico, así como la explicación y descripción de los agentes geomorfológicos modeladores, a este proceso se le conoce como ciclo geográfico. (Chahua Janampa, 2016)

El relieve terrestre va evolucionando en la dinámica del ciclo geográfico mediante una serie de procesos constructivos y destructivos que se ven permanentemente afectados por la fuerza de gravedad que actúa como equilibradora de los desniveles; es decir, hace que las zonas elevadas tiendan a caer y colmatar las zonas deprimidas. Estos procesos hacen que el relieve transite por diferentes etapas. La interacción de los distintos procesos que suceden en la superficie terrestre, resultan los procesos morfogénicos sucesivos, como la erosión, el transporte y la sedimentación, y el principal agente modelador es el agua. Los distintos procesos del agua como agente modelador, se le conoce como dinámica fluvial (Chahua Janampa, 2016).

2.3.1.3. Geodinámicos

La Geodinámica es una rama de la Geología, que trata de los agentes y las fuerzas que intervienen en los procesos dinámicos de la Tierra. Estudia los procesos físicos de la tierra y su evolución temporal. Uno de los principales son los movimientos en masa, los cuales son parte de los procesos (Cruden, 1991).

2.4. Definición de términos

- a) **Fluido:** Según Banda (2015), un fluido es un líquido que se deforma de manera persistente, es decir presentan poca resistencia respecto a las fuerzas tangenciales o cortantes que se dan, también llamados fluidos newtonianos por otro lado los fluidos con mayor resistencia se les llama fluidos no-newtonianos.
- b) **Fluido newtoniano:** Según Banda (2015), en este tipo de fluido la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación es lineal, en otras palabras, este tipo de fluidos son los llamados fluidos puros como el agua limpia.
- c) **Fluido no newtoniano:** Según Banda (2015), este tipo de fluidos por lo general comprenden mezclas de barro, aceites viscosos, fluidos orgánicos, entre otros. Para el caso de lodos y escombros la descripción está en este apartado, asimismo ésta presenta dos tipos de fluidos según su resistencia.
- d) **Fluido pseudoplástico:** Según Banda (2015), en este tipo de fluido, se presenta una menor resistencia respecto al flujo, es decir el fluido escurrirá de manera más fácil siempre en cuando exista una fuerza que la presione, como ejemplo se tiene la sangre o el barro.
- e) **Flujos de lodos:** Según Castillo (2006), los flujos de lodo están compuestos principalmente por concentraciones de material fino (limos

y arcillas), las cuales son descritos como flujos viscosos además la deposición final del flujo mantendrá una estructura dinámica en su movimiento originando filas de dunas en dirección del flujo, durante la sedimentación las partículas se mueven de manera integral.

- f) **Flujo de escombros:** Iverson (1997), afirma que los flujos de escombros se originan cuando las masas de sedimento se agitan, cuando la graduación es deficiente o se encuentran saturadas de agua, las cuales caen precipitadamente debido a la gravedad.
- g) **Flujos hiperconcentrados:** (Rodrigues, 2017), afirma que los flujos hiperconcentrados se pueden clasificar en inundaciones de lodo y flujo de escombros. Y define como eventos de crecidas con concentraciones de sedimentos que superan el 20% en volumen.
- h) **Modelo matemático Flo - 2D:** Según Gamión (2014), el modelo bidimensional de diferencias finitas Flo - 2D (O'Brien) simula flujo de fluidos no newtonianos, como aludes torrenciales, en conos de deyección. El modelo permite simular flujo en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y planicies de inundación, así como el intercambio de fluido entre los canales y la planicie de inundación. Puede modelarse flujo de agua, flujo hiperconcentrado de sedimentos, flujo de barro y alud torrencial (flujo de barro). Como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua-sedimento.
- i) **Simulación:** Según Davies & McSaveney (2002), una simulación por computadora, un modelo de simulación por computador o un modelo informatizado es un programa informático cuyo fin es crear una simulación de un modelo abstracto de un determinado sistema. Las simulaciones por computadora se han convertido en una parte relevante

y útil de los modelos matemáticos de muchos sistemas naturales de ciencias como la física, la astrofísica, la química y la biología, etc. Las simulaciones por computadora abarcan desde programas informáticos cuya ejecución dura unos minutos hasta conjuntos de ordenadores conectados en red cuya ejecución dura horas, e incluso hay simulaciones que se extienden varios días.

- j) Tiempo de concentración:** Según Gribbin (2007), es el tiempo que transcurre entre el inicio de la lluvia y el establecimiento del caudal de equilibrio. Es el tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca.
- k) Periodo de retorno:** Steijn (1996), menciona que es el inverso de la probabilidad de que ocurra un evento determinado en el lapso de un año. Lapso promedio de tiempo entre eventos naturales de magnitud o intensidad comparables. Es cercanamente igual a la inversa de la probabilidad anual de excedencia.
- l) Amenaza:** Vallance & Scott (1997), dice que es un evento o fenómeno perjudicial con un cierto nivel de magnitud o alcance, que tiene una probabilidad de ocurrencia significativa en un período de tiempo dado.
- m) Riesgo:** Según Fuchs, Heiss, & Hübl (2007), es la posibilidad de afectar significativamente las vidas o bienes a causa de un fenómeno dañino que tiene una probabilidad determinada de ocurrir dentro de un período de tiempo dado.
- a) Sedimento:** Según Gamión (2014), se entiende por sedimento a cualquier material más pesado que el agua, que es transportado en algún momento por la corriente y luego depositado.

2.5. Hipótesis

La presente investigación por el nivel en el que se desarrolla no presenta hipótesis. Según Hernández, et al. (2014, p.104), “No en todas las investigaciones cuantitativas se plantean hipótesis. El hecho de que planteemos o no hipótesis depende de un factor esencial. El alcance inicial del estudio”.

2.6. Variables

2.6.1. Variable 01

- Subcuenca del río Sicra.

- Geomorfológicas.
- Hidrológicas.
- Geodinámicos.

2.6.2. Variable 02

- Flujos de lodo y escombros.

- Cantidad de sedimento transportado.
- Profundidad de sedimento.
- Magnitud de la velocidad del sedimento.
- Fuerzas de impacto del sedimento.
- Presiones estáticas del sedimento.
- Energías específicas del sedimento.
- Zonas de inundación (mapa de peligro).

2.7. Operacionalización de variables

Tabla 15: Operacionalización de variables

	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable 01					
Subcuenca del río Sicra	(Villon, 2002) Afirma que es toda área que desarrolla su drenaje directamente al curso principal de la cuenca	Superficie terrestre en donde las precipitaciones que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes.	Geomorfológicos	Parámetros de la subcuenca	Ordinal
				Concentración volumétrica (Cv)	
				Numero de curva (CN)	
			Hidrológicos	Precipitaciones Máximas P24 (mm)	
				Caudal Máximo (m3/s)	
			Geodinámicos	Volumen de deslizamientos (m3)	
Áreas con erosión (m2)					
Variable 02					
Flujos de lodo y escombros	(Rodríguez, 2017) Define que los flujos de lodo y escombros son eventos de crecidas con concentraciones de sedimentos que superan el 20% en concentración volumétrica.	Son mezclas de partículas gruesas y finas con agua donde predominan arenas, gravas, cantos y bloques.	Cantidad de sedimento transportado	Metros cúbicos	Ordinal
			Profundidad de sedimento	Metros	
			Magnitud de la velocidad del sedimento	Metros por segundo	
			Fuerzas de impacto del sedimento	Newton por metro	
			Presiones estáticas del sedimento	Newton por metro	
			Energías específicas del sedimento	Metros	
			Zonas de peligro (mapas de peligro)	Kilómetros cuadrados, metros cuadrados	

Fuente: Elaboración propia

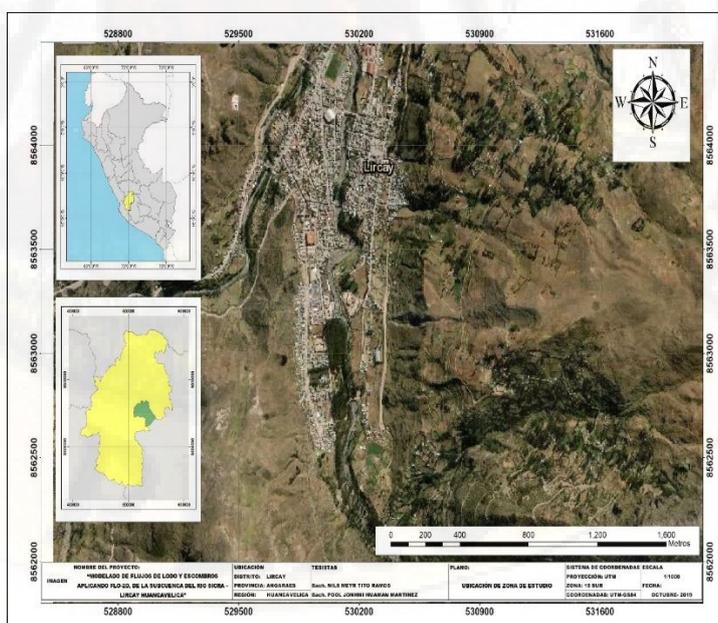
CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. **Ámbito temporal y espacial**

La presente investigación se realizó en la subcuenca del río Sicra, ubicado en el distrito de Lircay, provincia de Angaraes del departamento de Huancavelica, durante el periodo de enero 2019 a noviembre 2019.

Figura 43. Vista satelital de distrito de Lircay, capital de la provincia de Angaraes



Fuente: Adaptado de (Imagen Satelital Landsat, 2015)

3.2. Tipo investigación

Según Hernández et al. (2014), el tipo de investigación que se utilizó fue aplicada porque se aplicaron modelos ya establecidos por otros investigadores en la medición de flujos de lodo y escombros.

3.3. Nivel de investigación

Según Bernal (2010) el investigador utilizó el método deductivo, pues se partieron de nociones generales como es el modelo Flo - 2D, para ser aplicado a un fenómeno en específico como lo es la subcuenca del río Sicra y de esta manera analizar los resultados. En consecuencia, la investigación es del nivel descriptivo. Según Hernández et al., (2014, p.92), “Con los estudios descriptivos se busca especificar., las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a análisis”.

3.4. Población, muestra y muestreo.

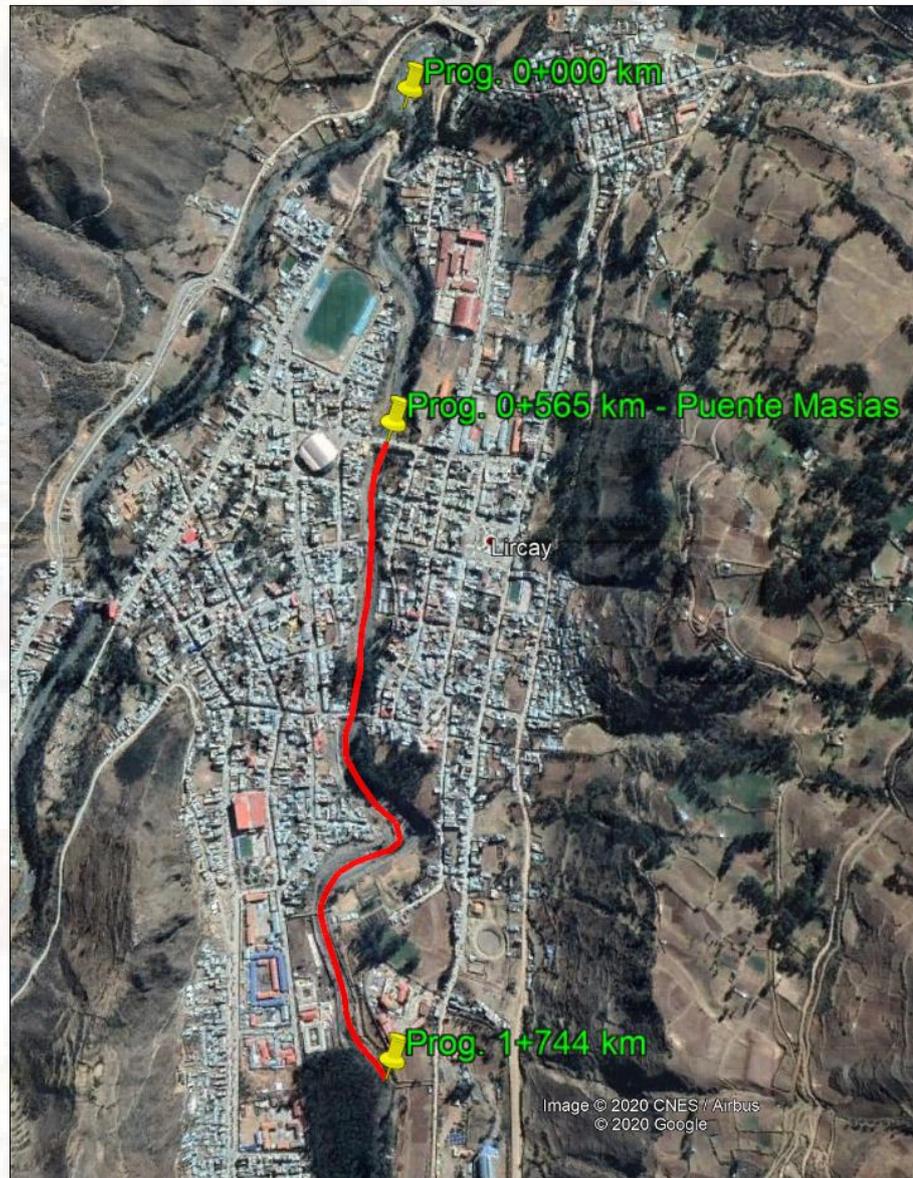
3.4.1. Población

Según Hernández (2014), la población es el conjunto de observaciones con los mismos detalles definidos. En la presente tesis la población es la subcuenca del río Sicra.

3.4.2. Muestra

La muestra fue de tipo no probabilístico, de progresiva 0+565 km al 1+744 km, del cauce principal del río Sicra (área urbana del distrito de Lircay).

Figura 44. Vista satelital del cauce del río Sicra – Prog. 0+565 km al 1+744 km



Fuente: Adaptado de (Google earth, 2019)

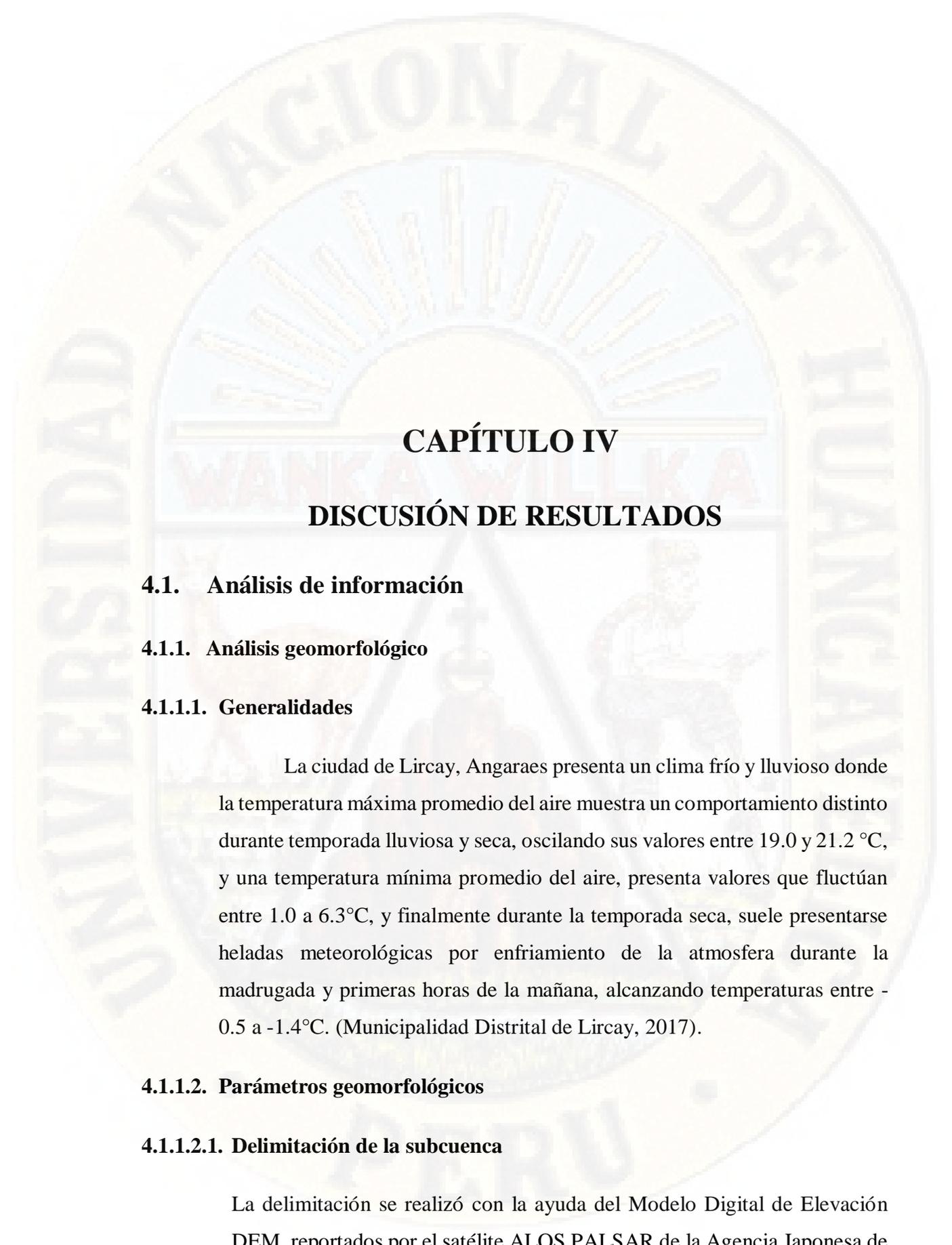
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Según Hernández (2014), la observación es una técnica que consiste en el registro sistemático, valido, y confiable de un hecho o fenómeno a través de tablas o cuadros. También el acopio de datos es muy útil pues con ella se hizo el registro de lo observado, mediante tablas de datos, fichas bibliográficas entre otros. Los instrumentos empleados para esta investigación se basaron en la

búsqueda y la recopilación de información bibliográfica, luego el trabajo en campo, finalmente el procesamiento de datos en gabinete.

3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento de datos se utilizó el modelo bidimensional de diferencias finitas Flo - 2D para la generación de mapas de peligro por flujos de lodo y escombros en la subcuenca del río Sicra.



CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de información

4.1.1. Análisis geomorfológico

4.1.1.1. Generalidades

La ciudad de Lircay, Angaraes presenta un clima frío y lluvioso donde la temperatura máxima promedio del aire muestra un comportamiento distinto durante temporada lluviosa y seca, oscilando sus valores entre 19.0 y 21.2 °C, y una temperatura mínima promedio del aire, presenta valores que fluctúan entre 1.0 a 6.3°C, y finalmente durante la temporada seca, suele presentarse heladas meteorológicas por enfriamiento de la atmosfera durante la madrugada y primeras horas de la mañana, alcanzando temperaturas entre -0.5 a -1.4°C. (Municipalidad Distrital de Lircay, 2017).

4.1.1.2. Parámetros geomorfológicos

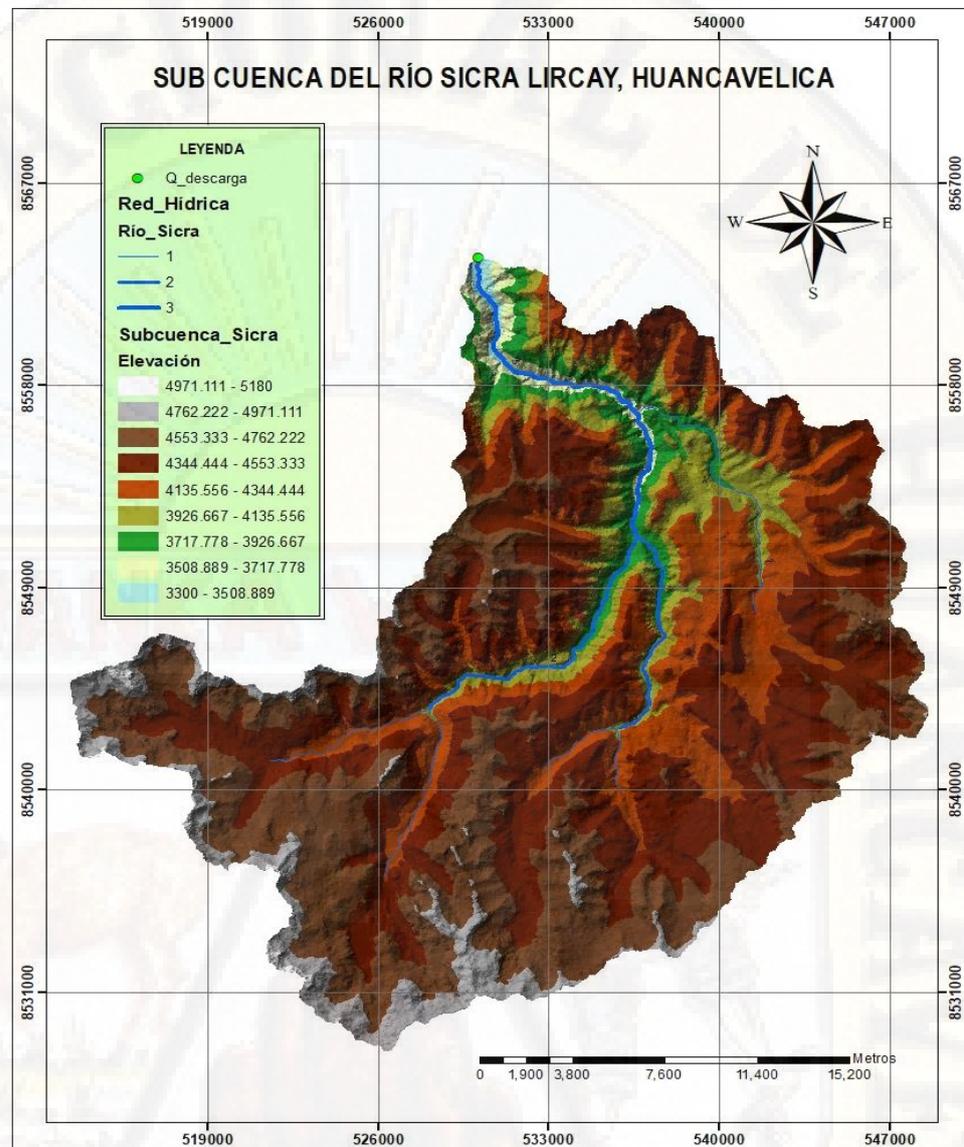
4.1.1.2.1. Delimitación de la subcuenca

La delimitación se realizó con la ayuda del Modelo Digital de Elevación DEM, reportados por el satélite ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de

Exploración Aeroespacial "DAICHI" que colectó imágenes de radar en escenas de 50x70 km con alta resolución de 12.5m, de todo el planeta cada 45 días aproximadamente a través de su sensor PALSAR (*Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar*). En consecuencia, se descargó las imágenes satelitales en formato raster de la zona de estudio para proceder a determinar las curvas de nivel, red de drenaje y delimitar la subcuenca y las microcuencas del río Sicra.

La subcuenca del río Sicra fue delimitada con un punto de descarga de caudal en las coordenadas planas UTM 530093.24 E, 8563705.41 S (Datum WGS84 zona 18S), que se ubica en el puente "Masias" del cercado de la ciudad de Lircay, Angaraes **Figura 45**. Esto debido a que la mayor parte de aportantes de material sólido proviene de derrumbes, deslizamiento de rocas y laterales, debido a las fuertes precipitaciones y caudales extremos, desde la cabecera hasta las tres cuartas partes de la cuenca que al mezclarse estos materiales con los flujos de agua forman los flujos de lodo y escombros.

Figura 45. Delimitación de la subcuenca del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2.2. Caracterización geomorfológica

Después de delimitar la subcuenca del río Sicra se obtuvo los siguientes parámetros con ayuda del software ArcMap 10.4.1, El área de la cuenca, el perímetro, parámetros de centroide, altitud y propiedades de la red hídrica como la longitud de cuenca o longitud hidráulica, medida a lo largo del curso de agua principal, para lo cual se presenta dichos parámetros estimados para dicha subcuenca en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Cuadro resumen de las características morfológicas de la subcuenca Sicra

DESCRIPCIÓN	UND	VALOR
Área	km ²	630.16
Perímetro de la cuenca	km	143.66
COTAS		
Cota máxima	msnm	5190
Cota mínima	msnm	3300
CENTROIDE (PCS: WGS 1984 UTM, Zona 18S)		
X Centroide	m	532055.38
Y Centroide	m	8545475.3
Z Centroide	msnm	4444.24
ALTITUD		
Altitud media	msnm	4444.24
Altitud más frecuente	msnm	4546
Altitud de frecuencia media	msnm	4405.39
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	6.58
PROPIEDADES DE LA RED HÍDRICA		
Longitud del curso principal	km	51.91
Orden de la red hídrica	UND	8
Longitud de la red hídrica	km	3846.23
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.07

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.2.3. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

La representación gráfica del relieve de la subcuenca del río Sicra se muestra en la **Figura 46**, el cual indica el porcentaje de área de la superficie de la sub cuenca en km^2 mostradas en la **Tabla 17**, donde se puede observar el alto grado de potencial erosivo de la cuenca (fase de juventud), lo cual en eventos máximos determina la ocurrencia de deslizamientos laterales que permite la formación de flujos de lodo y escombros por erosión fluvial.

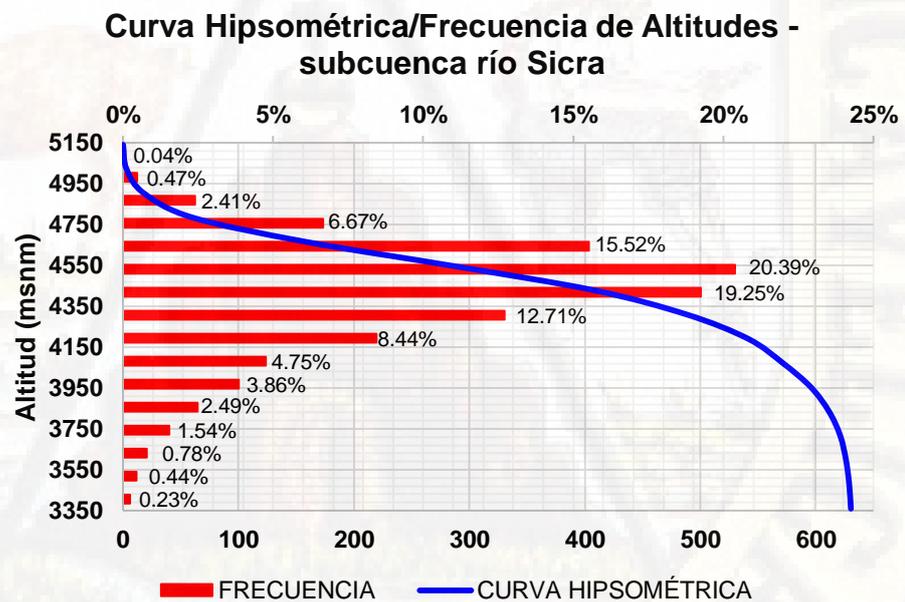
Tabla 17. Cuadro resumen de las características morfológicas de la subcuenca Sicra

Nro	Altitud (msnm)			Área (km ²)			
	Mín.	Máx.	Promedio	Parcial	Acumulado	% Acum.	% Parcial
1	3300	3418	3359	1.43	630.52	100	0.23
2	3419	3537	3478	2.80	629.08	99.77	0.44
3	3538	3656	3597	4.93	626.28	99.33	0.78

4	3657	3774	3715.5	9.70	621.35	98.55	1.54
5	3775	3893	3834	15.69	611.65	97.01	2.49
6	3894	4012	3953	24.32	595.96	94.52	3.86
7	4013	4130	4071.5	29.96	571.63	90.66	4.75
8	4131	4249	4190	53.20	541.67	85.91	8.44
9	4250	4368	4309	80.16	488.47	77.47	12.71
10	4369	4486	4427.5	121.40	408.31	64.76	19.25
11	4487	4605	4546	128.57	286.91	45.50	20.39
12	4606	4724	4665	97.88	158.35	25.11	15.52
13	4725	4842	4783.5	42.07	60.47	9.59	6.67
14	4843	4961	4902	15.16	18.40	2.92	2.41
15	4962	5080	5021	2.95	3.23	0.51	0.47
16	5081	5199	5140	0.28	0.28	0.04	0.04
Total =				630.52			

Fuente: Elaboración propia

Figura 46. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes - subcuena del río Sicra, (cuena en fase de juventud)



Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Análisis hidrológico

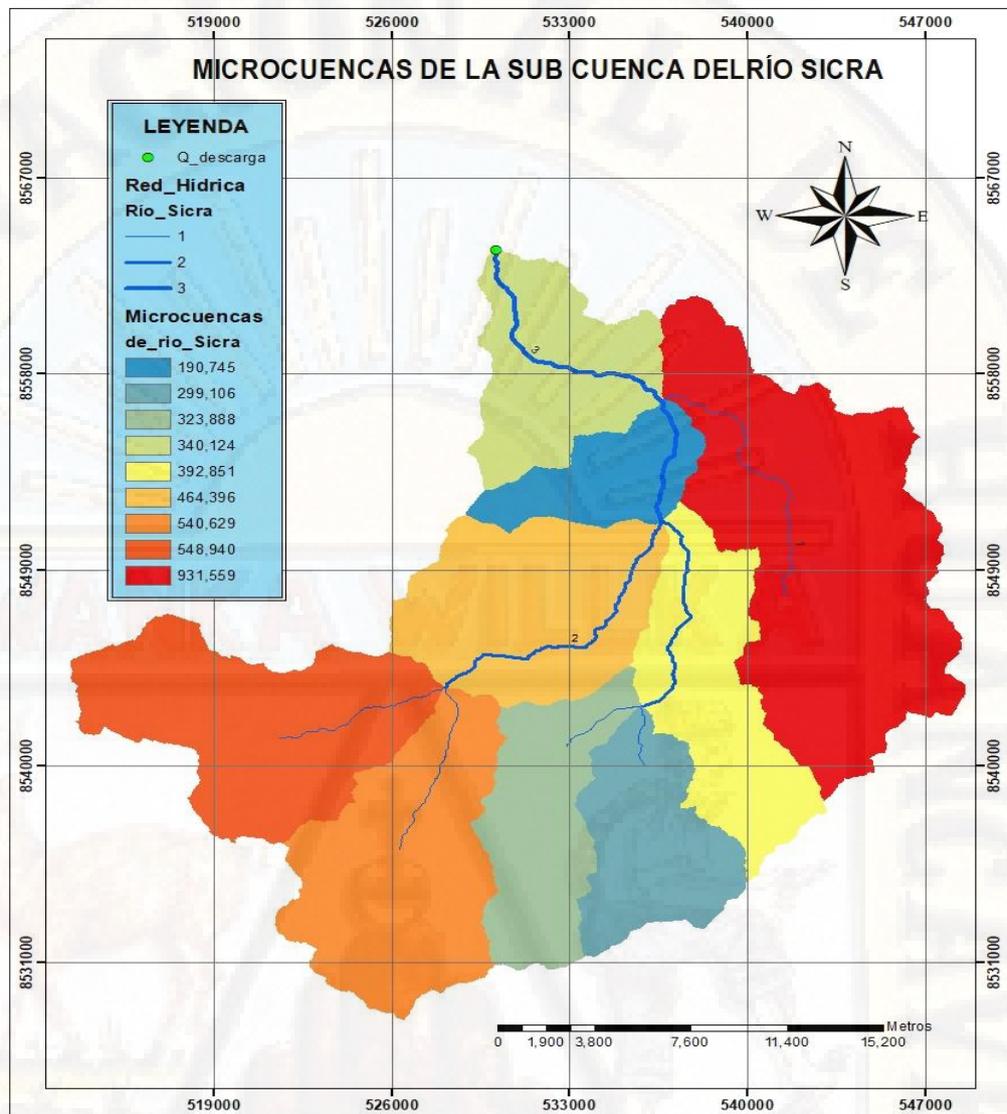
La fuente de agua disponible y considerada en el estudio es el producto PISCO (Peruvian Interpolation of the SENAMHIs Climatological and

Hydrological Stations) debido a que solamente se cuenta con una sola estación meteorológica en el distrito de Lircay y provincia de Angaraes, las estaciones cercanas se encuentran alejadas para poder hacer uso de métodos tradicionales y poder determinar una precipitación real que represente a todo la subcuenca del río Sicra.

PISCO es información interpolada de datos climatológicos e hidrológicos a nivel nacional y tiene una resolución ~ 5km. Actualmente se tiene elaborado el producto PISCO para la variable precipitación la misma que comprende el período desde enero de 1981 a paso de tiempo mensual en formato Raster (tif), el cual fue procesado mediante el software libre “R” v.3.5.0 a fin de obtener datos en formato .xlsx.

El área de estudio se define mediante nueve microcuencas de diferentes áreas, en el cual se optó por usar la metodología de la investigación realizada denominada “Modelamiento Hidrológico en una Cuenca Andino-Amazónica utilizando datos grillados del producto Pisco”, realizado y expuesto por el especialista en hidrología del Senamhi (Cristhian Montesinos Cáceres) en abril del 2019, en ese sentido se ha optado delimitar en nueve micro cuencas más representativos de la subcuenca del río Sicra **Figura 47.** y **Tabla 18.**

Figura 47. Delimitación de 09 microcuencas más representativas de la subcuenca del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

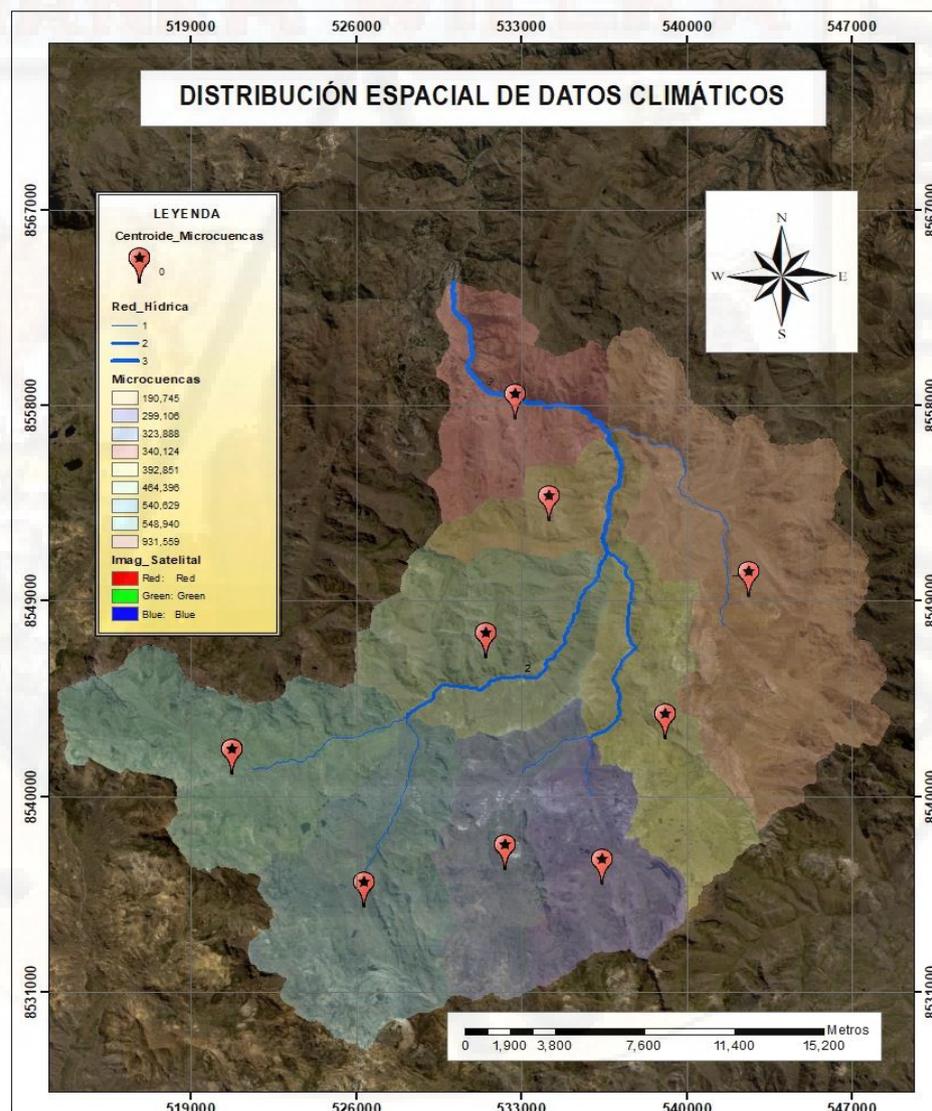
Tabla 18. Resumen de áreas y perímetros de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra

Descripción	Área (km ²)	Perímetro (km)	Cota máxima	Cota mínima
Subcuenca 01	53.28	36.51	4740	3300
Subcuenca 02	29.62	27.37	4840	3620
Subcuenca 03	145.74	71.32	4800	3620
Subcuenca 04	72.62	36.52	4882	3731
Subcuenca 05	61.57	49.26	4750	3729
Subcuenca 06	46.64	35.37	4920	4100
Subcuenca 07	50.63	41.34	4980	4100
Subcuenca 08	84.54	47.08	5180	4100
Subcuenca 09	85.50	48.02	5140	4100

Fuente: Elaboración propia

Consecuentemente, debido a que solo una de las nueve microcuencas del área de estudio cuenta con información meteorológica, limita el tratamiento de datos de precipitaciones máximas en 24 horas para toda la subcuenca del río Sicra, para lo cual una de las soluciones fue el que utilizó el especialista en Senamhi (Montesinos Cáceres, 2019), que consiste en crear una estación virtual el cual fue ubicada en el centroide de cada microcuenca para lograr una buena distribución espacial de datos climáticos.

Figura 48. Estaciones climáticas virtuales ubicadas en los centroides de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Ubicación de las estaciones climáticas virtuales empleadas en este estudio

Estación climática virtual	Centroide (Coordenadas UTM)		Centroide (Coordenadas geográficas)	
	X_Centroide	Y_Centroide	Latitud	Longitud
Microcuena 01	532686.52	8558177.75	-13.04	-74.7
Microcuena 02	534106.69	8553527.77	-13.09	-74.68
Microcuena 03	542575.41	8550041.13	-13.12	-74.61
Microcuena 04	531447.82	8547179.73	-13.14	-74.71
Microcuena 05	539032.27	8543454.98	-13.18	-74.64
Microcuena 06	536379.59	8536794.41	-13.24	-74.67
Microcuena 07	532278.41	8537443.08	-13.23	-74.7
Microcuena 08	526288.13	8535715.69	-13.25	-74.76
Microcuena 09	520689.16	8541850.92	-13.19	-74.81

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.1. Funciones de distribuciones de probabilidad

Se realizó la prueba con distribuciones estadísticas más usuales: Distribución normal, distribución log normal de 2 parámetros, distribución log normal de parámetros, distribución gamma 2 parámetros, distribución gamma 3 parámetros, distribución gumbel, distribución log gumbel y distribución log Pearson III. Para cada microcuena en la **Tabla 20**, se muestran los parámetros de resultados de los cálculos realizados, delta teórico y tabular para la selección de los distribución que más se ajusta a las series de datos de precipitación completos, en el estudio hidrológico se encontraron como mejores distribuciones de ajuste para cada una de las microcuencas **Tabla 20**.

Tabla 20. Prueba de ajuste de bondad para datos de precipitación de cada microcuena de la subcuena del río Sicra

Microcuencas	Distribución	Delta teórico	Delta tabular
Microcuena 01	Gamma 3P	0.0407	0.2267

Microcuenca 02	Log normal 2P	0.0629	0.2267
Microcuenca 03	Log gumbel	0.0877	0.2267
Microcuenca 04	Log normal 2P	0.0759	0.2267
Microcuenca 05	Log gumbel	0.0877	0.2267
Microcuenca 06	Log gumbel	0.0591	0.2267
Microcuenca 07	Gamma 3P	0.0820	0.2267
Microcuenca 08	Gamma 3P	0.0820	0.2267
Microcuenca 09	Log normal 3P	0.0549	0.2267

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2. Precipitaciones máximas de 24 horas (P24)

Se efectuó los cálculos correspondientes para estimar las precipitaciones máximas de 24 horas (P24) para diferentes tiempos de retorno (Tr) de 2, 5, 10, 20, 50, 100 y 500 años para cada una de las 9 microcuencas de la subcuenca del río Sicra. La información pluviométrica que se utilizó en este estudio fueron los datos tratados del producto PISCO - SENAMHI en cada uno de las estaciones climáticas virtuales, los que se muestran en la **Tabla 21**.

Tabla 21. Precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes períodos de retorno de cada microcuenca de la subcuenca del río Sicra

Períodos de Retorno (Tr años)	PRECIPITACIONES MÁXIMAS EN 24H PARA CADA MICROCUENCA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA								
	01_P24 (mm)	02_P24 (mm)	03_P24 (mm)	04_P24 (mm)	05_P24 (mm)	06_P24 (mm)	07_P24 (mm)	08_P24 (mm)	09_P24 (mm)
2	27.89	23.35	18.23	23.78	18.23	17.82	23.26	23.26	23.62
5	34.2	28.63	24.14	30.48	24.14	23.34	29.48	29.48	30.11
10	37.75	31.85	29.07	34.71	29.07	27.9	33.09	33.09	34.16
20	40.82	34.78	34.74	38.65	34.74	33.12	36.26	36.26	37.91
50	44.41	38.4	43.76	43.61	43.76	41.34	40.03	40.03	42.59
100	46.89	41.02	52.02	47.26	52.02	48.81	42.66	42.66	46.03
200	49.21	43.57	61.8	50.87	61.8	57.59	45.15	45.15	49.41
500	52.02	46.88	77.57	55.62	77.57	71.65	48.25	48.25	53.84

Fuente: Elaboración propia

Consecuentemente se ha calculado los cuadros y curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) en mm/h para 24 horas para cada microcuenca de la subcuenca del río Sicra, lo cual se adjunta en el **Anexo A.1**.

4.1.2.3. Validación del producto PISCO

Para la validación de la precipitación utilizada (PISCO) se tuvo en cuenta lo siguiente: contar con una longitud de registro de 36 años (13 629 datos P_{24}). Se analizó datos obtenidos en un punto en común que es la estación meteorológica convencional de Lircay, los datos a analizar son las precipitaciones máximas 24 horas diarias entre los años 1981-2016, ya que este dato influirá directamente en el cálculo del hidrograma máximo de avenida.

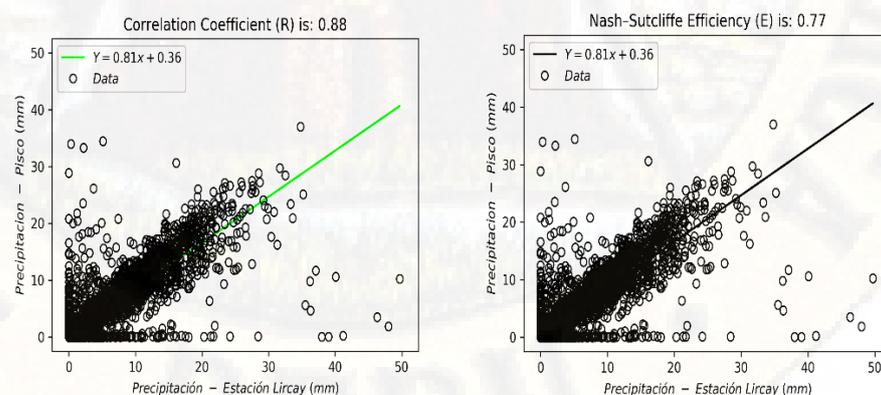
Tabla 22. Ubicación de la estación meteorológica convencional de Lircay – Angaraes

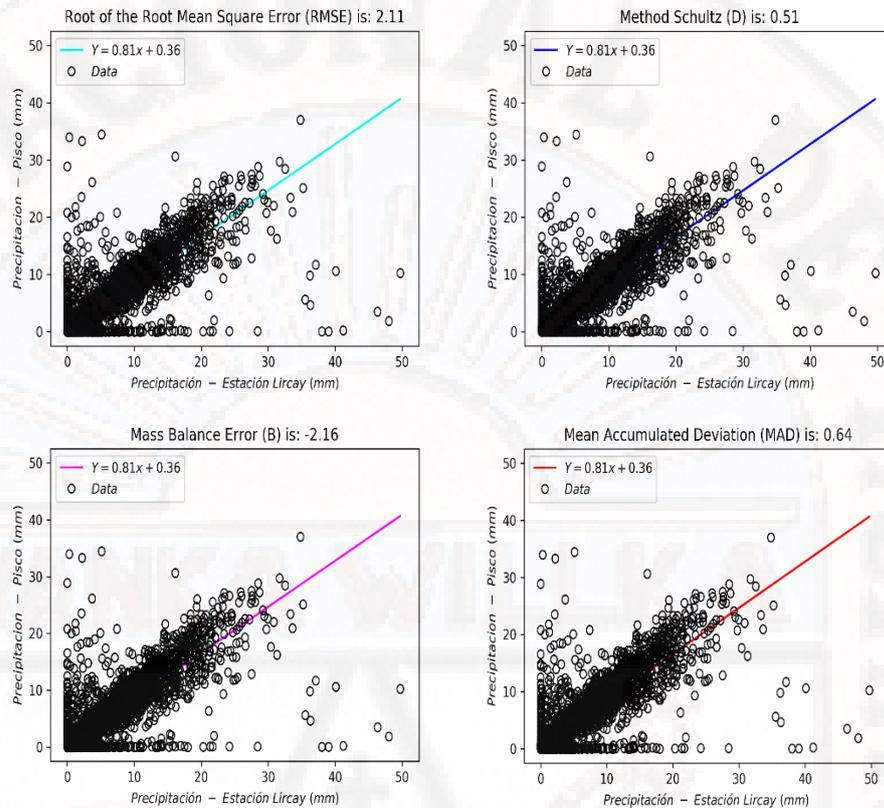
ESTACIÓN LIRCAY		
Código	Latitud	Longitud
Lircay – 000657	12°58'55''	74°43'5.1''

Fuente: Senamhi.gob.pe

Se realizó evaluaciones de los indicadores estadísticos tales como: coeficiente de determinación (R^2), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y eficiencia de Nash - Sutcliffe (E), obteniendo el cuadro de resumen de los indicadores estadísticos aplicados que representa las gráficas mostradas:

Figura 49. Validación por diferentes medidas bondad de ajuste del producto Pisco con los datos registrados en la estación meteorológica Lircay – 000627





Fuente: Elaboración propia

Tabla 23. Valores referenciales y tipos de ajuste

MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE		
Correlation coefficient (R)	0.88	Ajuste muy bueno
Nash sutcliffe efficiency (E)	0.77	Ajuste muy bueno
Root of the root mean square error (RMSE)	2.11	Ajuste bueno
Schultz method (D)	0.51	Ajuste muy bueno
Mass balance error (B)	-2.16	Ajuste bueno
Mean accumulated deviation (MAD)	0.64	Ajuste bueno

Fuente: Elaboración propia

Los gráficos obtenidos, ayudaron a explicar la variación o comportamiento de los resultados, donde se concluye que existe un buen ajuste entre las muestras de precipitaciones observados (SENAMHI) y las precipitaciones simuladas (PISCO) en los 6 indicadores estadísticos analizados.

4.1.2.4. Celdas de precipitación concentrada

Se llaman celdas de precipitación concentrada, a aquellas lluvias puntuales que caen localmente sobre una zona específica y producen los flujos de lodo y escombros. Esta lluvia no es registrada por las estaciones meteorológicas debido a que se trata de un fenómeno local e instantáneo.

En este tipo de análisis la precipitación concentrada se va estimar mediante precipitaciones máximas en 24 horas en las nueve microcuencas de la subcuenca del río Sicra.

Para el cálculo del hidrograma de avenida, se consideró la precipitación máxima de 24 horas (P24) para un período de retorno de 50 y 100 años, la cual obtuvimos anteriormente para cada una de las microcuencas, los cuales son de (44.41mm, 38.40 mm, 43.76 mm, 43.61 mm, 43.76 mm, 41.34 mm, 40.03 mm, 40.03 mm, 42.59 mm) y (46.89 mm, 41.02 mm, 52.02 mm, 47.26 mm, 52.02 mm, 48.81 mm, 42.66 mm, 42.66 mm, 46.03 mm) respectivamente. El período de retorno de 100 años es el recomendado por estudiosos para este tipo de investigaciones (Castillo, 2006) ya que con este valor estamos dando el factor de seguridad necesario.

4.1.2.5. Cálculo de tiempo de concentración (Tc)

Se sabe que el tiempo de concentración real depende de muchos factores, entre otros de la geometría en planta de la cuenca (una cuenca alargada tendrá un mayor tiempo de concentración), de su pendiente (a mayor pendiente produce flujos más veloces y en menor tiempo de concentración), el área, las características del suelo, cobertura vegetal, etc. Las fórmulas más comunes solo incluyen la pendiente, la longitud del cauce mayor desde la divisoria y el área. (Chahua Janampa, 2016)

Dada las características de nuestro país y a las condiciones en que se han desarrollado los diversos métodos para el cálculo del tiempo de

concentración, se ha optado por utilizar la ecuación de Kirpich con el método de California Culverts Praticce, 1942.

Tabla 24. Tiempo de concentración para cada microcuenca de la subcuenca del río Sicra

Tiempo de concentración (Tc)		
Subcuenca del río Sicra	Tc (min)	Tc (horas)
Microcuenca 01	86.21	1.26
Microcuenca 02	79.66	1.19
Microcuenca 03	156.16	2.36
Microcuenca 04	118.62	1.58
Microcuenca 05	150.48	1.3
Microcuenca 06	93.03	1.33
Microcuenca 07	111.03	1.51
Microcuenca 08	112.56	1.52
Microcuenca 09	117.35	1.57

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.6. Cálculo de tiempo de retardo

Se sabe que el tiempo de retardo define como el tiempo de drenaje, desde el centro de gravedad del hietograma de lluvia hasta el pico del hidrograma. (Ayala Bizarro, 2009) menciona que un estudio de muchas cuencas rurales y pequeñas indica que el tiempo de retardo es igual al 60% del tiempo de concentración.

Tabla 25. Cálculo del tiempo de retardo para cada microcuenca de la subcuenca del río Sicra

Microcuencas	Tiempo de retardo
Subcuenca del río Sicra	Tlag (min)
Microcuenca 01	51.73
Microcuenca 02	47.79
Microcuenca 03	93.70
Microcuenca 04	71.17
Microcuenca 05	90.29
Microcuenca 06	55.82
Microcuenca 07	66.62

Microcuena 08	67.54
Microcuena 09	70.41

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.7. Número de curva del SCS

Este modelo desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, usa el número de curva (CN, de sus siglas en inglés), el cual es un parámetro empírico estimado de la combinación del tipo de suelo, cobertura vegetal y condición de humedad. (Chahua Janampa, 2016).

El Ministerio del ambiente, MINAM como ente encargado de conducir el proceso de inventario y evaluación nacional integrada de los recursos naturales y de los servicios ambientales, ha elaborado el Mapa de Cobertura Vegetal del Perú, el cual constituye una herramienta de gestión del patrimonio natural y a la vez de soporte en la implementación de la Política Nacional del Ambiente, Este mapa fue elaborado mediante el análisis visual de imágenes satelitales del año 2009, luego verificado en el terreno a nivel aéreo, terrestre y fluvial.

Así mismo se desarrolló el mapa temático de suelo, con información publicado por la FAO y UNESCO a escala de 1/5 000 000, proyecto desarrollado en colaboración entre los innumerables científicos de suelo en el mundo, se finalizó tras un esfuerzo de 20 años. Hasta ahora el Mapa Mundial de suelos ha permanecido con la única visión global de los recursos del suelo.

Consecuentemente se obtuvo el raster CN, en base a valores de los grupos hidrológicos del suelo que se muestra en la **Tabla 26** , que fueron ingresados como información para generar los mapas de número de curva.

Tabla 26. Valores de grupos hidrológicos del suelo

DESCRIPCIÓN DEL USO DE LA TIERRA		GRUPO HIDROLÓGICO DEL SUELO			
		A	B	C	D
Tierra cultivada (1):	Sin tratamiento de conservación.	72	81	88	91
	Con tratamiento de conservación.	62	71	78	81
Pastizales	Condiciones pobres.	68	79	86	89
	Condiciones óptimas.	39	61	74	80
Vegas de río	Condiciones óptimas.	30	58	71	78
Bosques	Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierba.	45	66	77	83
	Cubierta buena (2).	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.	Óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más.	39	61	74	80
	Condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 a 75%	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales: (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial (3)					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable (4)				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles carreteras (5)	Pavimentados con cunetas y alcantarillados	98	98	98	98
	Grava	76	85	89	91
	Tierra	72	82	87	89

1. Para una descripción más detallada de los números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, 1972, cap. 9.

2. Una buena cubierta está protegida del pastizales, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

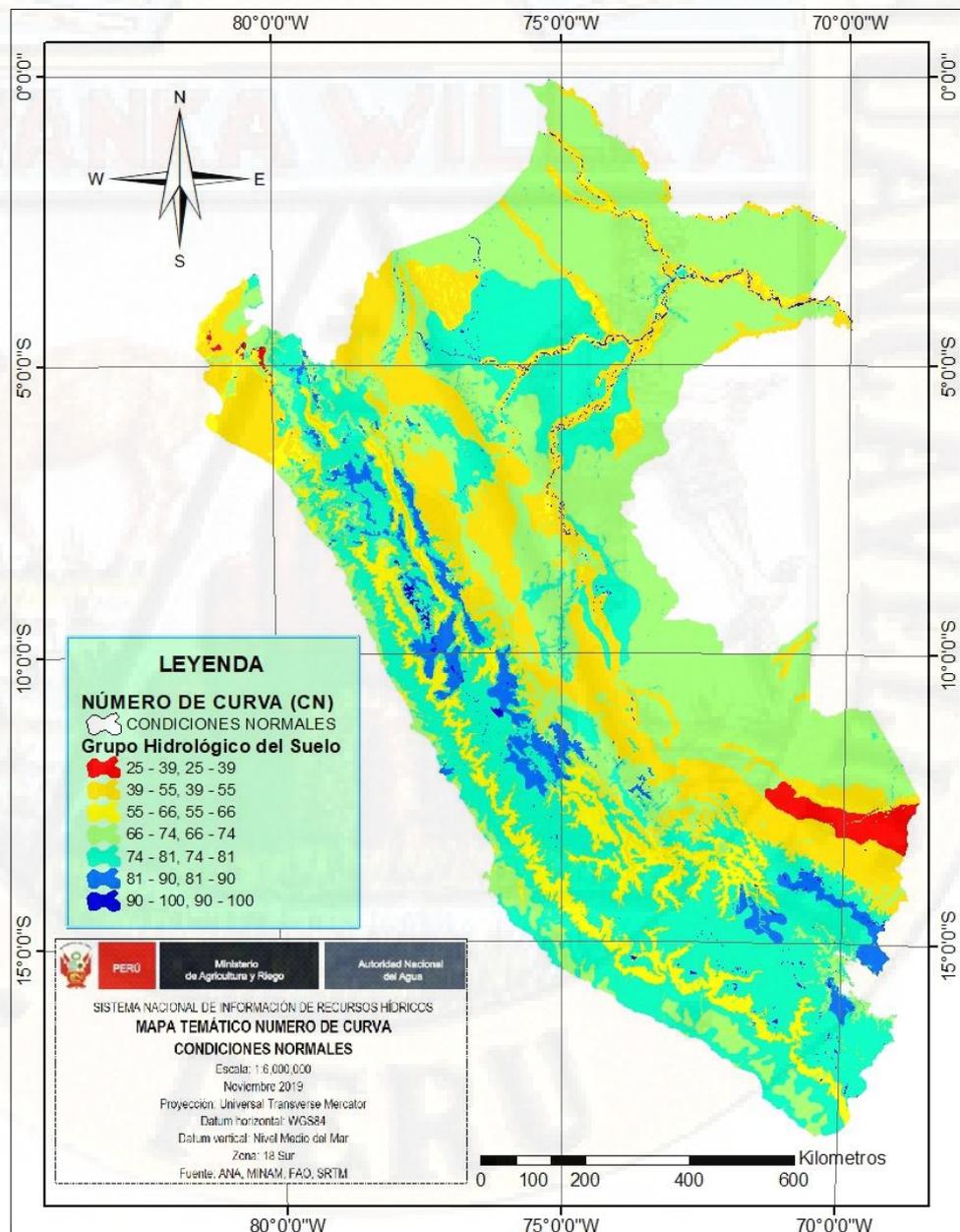
3. Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

4. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.
5. En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número.

Fuente: Adaptado de (Ven te Chow , 1994)

Finalmente se obtuvo el mapa de numero de curva a escala nacional **Figura 50.** donde se muestran las distribuciones espaciales de los valores de número de curva para condiciones normales.

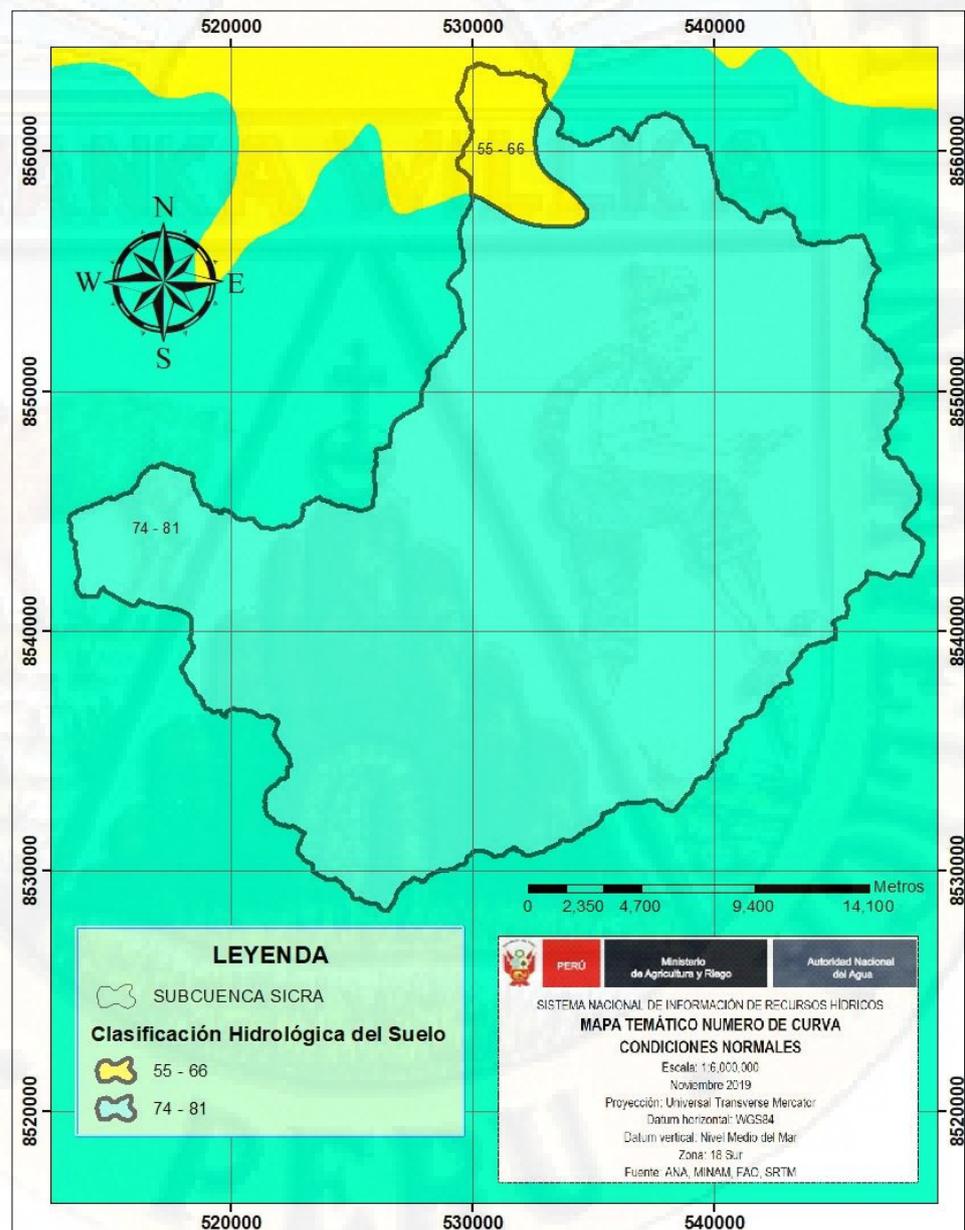
Figura 50. Mapa temático número de curva (CN) en condiciones normales



Fuente: Adaptado de Geo GPS Perú; <https://www.geogpsperu.com/2019/04/numero-de-curva-descargar-mapa.html>

Con información de mapas temáticos de cobertura y uso, mapa temático de suelo y Modelo Digital de Elevación, y en base a valores para cada grupo hidrológico de suelos teóricos, se generó el mapa de número de curva para la subcuenca del río Sicra, a escala nacional **Figura 51**.

Figura 51. Mapa temático de número de curva para la subcuenca del río Sicra



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se obtuvo el CN, para la subcuenca del río Sicra **Tabla 27**, que será utilizado para estimar la precipitación neta o en exceso, a partir de datos de precipitación de cada microcuenca, una vez que se obtiene como dato la precipitación neta, esta es la que escurre en la superficie formando un caudal.

Tabla 27. Uso actual de los suelos para cada microcuenca de la subcuenca del río Sicra

Subcuenca del río Sicra	Número de curva (CN)
Microcuenca 01	70.67
Microcuenca 02	77.5
Microcuenca 03	77.5
Microcuenca 04	77.5
Microcuenca 05	77.5
Microcuenca 06	77.5
Microcuenca 07	77.5
Microcuenca 08	77.5
Microcuenca 09	77.5

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.8. Hidrograma de avenida líquido (INFLOW)

Para la estimación del hidrograma de avenida, utilizaremos como apoyo el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System), este modelo nos ayudará a estimar los hidrogramas de salida para cada una de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra, caudales máximos y tiempos al pico a partir de condiciones de lluvias extremas, aplicando las hietogramas de diseño, perdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa, que han sido utilizados en nuestro medio y país, así mismo se trata de un programa de uso libre y reconocido también en otras partes del mundo, (Castillo, 2006), durante los últimos tiempos. En la **Figura 52** se presenta el esquema del modelamiento de la subcuenca del río Sicra, los elementos utilizados para definir nuestra microcuenca son subcuenca (subbasin), cauce (reach) y la confluencia (juntion).

Figura 52. Modelo de la subcuenca del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

Se utilizó el método SCS para abstracciones, para estimar las pérdidas iniciales en cada uno de las nueve microcuencas, debido a que depende solo de una variable conocida CN.

Adicionalmente emplearemos el hidrograma unitario adimensional de SCS, para el cálculo del hidrograma sintético cuyo dato de entrada depende del tiempo de retardo (t_{lag}).

4.1.2.8.1. Datos de ingreso al modelo hidrológico HEC-HMS

Los datos de ingreso para el modelo se muestra en la **Tabla 28**, estos datos han sido calculados previamente, tales como parámetros de cada subcuenca como el área, tiempo de retardo (T_{lag}), curva número (CN) y abstracción inicial (I_a). Los valores vienen a ser los valores iniciales para la simulación del modelo hidrológico HEC-HMS.

Tabla 28. Valores del hidrograma líquido en el punto de afluencia

Subcuenca del río Sicra	Área (km ²)	T_{lag} (min)	CN	I_a (mm)
Microcuenca 01	53.14	51.73	70.67	21.08
Microcuenca 02	29.80	47.79	77.50	14.75
Microcuenca 03	145.54	93.7	77.50	14.75
Microcuenca 04	72.56	71.17	77.50	14.75
Microcuenca 05	61.39	90.29	77.50	14.75
Microcuenca 06	46.73	55.82	77.50	14.75
Microcuenca 07	50.60	66.62	77.50	14.75
Microcuenca 08	84.46	67.54	77.50	14.75
Microcuenca 09	85.76	70.41	77.50	14.75

Fuente: Elaboración propia

En la **Tabla 29** se muestra un resumen de las características morfométricas de los tramos de ríos en estudio, que se calcularon y utilizaron para realizar el tránsito de flujo en el cauce, el método empleado fue onda cinemática (*Kinematic Wave*).

Tabla 29. Parámetros del método onda cinemática del cauce del río Sicra

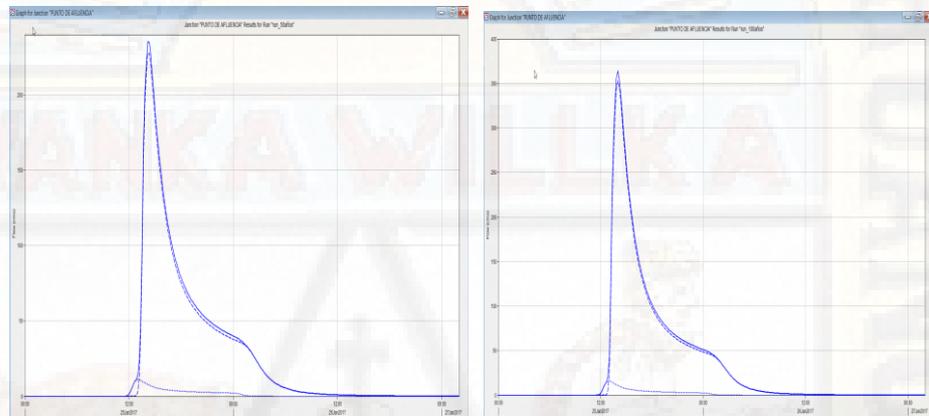
Descripción	Longitud (m)	Pendiente (m)	Manning (n)	Ancho (m)
Tramo 1	12541.4737	0.0248	0.035	24.50
Tramo 2	6539.67081	0.0170	0.035	27.00
Tramo 3	14799.6212	0.0247	0.035	22.00
Tramo 4	11199.164	0.0331	0.035	18.00

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.8.2. Simulación del modelo hidrológico HEC-HMS

Identificados, calculados e ingresados los parámetros requeridos por el modelo hidrológico HEC-HMS, así también las fechas y hora de inicio y termino de los eventos, se procedió a simular de donde se obtienen los resultados que se muestran en la **Figura 53**.

Figura 53. Hidrograma líquido para la subcuenca del río Sicra (Tr=50 años y Tr=100 años)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, luego de realizar los cálculos en el modelo HEC-HMS se ha obtenido un caudal máximo de 235.20 m³/s y 363.60 m³/s para un Tr=50 años y Tr=100 años respectivamente, ocurrido el 25 de enero del 2017 a horas 14:00 horas.

4.1.2.8.3. Calibración del modelo hidrológico HEC-HMS

La simulación del modelo hidrológico HEC-HMS realizado para la subcuenca del río Sicra fue calibrada para estimar adecuadamente ciertos parámetros asumidos en la modelación. El método usado fue el de la huella existente de agua, el cual utiliza la fórmula de Manning, cuyo proceso fue realizar un corte transversal en un tramo del cauce del río Sicra (**Anexo A.4**), de donde se obtiene el área del cauce obteniendo finalmente un caudal y el

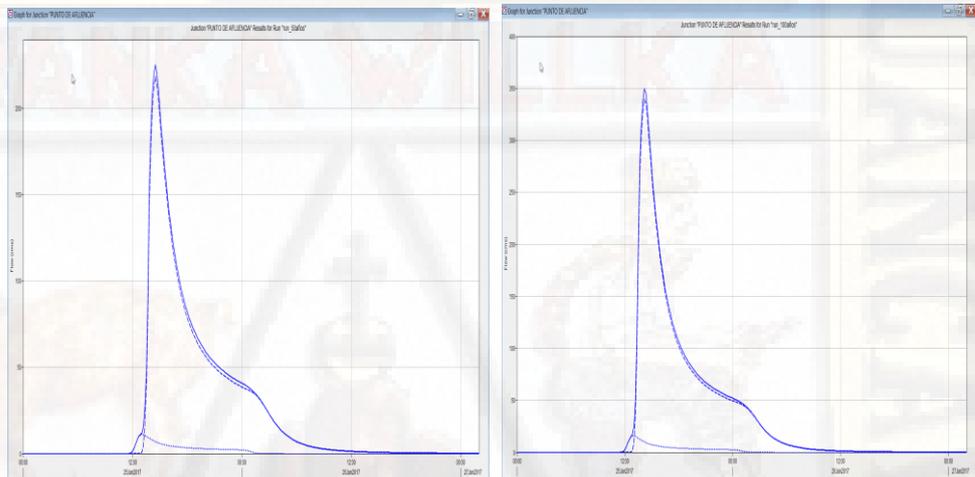
coeficiente de Manning calibrado para dicho caudal, el cual se observa en la **Tabla 30** y **Figura 54**.

Tabla 30. Calibración del coeficiente de Manning

Manning (n) - Asumido	Manning (n) - Calibrado
0.035	0.046

Fuente: Elaboración propia

Figura 54. Hidrograma líquido calibrado para la subcuenca del río Sicra (Tr=50 años y Tr=100 años)



Fuente: Elaboración propia

Los caudales máximos calibrados obtenidos son: 225.00 m³/s y 349.30 m³/s para un Tr=50 años y Tr=100 años respectivamente, ocurrido el 25 de enero del 2017 a horas 14:00 horas.

4.1.3. Análisis geodinámico

La subcuenca del río Sicra presenta una geodinámica externa bastante activa que está representada principalmente por deslizamientos, derrumbes, erosión fluvial. Observando la gran área que presenta esta subcuenca junto a las microcuencas, esta tesis se enfoca en el estudio y análisis de flujo de lodo y escombros aplicando el software de diferencias finitas Flo - 2D. Esta área abarca una de las subcuencas de la ciudad de Lircay, en donde se puede

observar fuertes pendientes presentando un relieve escarpado y abrupto propiciando un flujo torrencioso y altamente turbulento, principalmente durante el período de lluvias torrenciales, por la disminución brusca de la pendiente se ha formado un cono de deyección, producto de la deposición del material sólido transportado por las aguas del río Sicra principalmente durante el período de grandes avenidas.

Así mismo los peligros geológicos reconocidos en las zonas inspeccionadas, corresponden a movimientos en masa como flujo de detritos (huaycos), flujos de lodo y escombros como desbordes, inundaciones y erosión fluvial. Históricamente la zona, ha sido afectada por deslizamientos, derrumbes y flujos de detritos (huaycos), evidenciado esto por sus depósitos y la configuración topográfica del terreno. Durante los trabajos de campo, fue posible identificar movimientos del terreno en los sectores inspeccionados, encontrándose zonas de arranque de deslizamientos antiguos de tipo rotacional, flujos de detritos (huaycos) y flujos de escombros.

Estos movimientos en masa, tienen como causas factores intrínsecos: geometría del terreno, tipo de suelos, drenaje superficial y subterráneo, cobertura vegetal; combinados con factores externos o antrópicos como la construcción de viviendas en zonas no adecuadas, carreteras, canales, tala de árboles, etc. Siendo el “detonante” de estos eventos las precipitaciones pluviales excepcionales en el área de influencia de la zona. A continuación, se presenta una breve descripción de los movimientos en masa identificados en diferentes sectores inspeccionados, para poder tener una visión más clara de lo ocurrido en la zona.

4.1.3.1. Inundaciones y erosión fluvial:

Son los fenómenos que en el mundo causan mayor impacto en numerosas poblaciones. Se puede definir como el emplazamiento paulatino o violento de las aguas en cantidades abundantes sobre una superficie determinada, (Median J, 1991)

Su origen se debe a varios factores donde el principal factor, para la ocurrencia de la inundación de viviendas y erosión fluvial de vías de comunicación, son las lluvias torrenciales de temporada, principalmente en el cauce del río Sicra, generándose ruptura y/o colapso de muros rústicos de contención. La afectación de viviendas por efecto de las lluvias continuas, con intervalos de duración de 12, 24 o 48 horas y el volumen de las precipitaciones que, por lo general se concentraba en unas 5 a 8 horas diarias, tal como se detalla los antecedentes en las siguientes figuras.

- **Área inundable N° 01:**

Progresiva: 1+032 km (UTM: 530061 E, 8563701 S).

Figura 55. Colapso de un hotel en Lircay ocurrido el 26 de enero de 2017



Fuente: Elaboración propia

- **Área inundable N° 02:**

Progresiva: 0+749 km (UTM: 530097 E, 8563981 S).

Figura 56. Vista de zonas expuesta a inundación por las aguas del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

- **Área inundable N° 03:**

Progresiva: 1+029 km (UTM: 530098 E, 8563705 S).

Figura 57. Vista de zonas expuesta a inundación por las aguas del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

- **Área inundable N° 04:**

Progresiva: 1+343 km (UTM: 530097 E, 8563431 S).

Figura 58. Vista de la zona de la piscigranja de la ciudad de Lircay, en pleno evento de inundación ocurrido el 25 de enero 2017, por el desborde de las aguas del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

- **Área inundable N° 05:**

Progresiva: 2+960 km (UTM: 530410 E, 8562026 S).

Figura 59. Área de inundación margen derecha e izquierda río Sicra, zona urbano marginal ciudad de Lircay, altura puente carrozable Santa Rosa aguas arriba



Fuente: Elaboración propia

- **Área erosionada N° 01:**

Progresiva: 2+089 km (UTM: 530162 E, 8562783 S).

Figura 60. Vista del puente Santa Rosa, en momentos del incremento del caudal de las aguas del río Sicra, en proceso de erosión de las bases y estribos



Fuente: Elaboración propia

- **Área erosionada N° 02:**

Progresiva: 4+178 km (UTM: 530757 E, 8560976 S).

Figura 61. Erosión de talud y pérdida parcial de plataforma, altura puente Chahuarma del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

- **Área erosionada N° 03:**

Progresiva: 5+146 km (UTM: 530824 E, 8560066 S).

Figura 62. Erosión y pérdida de talud de terrenos forestales y pastizales lado izquierdo del cauce y trayectoria del río Sicra



Fuente: Elaboración propia

4.1.3.2. Deslizamiento:

Se ha visualizado la manifestación de fenómenos de remoción en masa en varios puntos del trayecto aguas arriba del río Sicra, donde se han activado estos deslizamientos, producto de la erosión y destrucción de sus bases de los taludes, por acción del incremento del caudal en el cauce del río Sicra.

Por otro lado, se verificó que este tipo de escenarios en el distrito de Lircay – Angaraes se encuentran corroborados por el Mapa de Zonificación de Peligros Geológicos del Perú, elaborado por el INGEMMET, en la que califica de peligro muy alto a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa, flujos de lodo y escombros a causa de deslizamientos al igual que la descripción que hiciera el INGEMMET en el mapa de geodinámica del Perú, donde se ha identificado la ocurrencia de deslizamientos en el territorio de la provincia de Angaraes, así como el INDECI menciona en el mapa de peligros naturales, la ocurrencia de deslizamientos y huaycos. Para ello se han

identificado 6 puntos activos a deslizamientos y huaycos, los cuales se resumen en la **Tabla 32** siguiente.

Tabla 31. Zonas vulnerables a deslizamiento

Zona vulnerable a deslizamiento	Progresiva (km)	Coordenadas UTM	
		Este (m)	Norte (m)
N°			
01	4+864	530,946	8,560,338
02	4+896	531,038	8,560,286
03	4+885	530,162	8,562,783
04	9+904	534,200	8,558,000
05	10+063	534,287	8,558,295
06	10+190	534,388	8,558,523

Fuente: Elaboración propia

- **Área vulnerable a deslizamiento N° 01 (D1):**

Progresiva: 4+864 km (UTM: 530946 E, 8560338 S).

Figura 63. Vista de punto activo a deslizamientos N° 01 (D1) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- **Área vulnerable a deslizamiento N° 02:**

Progresiva: 4+896 km (UTM: 531038 E, 8560286 S).

Figura 64. Vista de punto activo a deslizamientos N° 02 (D2) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- **Área vulnerable a deslizamiento N° 03 (D3):**

Progresiva: 4+885 km (UTM: 530162 E, 8562783 S).

Figura 65. Vista de punto activo a deslizamientos N° 03 (D3) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- Área vulnerable a deslizamiento N° 04 (D4):

Progresiva: 9+904 km (UTM: 534200 E, 8558000 S).

Figura 66. Vista de punto activo a deslizamientos N° 04 (D4) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- **Área vulnerable a deslizamiento N° 05 (D5):**

Progresiva: 10+063 km (UTM: 534287 E, 8558295 S).

Figura 67. Vista de punto activo a deslizamientos N° 05 (D5) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



Fuente: Elaboración propia

- **Área vulnerable a deslizamiento N° 06 (D6):**

Progresiva: 10+190 km (UTM: 534388 E, 8558523 S).

Figura 68. Vista de punto activo a deslizamientos N° 06 (D6) sobre el tramo alterno en la vía Lircay – Ayacucho



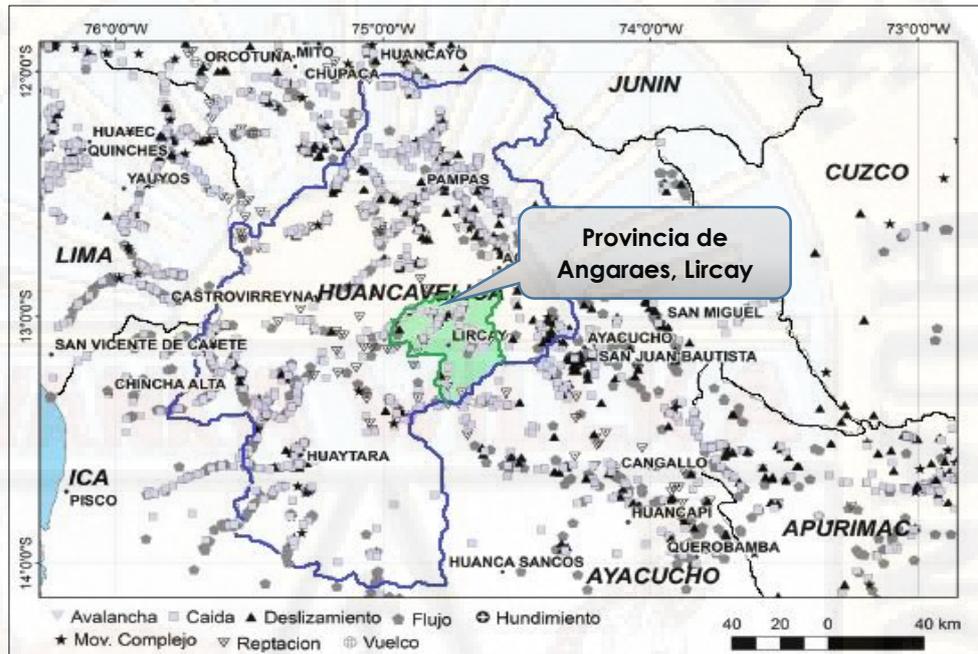
Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Mapa de susceptibilidad por movimientos en masa de la provincia de Angaraes



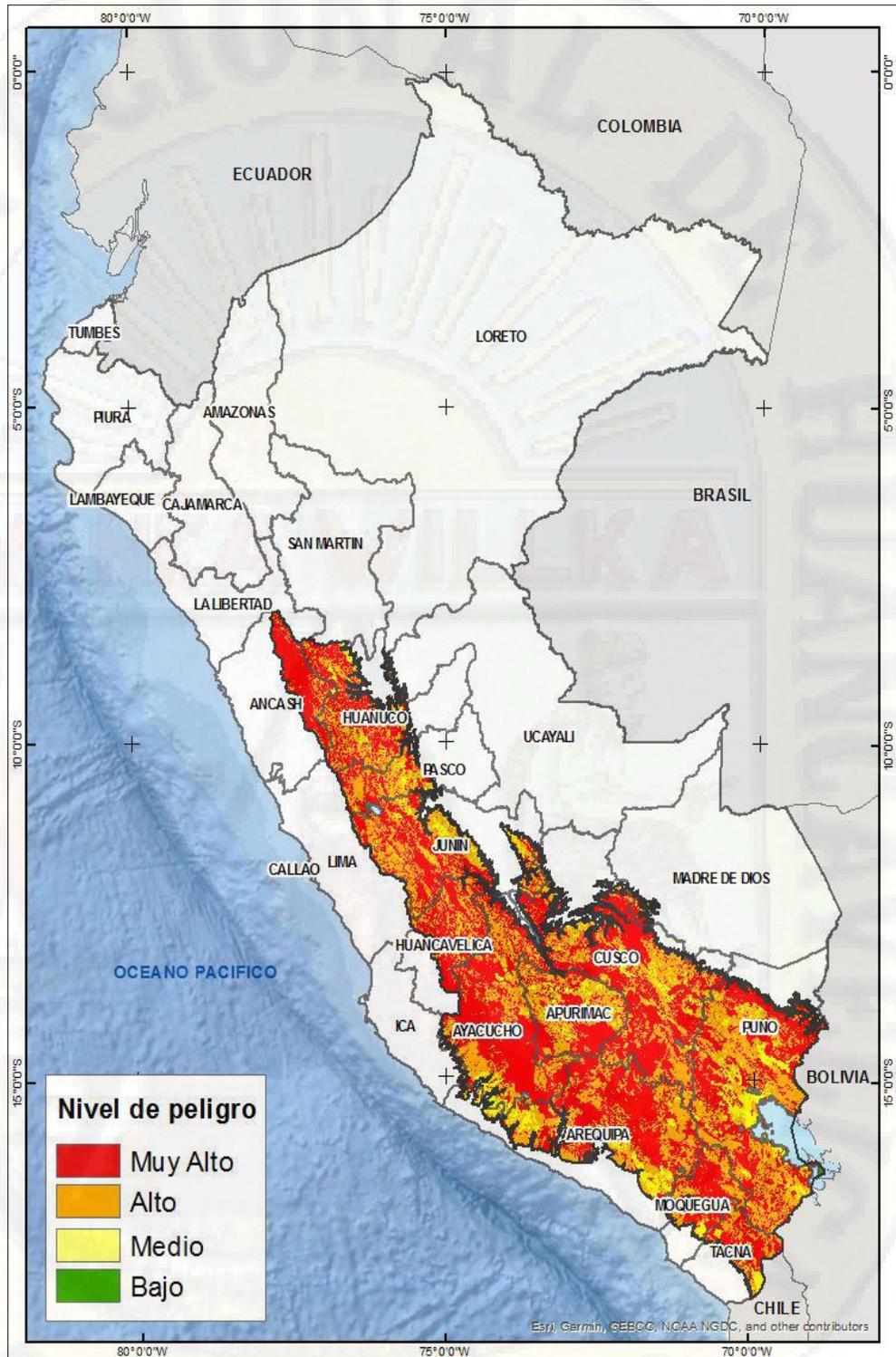
Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico "INGEMMET".

Figura 70. Mapa de suelos con recurrencia de eventos de caídas, deslizamientos y flujos de masas, en la provincia de Angaraes, Lircay



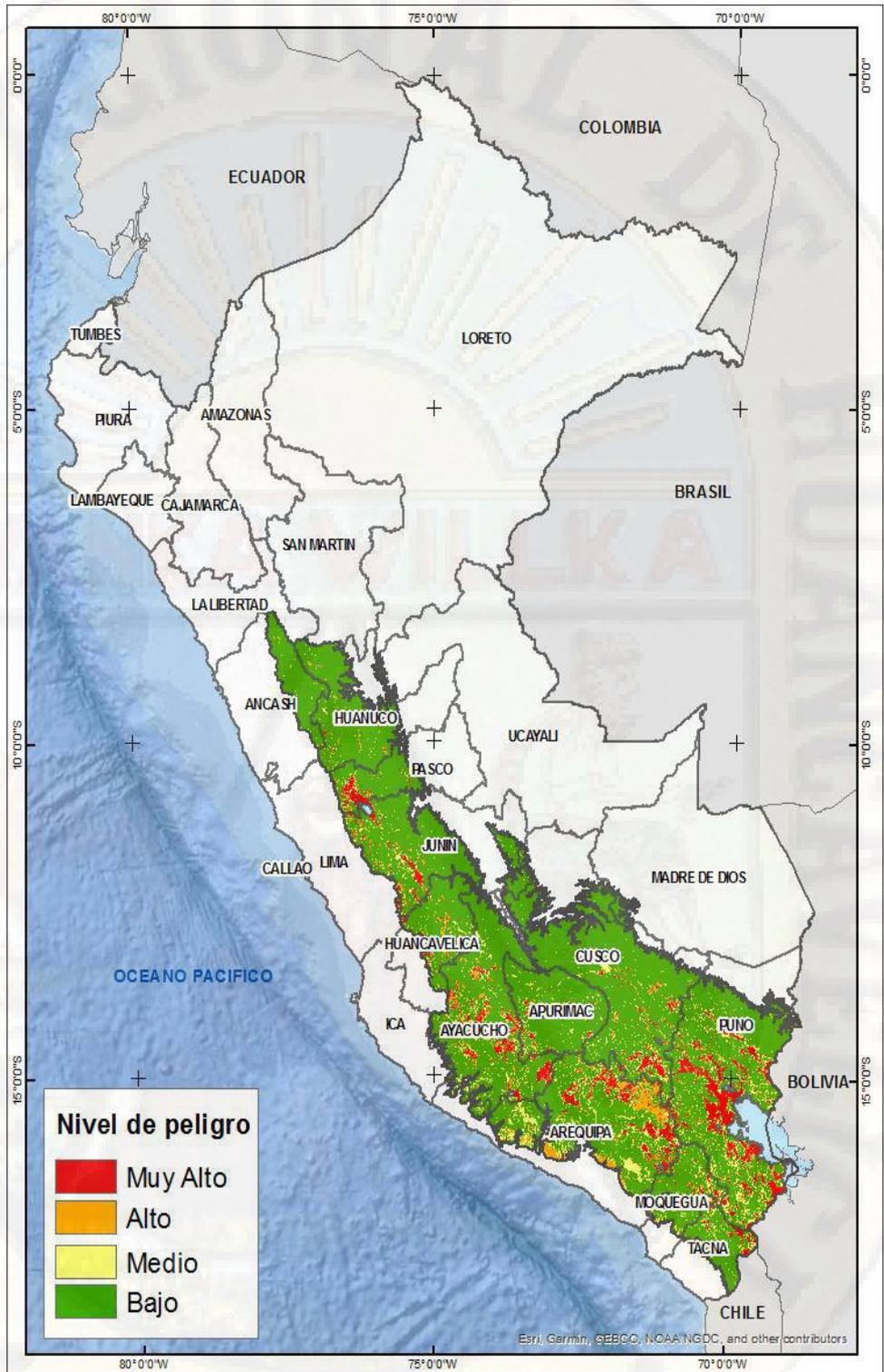
Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico "INGEMMET".

Figura 71. Mapa de peligro por movimientos en masa para el verano 2020



Fuente: Adaptado de CENEPRED

Figura 72. Mapa de peligro por inundaciones para el verano 2020.



Fuente: Adaptado de CENEPRED

Tabla 32. Grado de susceptibilidad del suelo según Instituto Geológico y Metalúrgico

Fuente: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico “INGEMMET”

GRADO/CRITERIO



Muy alta: Laderas con zonas de falla, masas de rocas intensamente meteorizadas, saturadas y muy fracturadas con discontinuidad desfavorables, depósitos superficiales inconsolidados, laderas con pendientes entre 30° a 45°, movimientos en masa anteriores y antiguos. En estos sectores existe alta posibilidad de que ocurran movimientos en masa.

Alta: Laderas que tiene zonas de falla, masas de roca con meteorización alta a moderada, fracturadas con discontinuidades desfavorables; deposito superficiales inconsolidados, materiales parcialmente a muy saturados, laderas con pendientes entre 25° a 45°, donde han ocurrido movimientos en masa o existe la posibilidad de que ocurra.

Media: laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturadas, moderadamente meteorizados, laderas con pendiente entre 20° y 30°, donde han ocurrido algunos movimientos en masa y no existe completa seguridad de que no ocurran movimientos en masa. Estos pueden ser “detonados” por sismos y lluvias excepcionales.

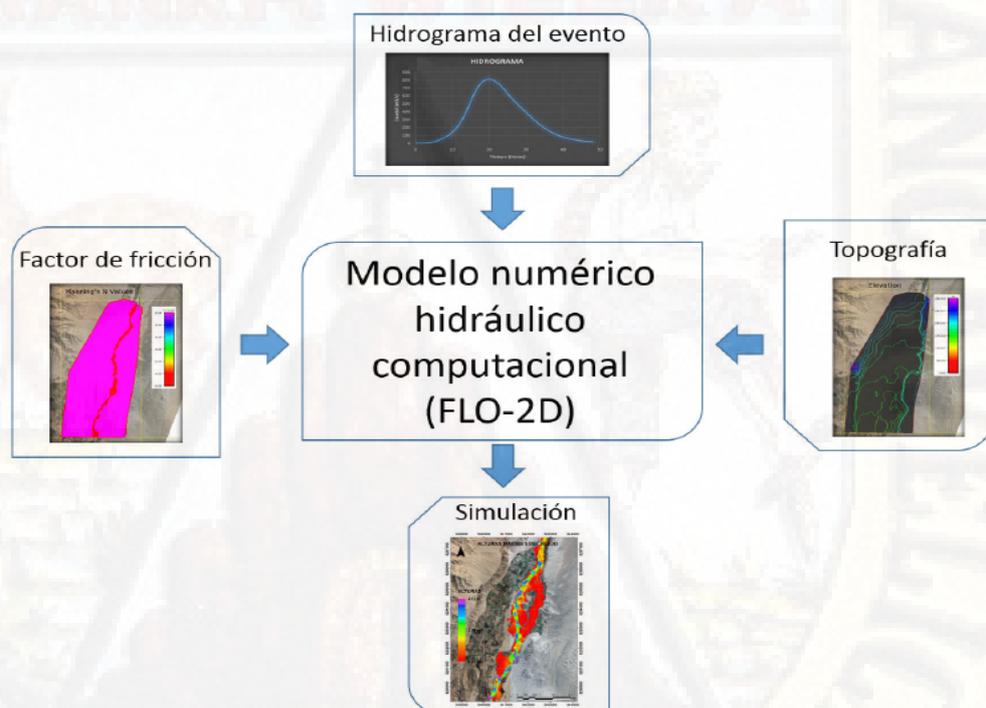
Baja: Laderas con materiales poco fracturados, moderada a poca meteorización, parcialmente erosionados, no saturados, con pocas discontinuidades favorables pendientes entre 10° a 20°. Zonas que tienen pocas condiciones para originar movimientos en masa, salvo que puede ser afectada por movimientos en masa ocurridas en zonas de susceptibilidad alta a muy alta cercanas a ellas, detonadas principalmente por lluvias excepcionales.

Muy baja. Laderas no meteorizadas, con discontinuidades favorables. Terrenos con pendientes menores a 5° donde no existen indicios que permiten predecir deslizamientos

4.1.4. Pre - procesamiento de flujos de lodo y escombros con el modelo numérico Flo - 2D

Una vez conocido las características principales de la subcuenca del río Sicra y el tipo de flujo que discurre por ella, procedemos al ingreso de datos en el modelo numérico Flo - 2D (O'Brien), para la simulación de un evento extremo, como dato principal ingresado es el hidrograma generado por dicho evento (hidrograma líquido y sólido). Esto nos permitirá estimar las áreas susceptibles a ser afectadas.

Figura 73: Diagrama de ingreso y salida de datos para el modelamiento numérico computacional con el programa Flo - 2D



Fuente: Adaptado de (Chahua Janampa, 2016)

4.1.4.1. Definición de parámetros

4.1.4.1.1. Topografía

Para el desarrollo del presente estudio uno de los pasos fundamentales para el proceso de simulación del modelo bidimensional Flo

- 2D, consistió en la construcción de un modelo digital de elevaciones (DEM) que fue generado a partir de vuelo de un dron (Phantom 4 RTK), del cual se obtiene un DEM de alta resolución de 0.5m x 0.5m, una imagen ortofoto de alta resolución 4K, 0.1m x 0.1m.

El área de estudio comprende, el cauce principal del río Sicra, progresiva 0+565 km al 1+744 km de la zona urbana que representa mayor probabilidad a inundación por flujos de lodo y escombros, según antecedentes e inspección ocular insitu.

Figura 74. Modelo digital de elevaciones de la subcuenca del río Sicra, del distrito de Lircay - Angaraes



Fuente: Elaboración propia

Este modelo fue ingresado al software Flo - 2D para realizar el grillado que consiste en dividir el modelo digital de elevaciones (DEM), en grillas en el cual el modelo calculará terminada la simulación, los tirantes y velocidades del flujo de lodo y escombros, tal como se puede observar en la **Figura 75**.

Figura 75. Grillado del modelo digital de elevaciones del distrito de Lircay, de 5mx5m



Fuente: Elaboración propia en el software - Flo - 2D

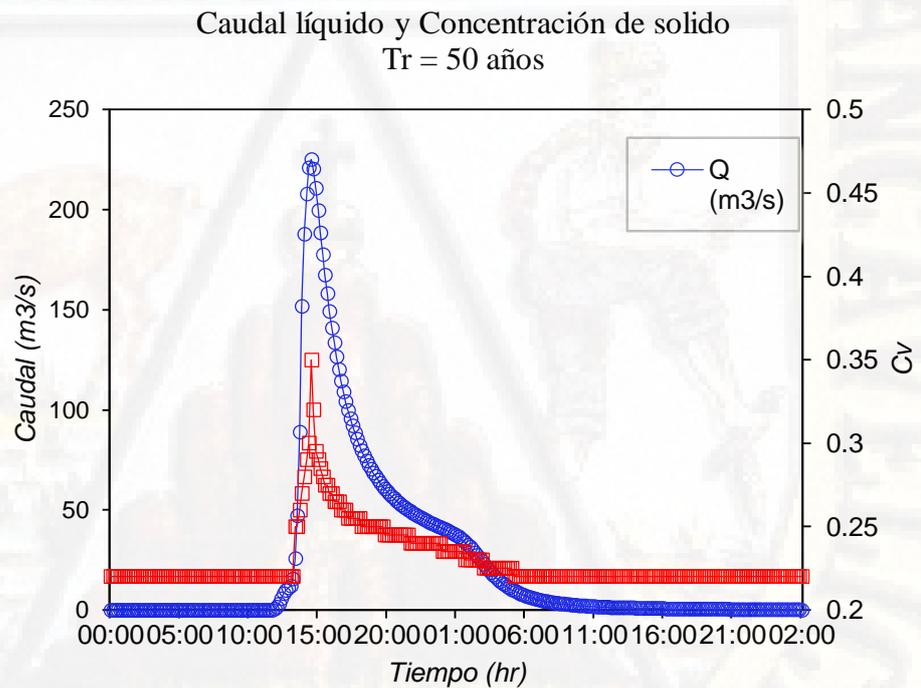
4.1.4.1.2. Hidrograma líquido - sólido.

Para la generación de un hidrograma líquido – sólido, parte de la concentración volumétrica máxima estimada ($C_v=0.35$) en la cual según

estudios O'Brien y Julien (1983) recomienda que la concentración volumétrica empiece con un valor de concentración cercano a 0.22 y luego aumentar gradualmente hasta llegar a su máximo valor, además este valor máximo debe ubicarse minutos antes del pico del hidrograma líquido.

De acuerdo con estas referencias se generó el hidrograma líquido – sólido basándonos con los datos del hidrograma de evento extremo (ítem 4.1.2.8.3) y el volumen de concentración de 0.35, la **Figura 76** y **Figura 77** muestran distribuciones de concentración de material sólido para los crecientes de $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años .

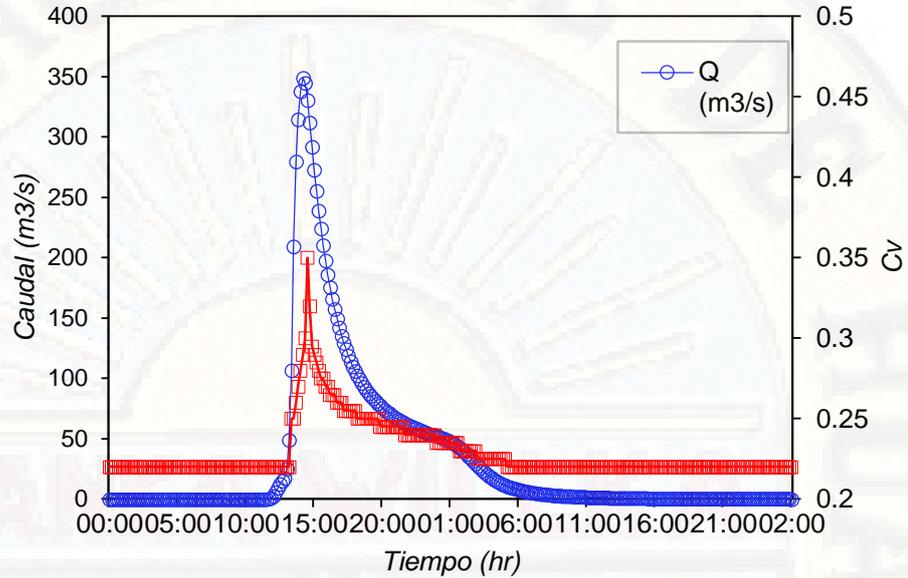
Figura 76. Hidrograma de caudal líquido y concentración de sólidos para $Tr=50$ años



Fuente: Elaboración Propia

Figura 77. Hidrograma de caudal líquido y concentración de sólidos para $Tr=100$ años

Caudal líquido y Concentración de solido
Tr = 100 años



Fuente: Elaboración Propia

4.1.4.1.3. Caracterización sedimentológica (parámetros reológicos)

Para la caracterización sedimentológica del material en el cono de deyección de flujo de lodo y escombros se realizó visitas a campo con el fin de realizar una inspección directa de la variación de tamaño de sedimentos

Así mismo con la finalidad de realizar la simulación de flujos de lodo y escombros en la subcuenca del río Sicra, se ha utilizado el análisis granulométrico realizado en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Huancavelica para lo cual se tomó se tomó muestras en el cauce principal (M-01, M-02) y en zonas críticas a deslizamientos (M-03, M-04), con estas muestras se realizaron el análisis de laboratorio.

Tabla 33. Resultados del análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422)

Muestra	Caracterización de estratos		Límite líquido	Índice plástico
	Humedad (%)	Clasificación (SUCS)		

	Arcilla (%)				
	D ₂₀₀				
En el cauce principal					
CL-01	0.21	-	SW-SP	NP	NP
CL-02	0.18	-	SW-SP	NP	NP
En el abanico aluvial					
CL-03	0.23	8.19	GW-GP	0.26	0.062
CL-04	0.31	10.45	GW-GP	0.27	0.087

Fuente: Elaboración Propia

Consecuentemente con los resultados obtenidos en la **Tabla 33**, del porcentaje de arcilla y la concentración volumétrica se procedió con la selección de los parámetros reológicos del flujo de lodo y escombros, para lo cual se realizó comparando los resultados obtenidos de insitu con los ensayos de laboratorio realizados por O'Brien y Julien en 1988 (**Tabla 8**). en ese sentido se selecciona la muestra Aspen Natural Soil por tener propiedades similares a los ensayos realizados de análisis granulométricos en el abanico aluvial de la subcuenca del río Sicra.

Tabla 34. Selección de matriz de flujos de lodo (limo y arcilla), de propiedades similares

Muestra tipo	Distribución del tamaño de sedimento				Límite líquido	Índice plástico
	Arcilla (%)	D16	D50	D84		
<i>Aspen natural soil</i>	27	0.001	0.012	0.028	0.25	0.06

Fuente: Adaptado de (O'Brien & Julien, 1988)

Así mismo, esta muestra presenta coeficientes empíricos (**Tabla 9**) definidos por experimentos de laboratorio que relaciona la concentración volumétrica de sedimentos, que en nuestro caso es ($C_v=0.35$), donde los flujos menos viscosos son siempre turbulentos y que finalmente se ha obtenido los siguientes parámetros reológicos de esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica.

Tabla 35. Resultados de los parámetros reológicos de esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica

$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
α	β	α	β
0.152	18.7	0.00136	28.4

Fuente: Adaptado de (O'Brien & Julien, 1988)

4.1.4.1.4. Coeficiente de rugosidad de Manning.

El cálculo de los coeficientes de rugosidad de Manning se realizó en base al análisis comparativo de imágenes landsat 8 y los registros de visitas de campo para calibrar los datos, el valor del número de Manning en el cauce del río es el mismo que fue de la calibración del caudal líquido (**Tabla 30**), mientras que para las áreas aledañas se utilizó el método de técnicas de campo en superficie de agua por el Servicio Geológico de los Estados Unidos y la tabla de coeficiente de rugosidad de Manning propuesta por Ven Te Chow 1994.

Consecuentemente se obtuvo el valor del número de Manning para áreas aledañas de 0.060 lo cual corresponde a áreas urbanas de densidad media, para dicha selección se utilizó la tabla de coeficiente de rugosidad propuesta por (G. Kaiser, y otros, 2012).

Tabla 36. Valores de cobertura de usos de suelos representativos en cauce y zonas urbanas

Land cover class	Mannings n	Manning M in $m^{1/3} s^{-1}$	Source
Barren land/mud, sand, beach, roads	0.0310	32	b
Grassland	0.0360	28	b
Young Plantation	0.0370	27	b
Scrubland	0.0380	26	b
Cashew Plantation	0.0430	23	b
Other plantation	0.0430	23	b
Coconut plantation	0.0458	22	a
Semi open landscape	0.0550	18	b
Oil plantation	0.0573	17	a
Middle density urban area	0.0600	17	c,d
Melaleuca forest	0.0550	18	b
Rubber plantation	0.0609	16	a
Casuarina forest	0.0731	14	a
Inner beach forest	0.0744	13	a
High density urban area	0.0800	12.5	c,d
Other forest/rainforest	0.0850	12	c,e
Outer beach forest	0.0870	12	a
Mangrove forest	0.0951	11	a
Buildings non-resistant	0.0900	11	c,f
Buildings resistant	0.4000	2.5	c,f
Mangrove area 2005 (post-tsunami)			
Mangrove → water	0.0110	90	a,b,g
Mangrove → mud	0.0310	32	a,b,g
Mangrove → damaged understory	0.0310	32	a,b,g
Mangrove → sand	0.0310	32	a,b,g
Mangrove → inclined, roots remaining	0.0360	28	a,b,g
Mangrove → no damage	0.0951	11	a,b,g
Mangrove → indirect damage	0.0951	11	a,b,g

Fuente: Adaptado de (G. Kaiser, y otros, 2012)

Tabla 37. Resultados del número de Manning (n)

Área	Valor del número de Manning (n)
Cauce principal del río	0.046
Área urbana de densidad media	0.06

Fuente: Elaboración Propia

4.1.4.1.5. Descripción de la simulación con Flo - 2D

Para la simulación, primeramente, se debe procesar la topografía existente para obtener un Modelo Digital de Elevaciones (DEM). Una vez obtenido el Modelo Digital de Terreno (MDT), se procede a importar el DEM al procesador GDS (System Developer Grid) el cual permite definir

las grillas para la simulación. En el ambiente del pre-procesador (GDS) una vez obtenidos las grillas y delimitado el dominio computacional se procede a asignar los coeficientes de Manning y la ubicación del hidrograma de entrada (Inflow) en la grilla del dominio computacional. Luego de definir, asignar los valores de Manning, también se define las grillas de salidas de flujo (Outflow).

Para la modelación de un flujo de lodo y escombros con el software Flo - 2D se requiere como mínimo 7 archivos cuya extensión es .DAT. Estos archivos son los siguientes.

FPLAIN.DAT

CADPTS.DAT

CONT.DAT

TOLER.DAT

INFLOW.DAT

OUTFLOW.DAT

SED.DAT

A continuación, se explica brevemente los principales archivos que requiere el software Flo - 2D para realizar la simulación.

- Los archivos FPLAIN.DAT y CADPTS.DAT son creados por el pre-procesador GDS y nos indican el número de grillas utilizadas con su respectiva numeración. La cota de terreno y el coeficiente de Manning que corresponde a cada grilla son especificados en estos archivos.
- El archivo CONT.DAT es el archivo principal del programa y aquí se define el tiempo de simulación y el proceso físico a analizar. Para

nuestro caso el proceso a ser simulado es Mud/Debris o flujo de lodo y escombros.

- El archivo TOLER.DAT es donde se indican las variables de control del sistema y dónde se define la ecuación de momentum, (Fluid Dynamic Wave) y los coeficientes de estabilidad para la onda dinámica. También se indica el paso de tiempo utilizado (Timestep).
- El archivo INFLOW.DAT es dónde se describe el hidrograma de entrada y la numeración de la grilla de inicio. Para el caso de simulaciones de flujos de escombros el hidrograma líquido va acompañado de una distribución de concentración de sedimentos. El programa se encarga de calcular el hidrograma de la mezcla para después proceder a transitarlo hacia aguas abajo.
- El archivo OUTFLOW.DAT es donde se indican las grillas por donde el flujo seguirá su camino. Para nuestro caso, estas grillas se ubicarían en la parte baja de la quebrada. Estas grillas de flujo de salida deben indicarse para el caso de que la topografía no esté completa aguas abajo.
- El archivo SED.DAT es dónde se indican las propiedades reológicas del flujo de detritos. Las propiedades reológicas dependen del tipo de material existente en la subcuenca y si se trata de un flujo muy viscoso o granular. Dentro de este archivo, debemos definir los coeficientes de viscosidad dinámica y esfuerzo de cedencia; la gravedad específica del sedimento (G_s) y el parámetro de resistencia para flujos laminares (K). Una vez ingresado todos los parámetros correspondientes y bajo cierto criterio del tipo de flujo a simular, se procede a realizar el Run o simulación del flujo de lodo y escombros para la subcuenca respectiva.

- Finalmente, los resultados son graficados en los post-procesadores MAPPER ++ y MAPPER Pro pertenecientes al programa Flo - 2D. Los resultados obtenidos por el programa son las elevaciones del terreno, tirantes, velocidades, presión de impacto, volúmenes de agua y sedimento del flujo.

4.2. Discusión de resultados

4.2.1. Simulación del Flo - 2D en la Subcuenca del río Sicra

Una vez conocido los parámetros anteriormente descritos (hidrológicos, geomorfológicos y geodinámicos), se simularán diferentes escenarios posibles a ocurrir, estos escenarios estarán relacionados a los periodos de retorno y la concentración volumétrica de sedimentos (C_v).

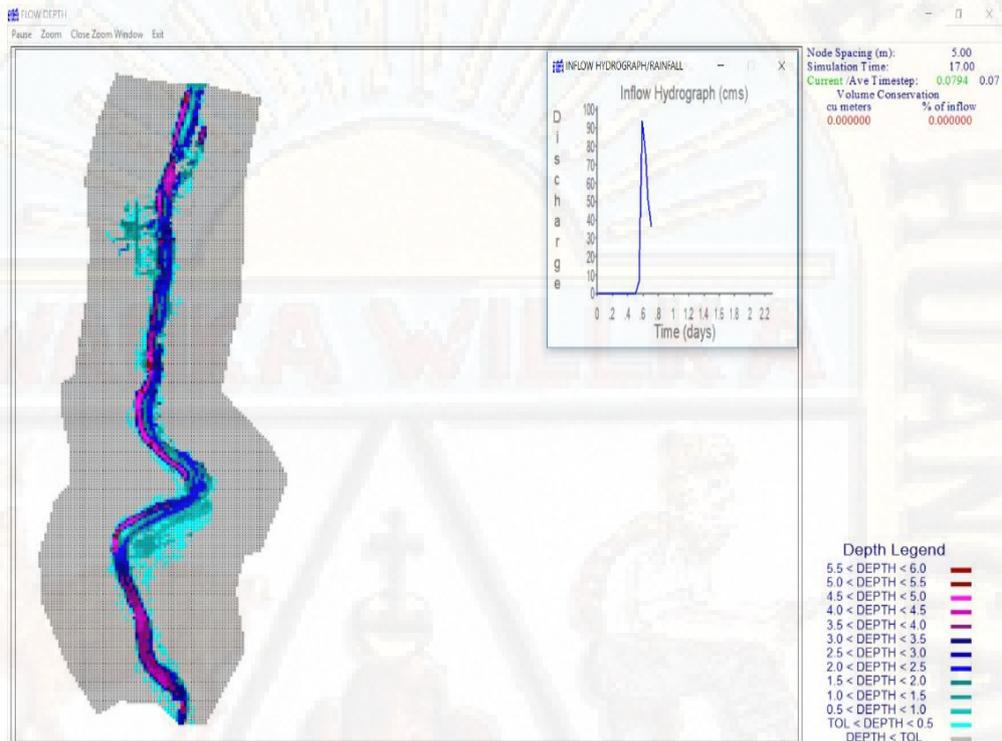
- Escenario 1: Considera la simulación del tramo en estudio para caudales máximos para un tiempo de retorno ($T_r=50$ años), con un caudal máximo de $225.00 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración volumétrica máxima ($C_v=0.35$).
- Escenario 2: Considera la simulación del tramo en estudio para caudales máximos para un tiempo de retorno ($T_r=100$ años), con un caudal máximo de $349.30 \text{ m}^3/\text{s}$ y una concentración volumétrica máxima ($C_v=0.35$).

Se creó una grilla con celdas de 5×5 metros, teniendo un total 1,446 celdas para el área urbana de la subcuenca del río Sicra.

Una vez comprobados los datos mediante verificación manual, procedemos a correr el Flo - 2D propiamente dicho, donde se aparecen dos ventanas, la primera que nos muestra como el flujo se está desplazando por el cauce de la río Sicra y parte de la ciudad, esto en un tiempo T con caudal Q , y la segunda es una representación gráfica del hidrograma propiamente dicho **Figura 78**. Este es el proceso más largo, ya que cuando el caudal llega a su

pico, aumenta demasiado rápido con respecto al tiempo, por lo que la simulación se hace más lenta.

Figura 78. Ventana de Flo - 2D, simulación del flujo y desarrolla del hidrograma en el tiempo



Fuente: Elaboración Propia

Finalizado la simulación los resultados con el programa Flo - 2D, estos se almacenan en el archivo SUMMARY.DAT del cual se obtiene los volúmenes mostrados en la **Tabla 38** y **Tabla 39**.

Tabla 38. Salidas del programa Flo - 2D (Q = 225.00 m³/s - Tr = 50 años)

Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Bulked w/Sediment (m ³)
Hidrograma de entrada (Inflow)	4'235,896.07	5'737,539.54
Almacenamiento dentro del área de análisis	5,679.73	7,473.18
Flujo fuera del área de análisis (Outflow)	4'230,216.34	5'730,066.35

Fuente: Elaboración Propia

Para la simulación el volumen total de la creciente simulada es de 9.97 millones de m³, de los cuales 4.23 millones de m³ son agua y 5.74 millones de m³ corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 75,200.00 m².

Tabla 39. Salidas del programa Flo - 2D (Q = 349.30 m³/s - Tr = 100 años)

Flujo (m ³)	Agua (m ³)	Bulked w/Sediment ((m ³))
Hidrograma de entrada (<i>Inflow</i>)	5'927,259.09	8'113,853.35
Almacenamiento dentro del área de análisis	6,223.72	8,278.04
Flujo fuera del área de análisis (<i>Outflow</i>)	5'921,035.37	8'105,575.31

Fuente: Elaboración Propia

Para la simulación el volumen total de la creciente simulada es de 14.04 millones de m³, de los cuales 5.93 millones de m³ son agua y 8.11 millones de m³ corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 83,150.00 m².

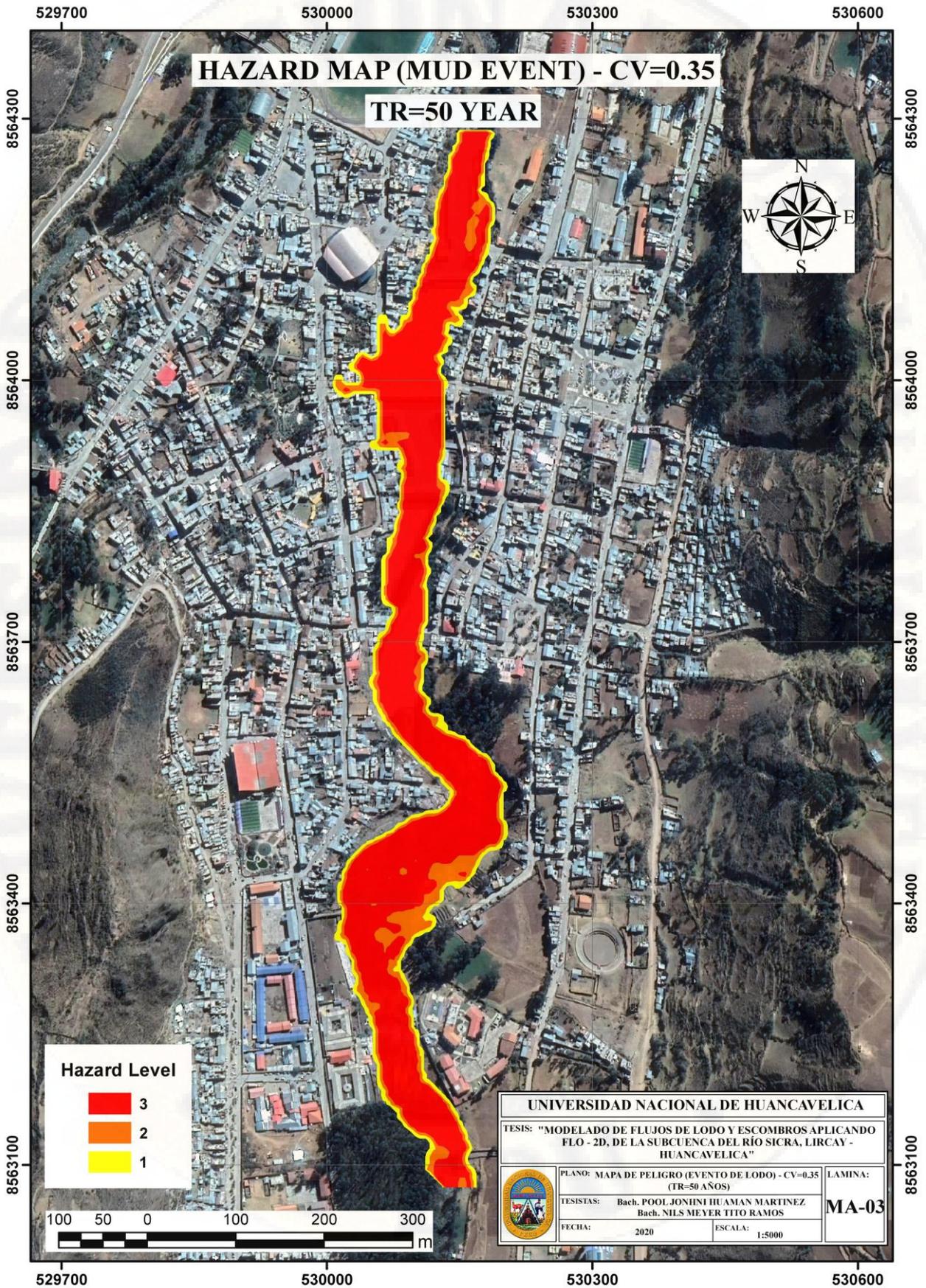
4.2.1.1. Utilización del post procesador (MAPPER PRO) en el Flo - 2D

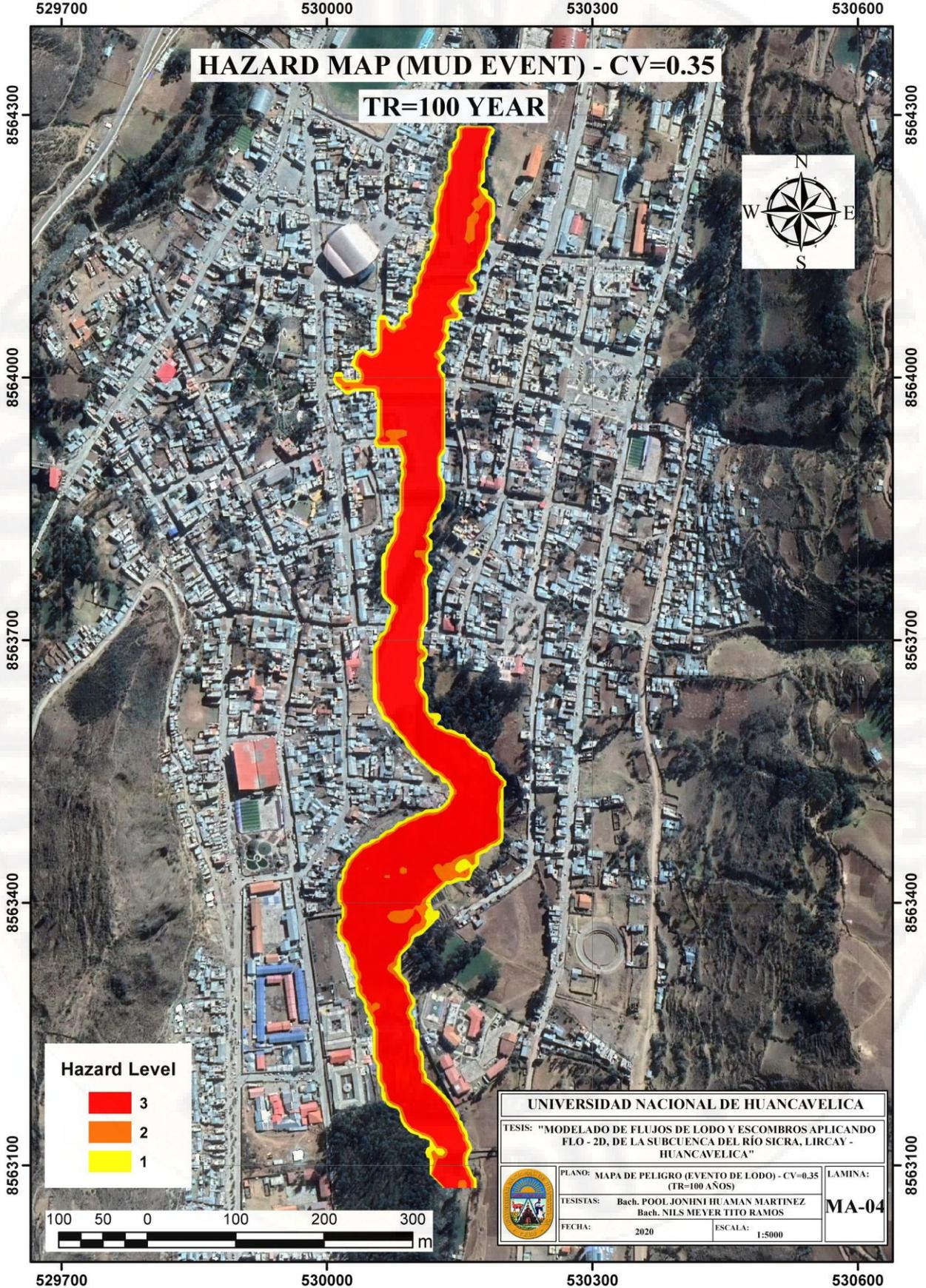
El Post Procesador (*MAPPER PRO*) podría definirse como un subprograma de tratamiento de datos generados y post-procesamiento gráfico, para el modelo Flo - 2D. Con el *MAPPER PRO*, uno puede obtener diferentes mapas temáticos, entre los cuales tenemos: altura máxima de los flujos (picos), velocidades máximas del flujo, fuerzas de impacto máximas en el terreno, presiones estáticas máximas en el terreno, energías específicas máximas en el terreno, etc. Estos resultados se adjuntan en el **Anexo C.3**.

La herramienta esencial del *MAPPER PRO* es la generación de mapas de peligro, en nuestro caso fue usado para generar mapas de peligros digitales según los parámetros del escenario simulados,

4.2.1.1.1. Mapa de peligros por flujo de lodos y escombros

Se generaron mapas digitales de peligros para la subcuenca del río Sicra, tanto para un periodo de retorno de ($Tr = 50$ años) y ($Tr = 100$ años) con una concentración volumétrica ($Cv = 0.35$). Estos mapas de peligro se expresan mediante la coloración de grillas, lo que nos da una mejor visión de los diferentes comportamientos que han tenido los flujos sobre el terreno simulado, siendo en este caso el cauce del río Sicra que pasa por el área urbana de la ciudad de Lircay, así como también por las calles y avenidas de la misma. Los resultados obtenidos de mapas de peligro en nuestra área de estudio mediante el uso del *MAPPER PRO* son los siguientes:





De donde se observa zonas de peligro:

- Zona de peligro alto: Representado por las zonas de color rojo, en la cual un flujo con los parámetros simulados presenta mayor altura, mayor velocidad de desplazamiento, entre otras características. En las zonas los daños serían totales, las viviendas y otras serían destruidos en su totalidad.
- Zona de peligro alto a medio: Representado por las zonas de color anaranjado, en la cual el flujo no tuvo características tan complejas como las anteriores, ya que la velocidad del flujo pudo haber sido alta, pero sus alturas fueron mínimas, la topografía y la rugosidad pudieron obstaculizar, retener o canalizar parcialmente el flujo, etc.
- Zona de peligro medio a bajo: Representada por las zonas coloreadas de color amarillo, donde el flujo no alcanzó más que unos centímetros de altura, los daños materiales serían mínimos o nulos, debido a que estas zonas presentarían inundaciones parciales.
- Zona de peligro bajo: Representadas por las zonas de color blanco, donde no llegó el flujo, ya sea por factores naturales o por obras de contención, estas zonas son las más indicadas para ser usadas en caso de evacuación rápida.

4.2.2. Validación del Flo - 2D

Como parte del trabajo del presente proyecto de investigación, se recomienda la calibración y validación del modelo para cada trabajo de modelado de riesgo de inundación. Sin embargo, la disponibilidad de datos ha dificultado la calibración en la zona de estudio por tener escasez de datos, donde no hay una estación hidrométrica dentro de la sub cuenca y bases de datos hidrológicas bien establecidas.

La validación es el proceso de establecer evidencia que proporciona información razonable de que la salida del software es lo suficientemente buena como para representar los hechos en el terreno al nivel aceptable. La validación del modelo de este estudio empleó la recolección de puntos de control de tierra (GCP) en zonas de deslizamientos activos, evidencias por erosión fluvial en zona urbana de Lircay. Ambos se utilizaron para identificar la inundación máxima que pudiera causar en eventos de precipitaciones máximas. Debido a evidencias ocasionadas en los últimos años por inundación se ha optado realizar el modelamiento en tramo crítico del cauce del río Sicra, de la zona urbana del distrito de Lircay, progresiva 0+565 km al 1+744 km.

El trabajo de validación se realizó realizando mediciones en campo como altura máxima que alcanzó la inundación del año 2017, precisamente en la zona del hotel “La Hacienda” que ocasionó el colapso de dicho hotel, así mismo se realizó la medición del área, perímetro y levantamientos topográficos con GPS MAP64 (Garmin), en los puntos de control de tierra (GCP) de zonas altamente activos a deslizamientos y grandes desprendimientos de escombros.

Figura 79. Identificación de puntos de control en zonas críticas de suelos inestables con alta presencia de grava suelta



Fuente: Elaboración Propia

Figura 80. Medición en campo el ancho de deslizamiento ocurrido, depositado en el cauce del río Sicra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 81. Identificación de puntos de control en zonas críticas caída de rocas hacia el cauce del río Sicra



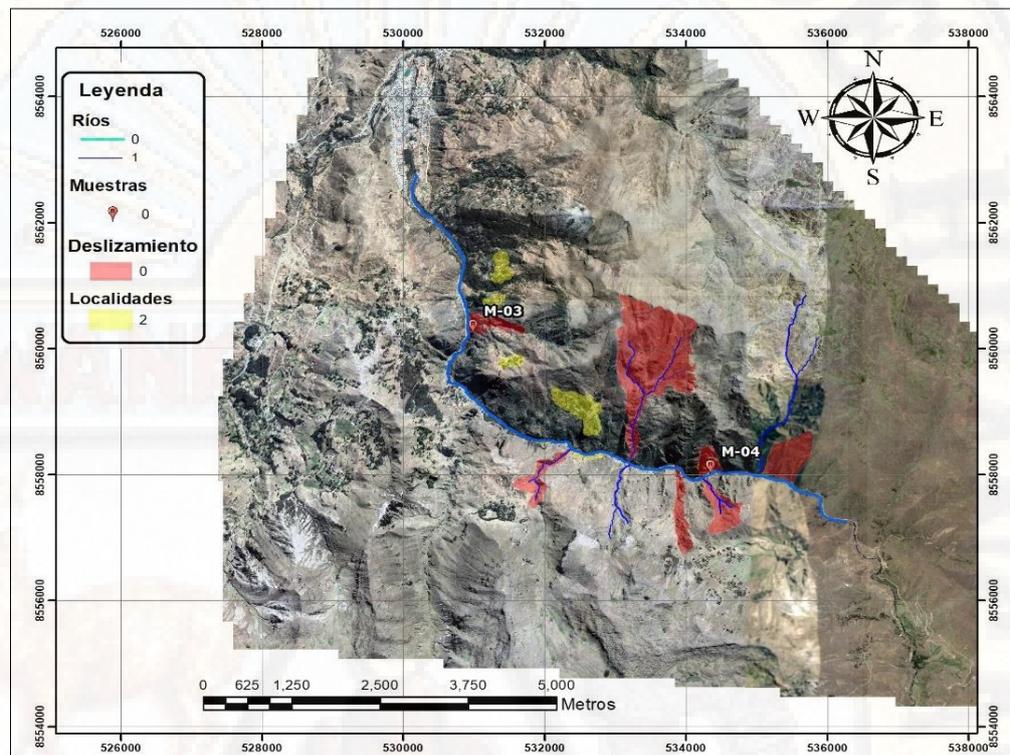
Fuente: Elaboración Propia

Figura 82. Identificación de puntos de control, Caída de rocas mayores 2.00 metros de longitud, al cauce del río Sicra



Fuente: Elaboración Propia

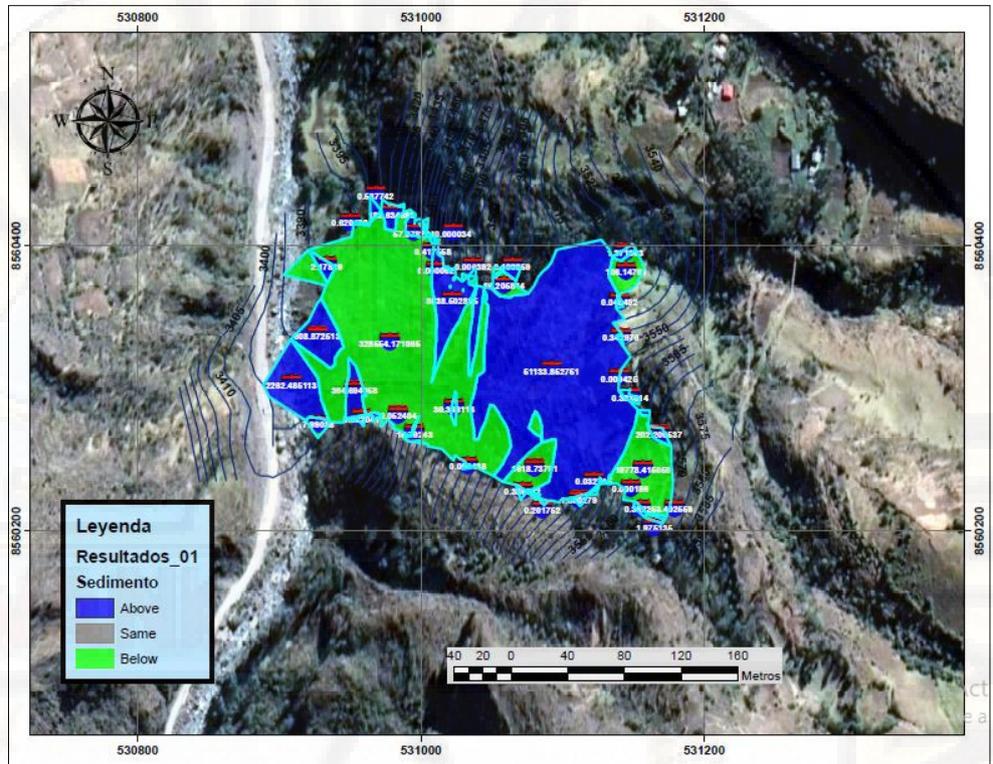
Figura 83. Identificación de puntos de control en zonas críticas y con mayor vulnerabilidad a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombros hacia el cauce principal del río Sicra



Fuente: Elaboración Propia

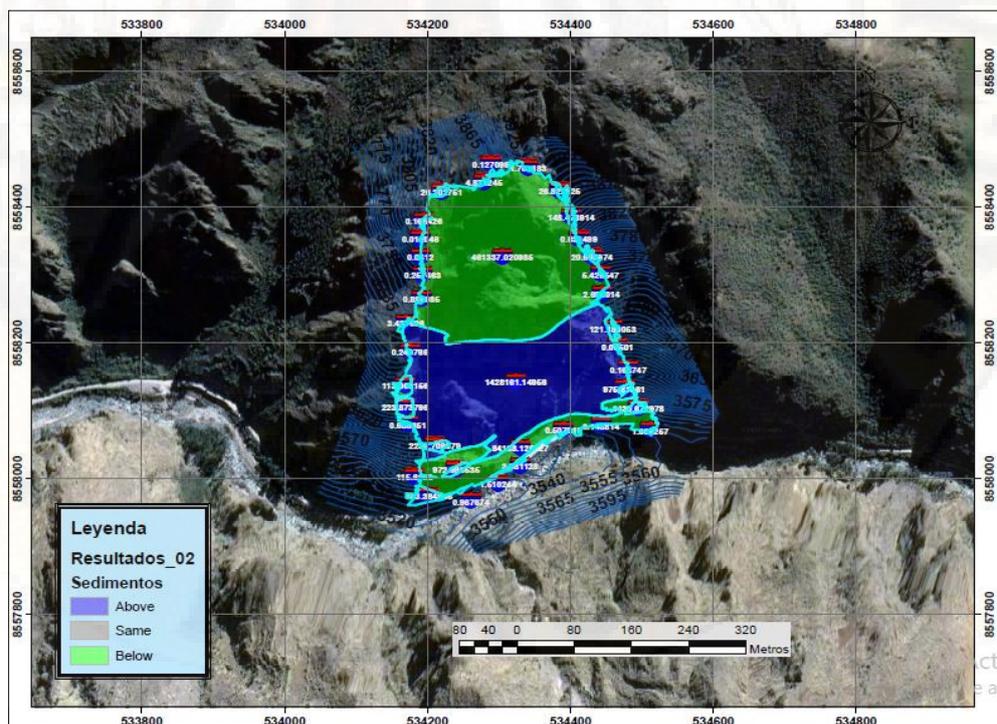
Se sabe que el deslizamiento se denomina como el movimiento de suelo o roca sobre la pendiente por inestabilidad de su talud, causado principalmente por filtraciones de altas precipitaciones, y otros diferentes factores, para calcular el volumen se utilizó el software ArcGIS 10.4.1. lo cual realiza por diferencia de modelos de elevación digital (TIN), para ello con base a levantamientos topográficos, trabajos de campo y el uso del programa en mención se estimó el siguiente volumen de sedimento de la combinación de: deslizamientos rotacionales, caída de rocas desprendimiento de escombros y evidencias de erosión, los cuales se muestran en **Figura 84** y **Figura 85**.

Figura 84. Estimación de volumen de sedimentos propensos a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombros



Fuente: Elaboración Propia

Figura 85. Estimación de volumen de sedimentos propensos a deslizamientos, caída de rocas y desprendimiento de escombro



Fuente: Elaboración Propia

Finalmente se tiene los resultados del volumen de sedimentos en la **Tabla 40.** que podría aportar a la subcuenca del río Sicra ante el evento a simular, donde este dato se usó para verificar la compatibilidad del resultado del software con los resultados obtenidos en campo. Para las evaluaciones de precisión, se recolectaron 06 puntos de control de tierra (GCP) durante el estudio de campo.

Tabla 40. Resultado de volumen de sedimento depositado en el cauce del río Sicra estimados de campo

Fid*	Zonas Críticos	Volumen (m3)	Área (m2)	Code
17	Zona 01	341,157.42	41,736.76	-1
21	Zona 02	549,154.46	80,935.23	-1
56	Zona 03	1'549,154.46	228,316.76	-1
48	Zona 04	854,689.23	81,750.95	-1
78	Zona 05	1'879,254.25	276,967.37	-1
23	Zona 06	978,157.42	138,709.22	-1
Volumen Total =		6'151,567.24	848,416.28	

Fuente: Elaboración propia

El volumen de sedimento estimado corresponde a $6'151,567.24 \text{ m}^3$, mientras que el volumen simulado del modelo Flo - 2D fue de $8'113,853.35 \text{ m}^3$. Este resultado representa un 131.90% de construcción de un posible evento de flujos de lodo y escombros. Este resultado (volumen de flujos de lodo y escombros $8'113,853.35 \text{ m}^3$) no incluye el arrastre. Esta es una limitación del modelo Flo - 2D. El arrastre es un proceso importante de flujo de detritos que aumenta el volumen de flujo de detritos (Escobar Soto & Poma Yaranga, 2018).

4.2.3. Discusión de resultados

Para determinar los resultados de nuestra investigación denominada “MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RIO SICRA, LIRCAY -

HUANCAVELICA” y dar cumplimiento a mi objetivo general que es el de “Definir zonas de peligro de flujos de lodo y escombros generados por parámetros geomorfológicos, hidrológicos y geodinámicas en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica”, se alcanza los siguientes resultados:

Se ha definido zonas de peligro por flujos de lodo y escombros, donde el volumen de sedimento simulado por el modelo Flo – 2D, fue igual a 8.10 millones de m³, para un periodo de retorno de 100 años, que finalmente ha sido representada mediante mapas de peligro de zonas causados por el transporte de flujos de lodo y escombros.

Para el cumplimiento de mi objetivo específico N° 01 que es el de “Determinar los parámetros geomorfológicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica”, se realizaron los cálculos respectivos del cual se obtiene los siguientes resultados:

Se ha determinado los parámetros geomorfológicos, donde se ha obtenido la representación gráfica del relieve de la subcuenca del río Sicra, que según la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes se encuentra en fase de juventud en la cual se puede observar el alto grado de potencial erosivo de la subcuenca, esto indica que en eventos máximos determina la ocurrencia de deslizamientos laterales que permite la formación de flujos de lodo y escombros por erosión fluvial.

Para el cumplimiento de mi objetivo específico N° 02 que es el de “Identificar los parámetros hidrológicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica”, se realizaron los cálculos respectivos del cual se obtiene los siguientes resultados:

Se ha identificado los parámetros hidrológicos obteniendo los caudales máximos calibrados para un periodo de retorno de 100 años se tiene un caudal máximo de 349.30 m³/s, de los análisis llegamos a la conclusión que estos

caudales, que después de ocurrido los deslizamientos y depositados en el cauce del río, estas tienen alto grado de transporte de estos materiales (flujos de lodo y escombros).

Para el cumplimiento de mi objetivo específico N° 03 que es el de “Analizar los parámetros geodinámicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica”, se obtienen los siguientes resultados:

Se ha analizado los parámetros geodinámicos donde se ha realizado pruebas de mecánicas de suelos como análisis granulométrico, límites de consistencia y gravedad específica de muestras representativas en cauce del río Sicra ubicado en la zona urbana y en zonas vulnerables a deslizamientos, de los análisis llegamos a la conclusión que se trata de un flujo viscoso con gran porcentaje de material fino (flujo no newtoniano), los cuales ante una avenida máxima tienen un comportamiento del tipo mudflow, según el criterio de Juen y Lan (1991), lo que ocasionaría un flujo de lodos generando zonas de peligro en la subcuenca del río Sicra.

CONCLUSIONES

La investigación desarrollada en esta tesis ha llegado a las siguientes conclusiones:

1. Se ha definido zonas de peligro por flujos de lodo y escombros, donde el volumen de sedimento simulado por el modelo Flo – 2D, fue igual a 8.10 millones de m³, para un periodo de retorno de 100 años, que finalmente ha sido representada mediante mapas de peligro de zonas causados por el transporte de flujos de lodo y escombros.
2. Se ha determinado los parámetros geomorfológicos, donde se ha obtenido la representación gráfica del relieve de la subcuenca del río Sicra, que según la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes se encuentra en fase de juventud en la cual se puede observar el alto grado de potencial erosivo de la subcuenca, esto indica que en eventos máximos determina la ocurrencia de deslizamientos laterales que permite la formación de flujos de lodo y escombros por erosión fluvial.
3. Se ha identificado los parámetros hidrológicos obteniendo los caudales máximos calibrados para un periodo de retorno de 100 años se tiene un caudal máximo de 349.30 m³/s, de los análisis llegamos a la conclusión que estos caudales, que después de ocurrido los deslizamientos y depositados en el cauce del río, estas tienen alto grado de transporte de estos materiales (flujos de lodo y escombros).
4. Se ha analizado los parámetros geodinámicos donde se ha realizado pruebas de mecánicas de suelos como análisis granulométrico, límites de consistencia y gravedad específica de muestras representativas en cauce del río Sicra ubicado en la zona urbana y en zonas vulnerables a deslizamientos, de los análisis llegamos a la conclusión que se trata de un flujo viscoso con gran porcentaje de material fino (flujo no newtoniano), los cuales ante una avenida máxima tienen un comportamiento del tipo mudflow, según el criterio de Juien y Lan (1991), lo que ocasionaría un flujo de lodos generando zonas de peligro en la subcuenca del río Sicra.

RECOMENDACIONES

1. En vista de que el Flo - 2D tuvo resultados óptimos para el estudio de la quebrada Paihua (Castillo, 2006), quebrada Runtumayo (Cárdenas et al., 2007), Urubamba y Ollantaytambo (Valderrama et. al, 2006), quebrada Acobamba (Oviedo, 2007), Aguas Calientes (Valderrama et al., 2006) y otros estudios, se recomienda aplicarlo en todas las quebradas y zonas que presenten peligros ante la ocurrencia huaycos, flujos de lodo, aluviones, inundaciones, entre otros; contribuyendo a la prevención de peligros geológicos, a un buen ordenamiento territorial y a una mejor calidad de vida.
2. Se recomienda usar un reómetro para la obtención de los parámetros reológicos, ya que estos parámetros son muy importantes para la simulación del Flo - 2D, actualmente estos equipos solo cuentan las empresas mineras, limitando un poco la aplicación al tema de análisis de riesgos.
3. Se recomienda la implementación de sistemas de alerta temprana en la subcuenca del río Sicra para la prevención del riesgo de desastres ante la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos de flujos aluvionales, tales como la instalación de pluviómetros que detecten los umbrales de precipitación ante una posible ocurrencia de estos eventos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Pe, J., & T. Moncada, A. (1999). Regimenes en el flujo de barros y escombros. *Revista científica*, 8-8.
- Aguirre, J., Moncada, A., & Olivero, M. (2000). *Flujo y deposición de barros y escombros*. Venezuela: Universidad de los Andes.
- Aparicio Mijares, F. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México D.F.: Limusa, S.A. Balderas 95, México.
- Arancibia, A. (1998). *Criterios para el manejo de quebradas y su aplicación en el diseño de obras civiles*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- Avendaño, R. (14 de Abril de 2016). *Slide share*. Obtenido de Subcuencas y microcuencas hidrográficas: <https://www.slideshare.net/kimberlynveronica/subcuencas-y-microcuencas>
- Ayala Bizarro, I. A. (2009). Programa Lluvia Escorrentía Para Simulación de Defensas Ribereñas con Object ARX C++. (*Tesis de pre grado*). Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho - Perú.
- Banda, M. (2015). *Análisis comparativo de un modelo hidrodinámico unidimensional para flujo newtonianos y no newtonianos del río seco zona urbana Tacna*. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna.
- Bartali, R., Sarocchi, D., Nahmad, Y., & Rodríguez, A. (2012). *Estudio de flujos granulares de tipo geológico por medio de simulador multisensor GRANFLOW-SIM*. México: Boletín de la sociedad Geológica Mexicana.
- Bateman, A., Medina, V., Hurlimann, M., & Velasco, D. (2017). *Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos FLATmodel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación*. Colombia: Pearson.
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villa, M. A. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*. Mexico: Universidad Autonoma Metropolitana, Tlalpan, D.F. Mexico.
- Breña Puyol, A., & Jacobo Villa, M. (2006). *Principios y fundamentos de hidrología superficial*. Tlalpan, D.F. México: Rectoría General de la Universidad - México.
- Breña Puyol, A., & Jacovo Villa, M. (10 de Enero de 2006). www.uamenlinea.uam.mx. Obtenido de Principios y Fundaamnetos de Hidrlogía Superficial:

http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf

Build a free website of your own on. (14 de Noviembre de 2018). *TRIPOD*. Obtenido de http://transportesedimentos.tripod.com/esp/1_10_2.htm

C. Pierson, T., & E. Costa, J. (1987). *A rheologic classification of subaerial sediment - water flows*. Washington 98661: Library of congress cataloging-in publication data.

Cahuana A., A., & Yugar M., W. (01 de septiembre de 2009). *Scribd*. Obtenido de Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233: <https://es.scribd.com/document/337669520/Ing-Civil-30-09-09-Adscripcion-MaterialDeApoyoDidacticoParaLaEnsenanzaYApredizajeDeLaAsignatura-pdf>

Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Materialde apoyo didactico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de la hidrología civ-233*. Bolivia .

Cahuana, Y. (2009). Material de apoyo didactico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de hidrología civ-233. (*trabajo dirigido por adscripcion, de diploma académico de licenciatura en ingeniería civil*). Universidad mayor de san simon, cochabamba - bolivia.

Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. San luis Potosí S.L.P. Mexico,: Universitaria Potosina.

Castillo Navarro, L. (2006). Aplicación de un modelo numerico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el peru. (*Tesis de pre grado*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.

Castillo, L. (2006). Aplicación de un Modelo Numerico de Flujos de Escombros y Lodo en una Quebrada del Perú. *Aplicación de un Modelo Numerico de Flujos de Escombros y Lodo en una Quebrada del Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima - Perú.

Castillo, L. (2006). *Aplicación de un modelo numerico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil.

Ccama Lipa, J. E. (2018). *Factores condicionantes y desencadenantes en la determinación del peligro de flujo de detritos aplicando el modelo FLO-2D, quebrada Llocllamayo KM-295+350, Iirsa sur tramo-IV*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.

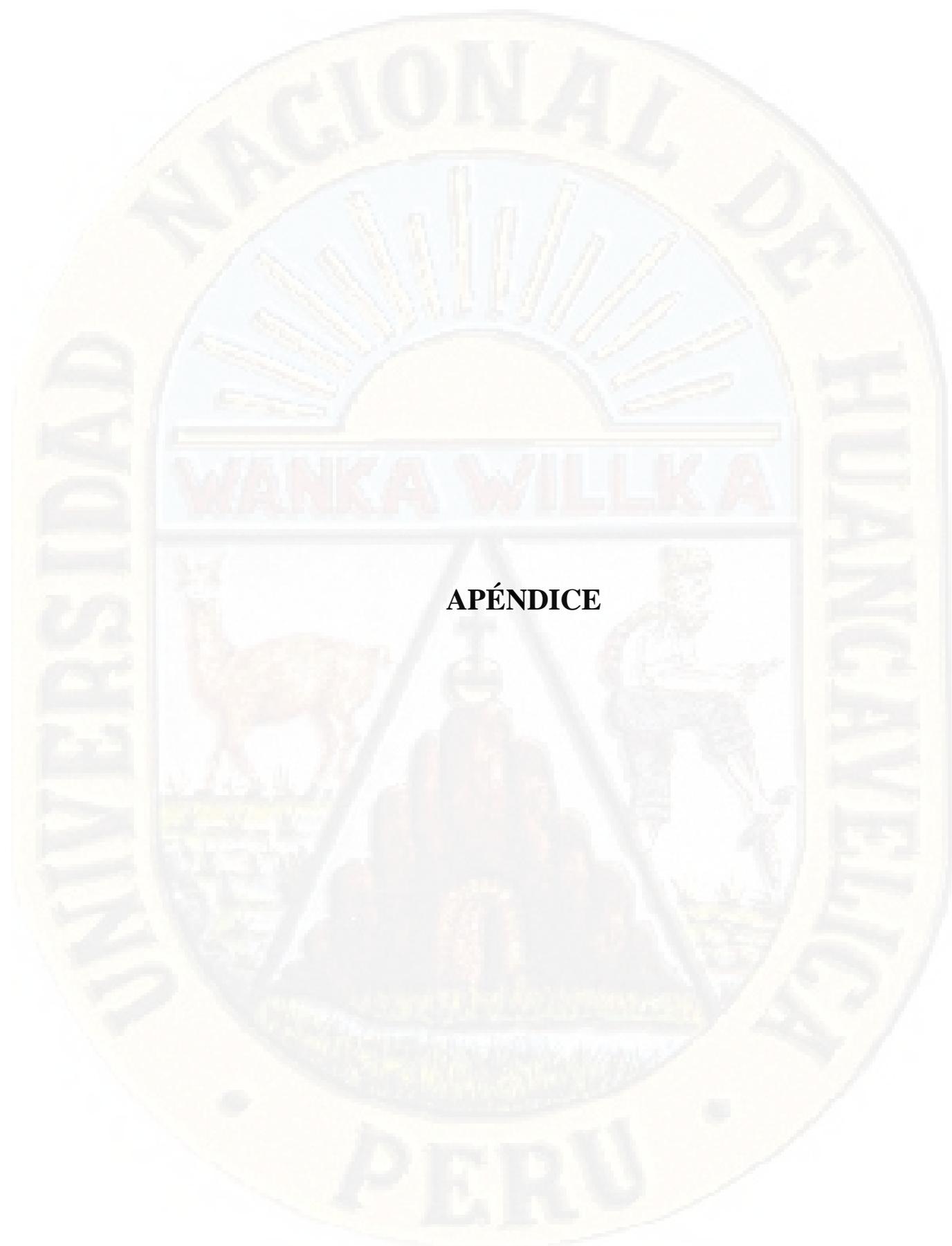
Chahua Janampa. (2016). Dinámica de flujos aluvionales en el centro poblado de Quincemil, subcuena del río Arazá. *Título de Pre Grado*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima - Perú.

- Chahua Janampa, J. (2016). *Dinámica de flujos aluvionales en el centro poblado de Quincemil, subcuena del río Arazá*. Lima - Perú: Repositorio Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Chahua Janampa, J. (2016). Dinámica de flujos aluvionales en el centro poblado de Quincemil, subcuena del río Arazá. (*Título de Pre Grado*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima - Perú.
- Eder, M., Barbeito, O., Ambrosino, S., Hillman, G., Moya, G., & Rodriguez, A. (2016). Análisis y modelo hidráulico (2D) de flujos hiperconcentrados en piedemonte occidental de la sierra de ambato, catamarca, argentina. *SCIPEDIA*, 65-71.
- Escobar Soto, P. (2018). *Analisis 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*. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- Escobar Soto, P., & Poma Yaranga, V. (2018). “*Analisis 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*”. Huancavelica: Universidad Nacional De Huancavelica.
- Escusa, F. (2016). *Análisis y modelamiento de flujos de escombros en la zona de Maranura La Convención - Cuzco*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- G. Kaiser, L. Scheele, A. Korttenhaus, F. Lovholt, H. Romer, & S. Leschka. (2012). The influence of land cover roughness on the results of highresolution tsunami inundation modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5-6.
- Gamion, J. (2014). *Modelo de flujo de escombros y lodo aplicando FLO-2D, caso sub cuena del rio Shullcas*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Google Maps. (15 de 11 de 2018). *Google Maps*. Obtenido de <https://www.google.com/maps/@-13.27033,-74.7004399,619a,35y,38.6t/data=!3m1!1e3?hl=es-ES>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. México: Mc Graw Hill.
- Hungr, O. (2000). *Analysis of Debris Flow Surges Using the Theory of Uniformly Progressive Flow*. Earth Surface Processes and Landforms.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2011). Morfología de las cuencas hidrológicas. *riunet*, 7-9. Obtenido de Morfología de las cuencas.

- Iparraquirre Ortiz, C. (01 de 10 de 2019). *SCRIBD*. Obtenido de Flujo De Escombros: Aspectos Hidrológicos E Hidráulicos: <https://es.scribd.com/presentation/327625184/Flujos-de-Escombros>
- Iverson, R. (1997). *The physics of debris flow*. Reviews of geophysics.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena (Peligros de flujo de escombros y fenómenos relacionados)*. 2329 West Mall, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canadá.
- Luque Pinto, R., & Alva Hurtado, J. (1999). Estimación y Evaluación de Flujo de Escombros. *academia.edu*, 2-2.
- Lux Cardona, B. (2012). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Repositorio usac*, 3-4.
- M.G. Racca, J. (2007). "Análisis hipsométrico, frecuencia, altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales de pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno". *Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología*, 8-8.
- Mayta, V. (2006). *Estudio experimental de flujo de lodos y escombros en suelos granulares con fines de protección*. Lima: Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería.
- Monsalve Sáenz, G. (1998). *Hidrología en la Ingeniería*. Santafé de Bogotá D.C. - Colombia: S.A. DE C.V. Apartado postal 73-267, 03311, Mexico D.F.
- Montenegro, E. (2005). *Hidrología. Apuntes cursos Postgrado Gestión Integral de Recursos Hídricos, Universidad Mayor de San Simón*. Bolivia.
- Montesinos Cáceres, C. (2019). Modelamiento hidrológico en una cuenca Andino-Amazonico utilizando datos grillados del producto Pisco". *Tesis, Pregrado*.
- Moran Wendor, C. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima - Perú: Concytec PUCP.
- Municipalidad Distrital de Lircay. (2017). *Informe de evaluación de riesgo de erosión e inundación fluvial originado por precipitaciones intensas en el área urbana del distrito de Lircay - Provincia de Angaraes*. Lircay - Huancavelica: independiente.
- O'Brien, J., & Julien, P. (1997). *On the importance of mudflow routing*. Proceedings of the first international Conference on Debris Flow Hazards Mitigation, ASCE.
- O'Brien, J., & Julien, P. (1988). Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, 877-887.

- Oliveira, J. (2012). *Estudio del impacto de los flujos de escombros en la cuenca del río San Antonio-Brasil*. Brasil.
- Ordoñez Galvez, J. (01 de septiembre de 2012). *Global Water Partnership*. Obtenido de Aguas Subterráneas - Acuíferos: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf
- Oviedo Mena, M. (2009). *Geología, Geodinámica y simulación de flujos FLO 2D en la quebrada de Saphy - Cusco*. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Paulini Palacios, A. (2005). Evaluación de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Quiroz. (*Tesis de pre grado*). Universidad de Piura, Piura.
- Pierson, T., & Costa, J. (1987). *A rheological classification of subaerial sediment-water flows*. Tsukuba-Japan: Reviews in engineering geology.
- Pinaud, W. (2014). *Estudio experimental de las características dinámicas de un dispositivo disipador viscoso a escala reducida*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.
- Rodriguez, A. (2017). Análisis y modelo hidráulico (2d) de flujos hiperconcentrados en piedemonte occidental de la sierra de Ambato, Catamarca, Argentina. *Artículo*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- S Ibañez, A., & H Moreno, R. (2011). "El uso de las fotografías aéreas en los estudios de suelos". *Riunet de la UPV*, 3-5.
- Sedano Areche, E. (15 de septiembre de 2015). *scribd*. Obtenido de Hidrología general : <https://es.scribd.com/document/296088037/Hidrologia-General>
- Sepúlveda, A., Patiño, J., & Rodríguez, C. (2016). *Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvias caso Útica-Colombia*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana, Departamento de Ingeniería Civil.
- Silva, S. (2001). *Estudio de control de protección de flujos de lodo en las microcuencas de Quirio y Pedregal-Chosica*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería.
- Suárez Díaz, J. (2013). *Deslizamientos*. Bucaramanga Santander, Colombia.: GEOTECNOLOGÍAS S.A.S.
- Takahashi, T. (1980). *Debris flow on prismatic open channels*. Kyoto: Journal of hydraulic division.
- Takahashi, T. (2007). Progress in Debris Flow Modeling. *Springer*, 59-77.

- Takahashi, T. (2009). A Review of Japanese Debris Flow Research. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 1-14.
- Torres, E. (2018). *Tiempo de concentración en la cuenca experimental del río Ichu aplicando la técnica de optimización por algoritmos genéticos*. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica.
- Velit, C. (17 de Febrero de 2019). *Diariocorreo.pe*. Obtenido de Huaico arrasa poblado, deja inhabitables casas, escuelas y centro de salud: <https://diariocorreo.pe/edicion/huancavelica/huayco-arrasa-poblado-deja-inhabitables-casas-escuelas-y-centros-de-salud-871293/3>
- Vente Chow . (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia.: McGraw-Hill Interamericana,.
- Villón Béjar, M. (2002). *Hidraulica de canales, Hidrología*. Lima - Perú: Villón.
- Villón Bejar, M. (2002). *Hidrología*. Lima - Perú: independiente.

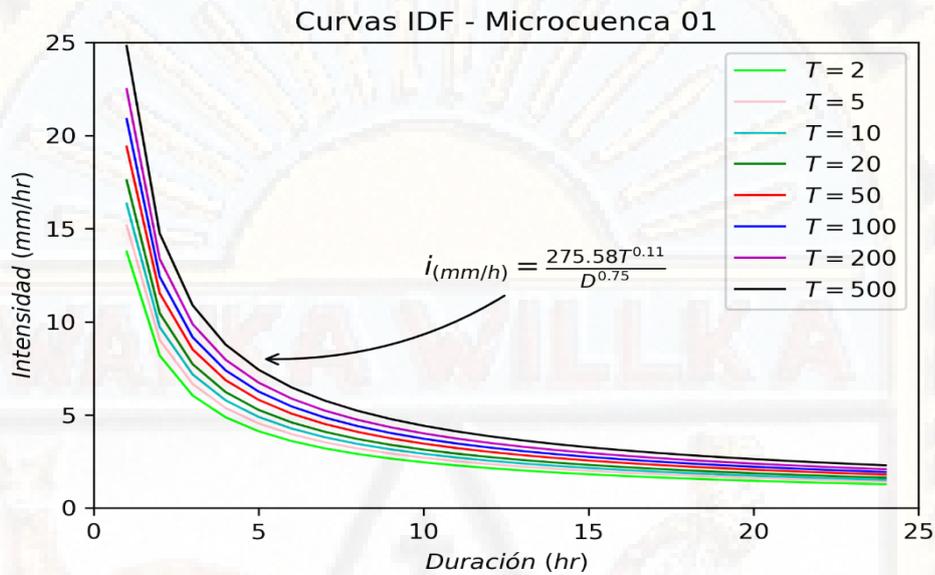


APÉNDICE

ANEXO A – HIDROLOGÍA

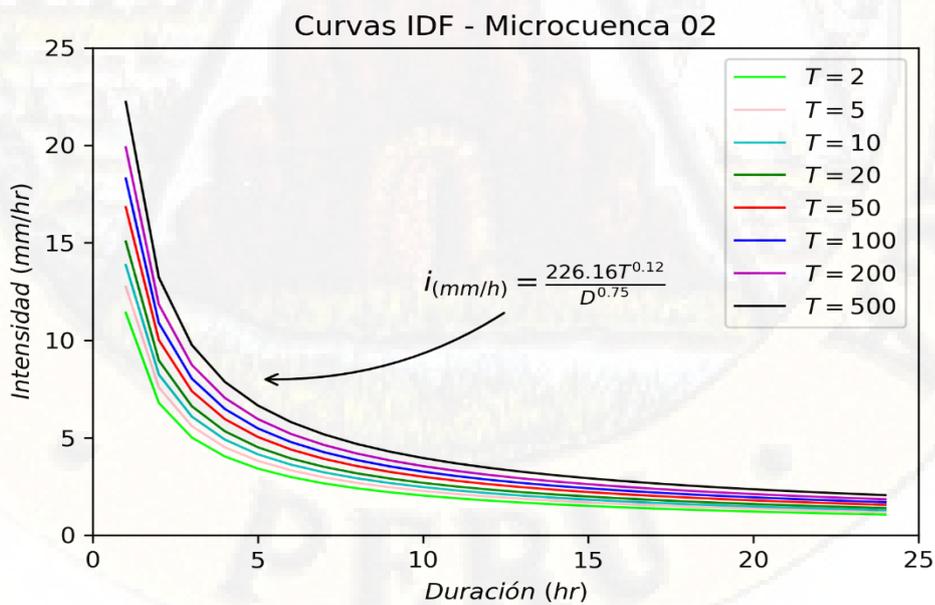
A.1 Curvas IDF de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra

Figura A.1.1. Curva IDF de la microcuenca 01



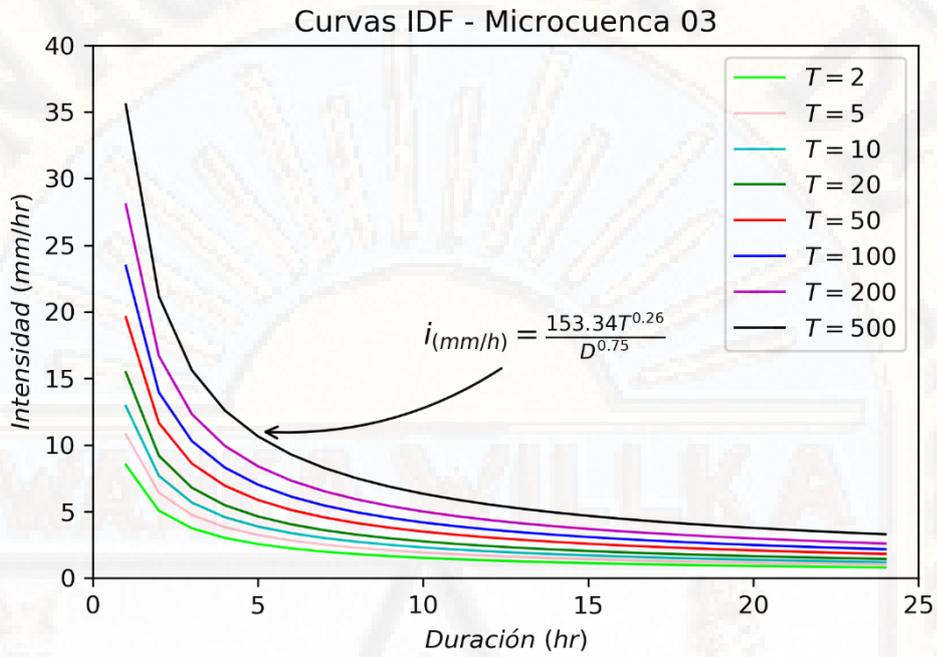
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.2. Curva IDF de la microcuenca 02



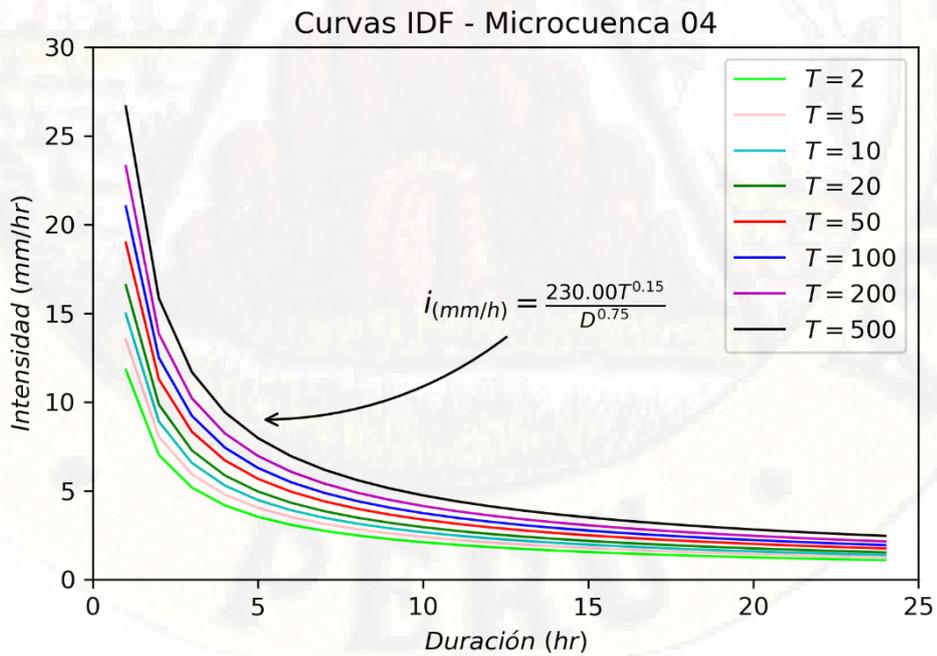
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.3. Curva IDF de la microcuencia 03



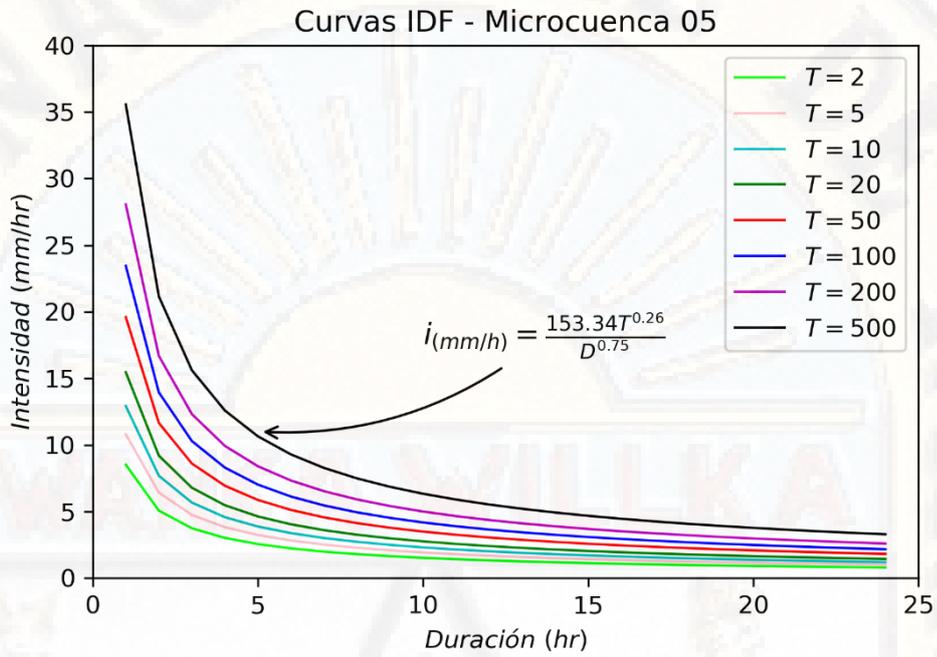
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.4. Curva IDF de la microcuencia 04



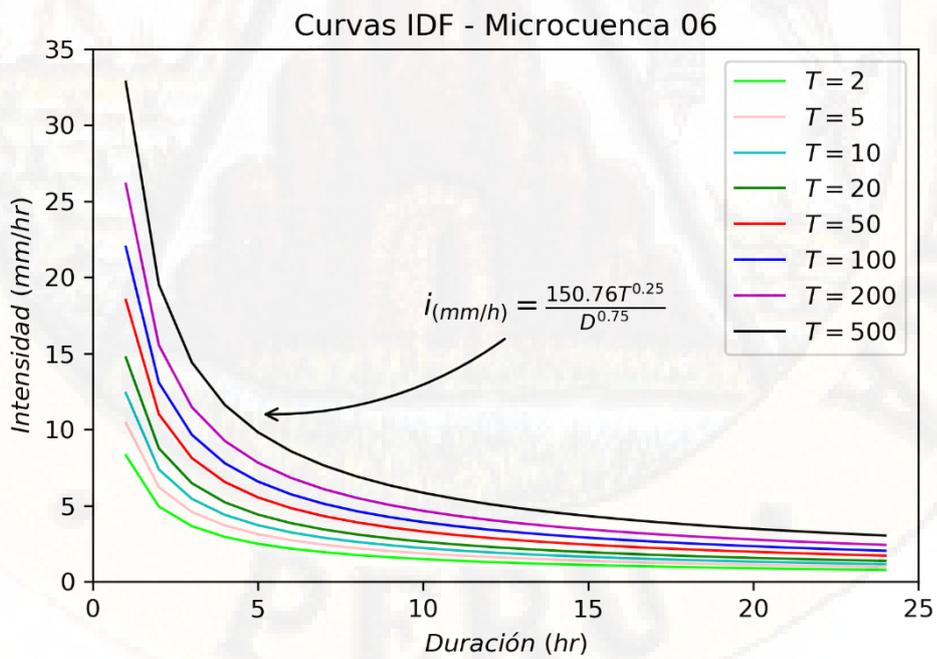
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.5. Curva IDF de la microcuencia 05



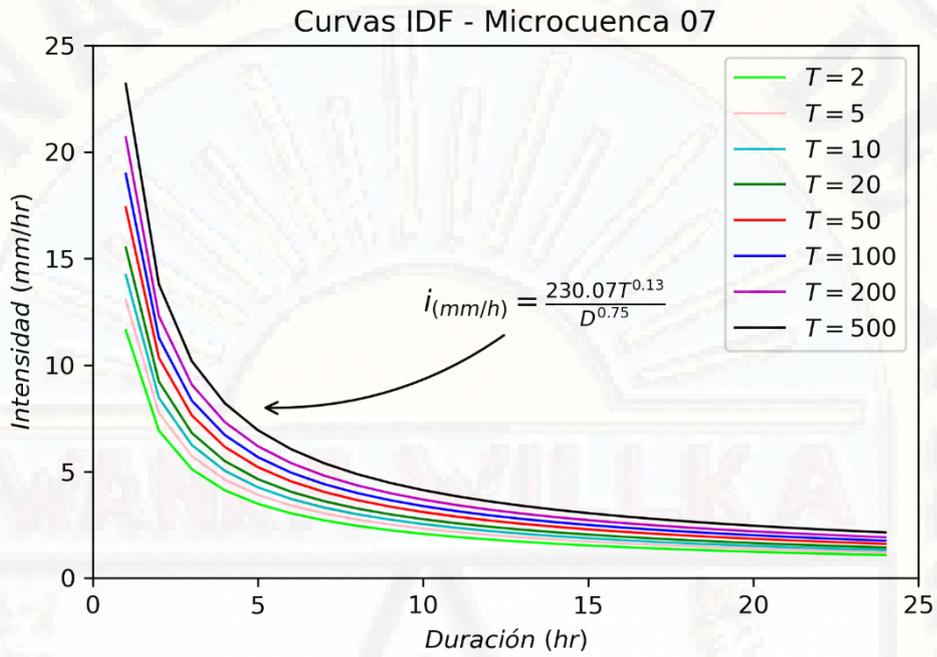
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.6. Curva IDF de la microcuencia 06



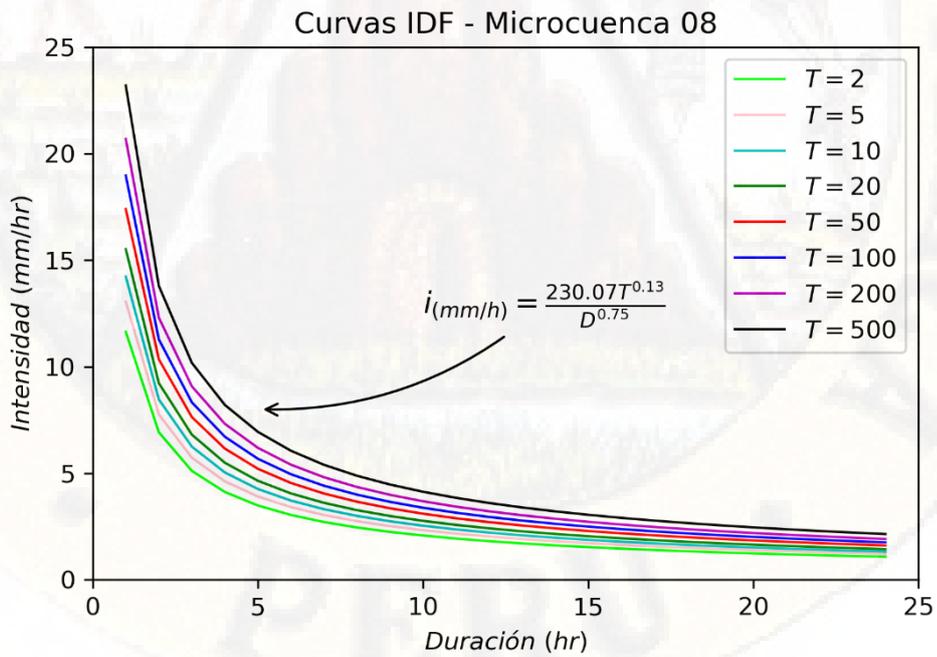
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.7. Curva IDF de la microcuencia 07



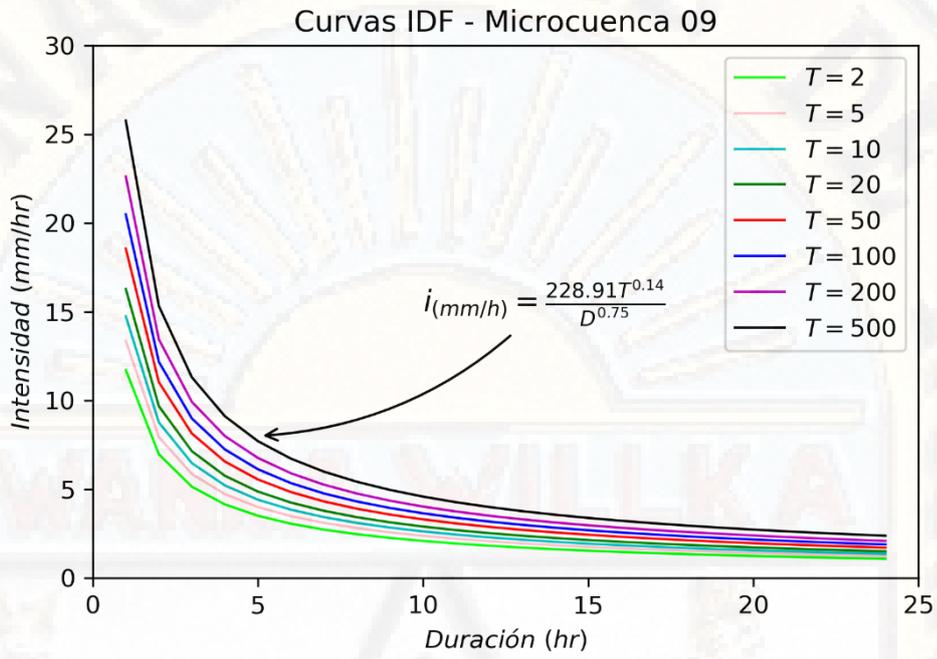
Fuente: Elaboración propia

Figura A.1.8. Curva IDF de la microcuencia 08



Fuente: Elaboración propia

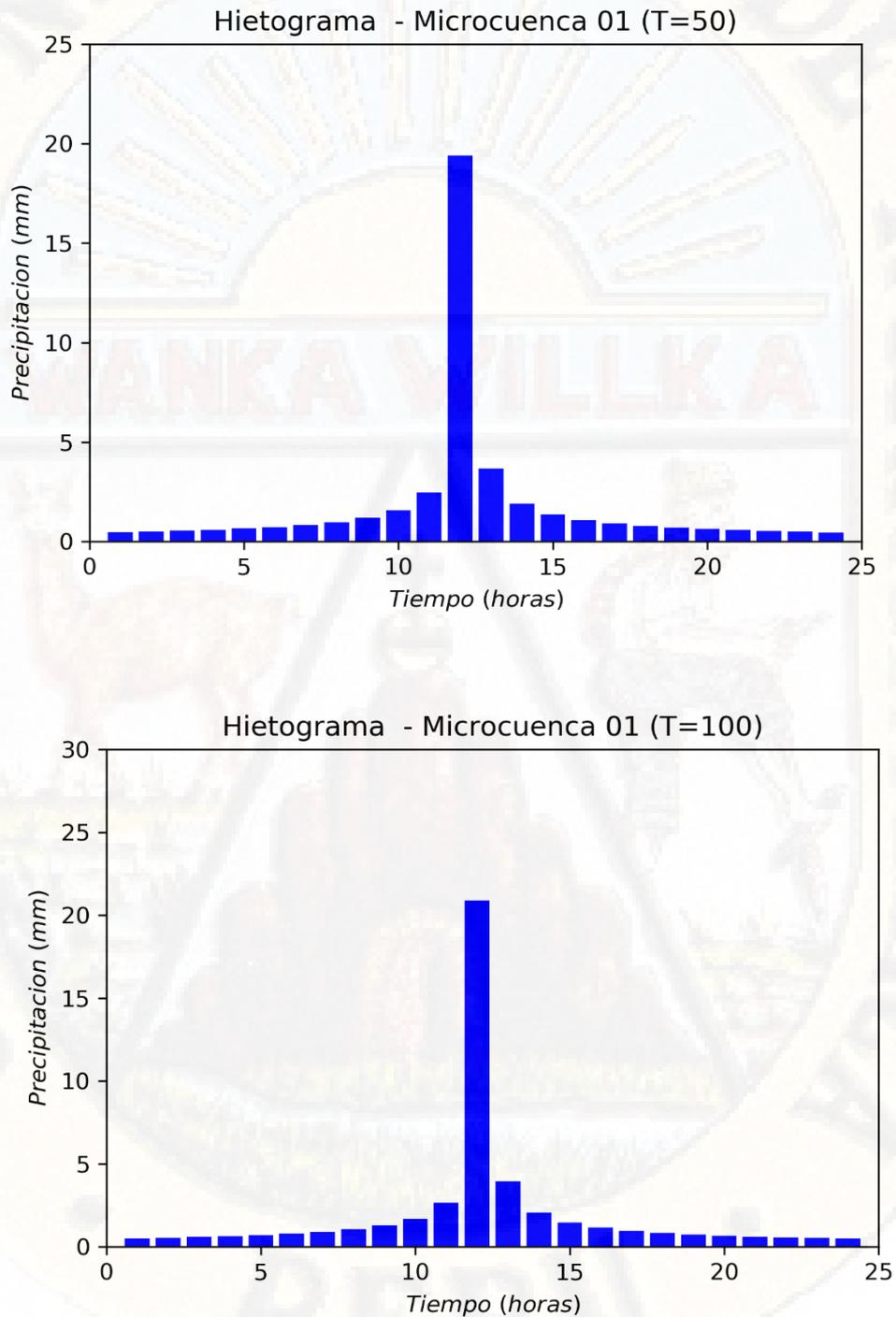
Figura A.1.9. Curva IDF de la microcuenca 09



Fuente: Elaboración propia

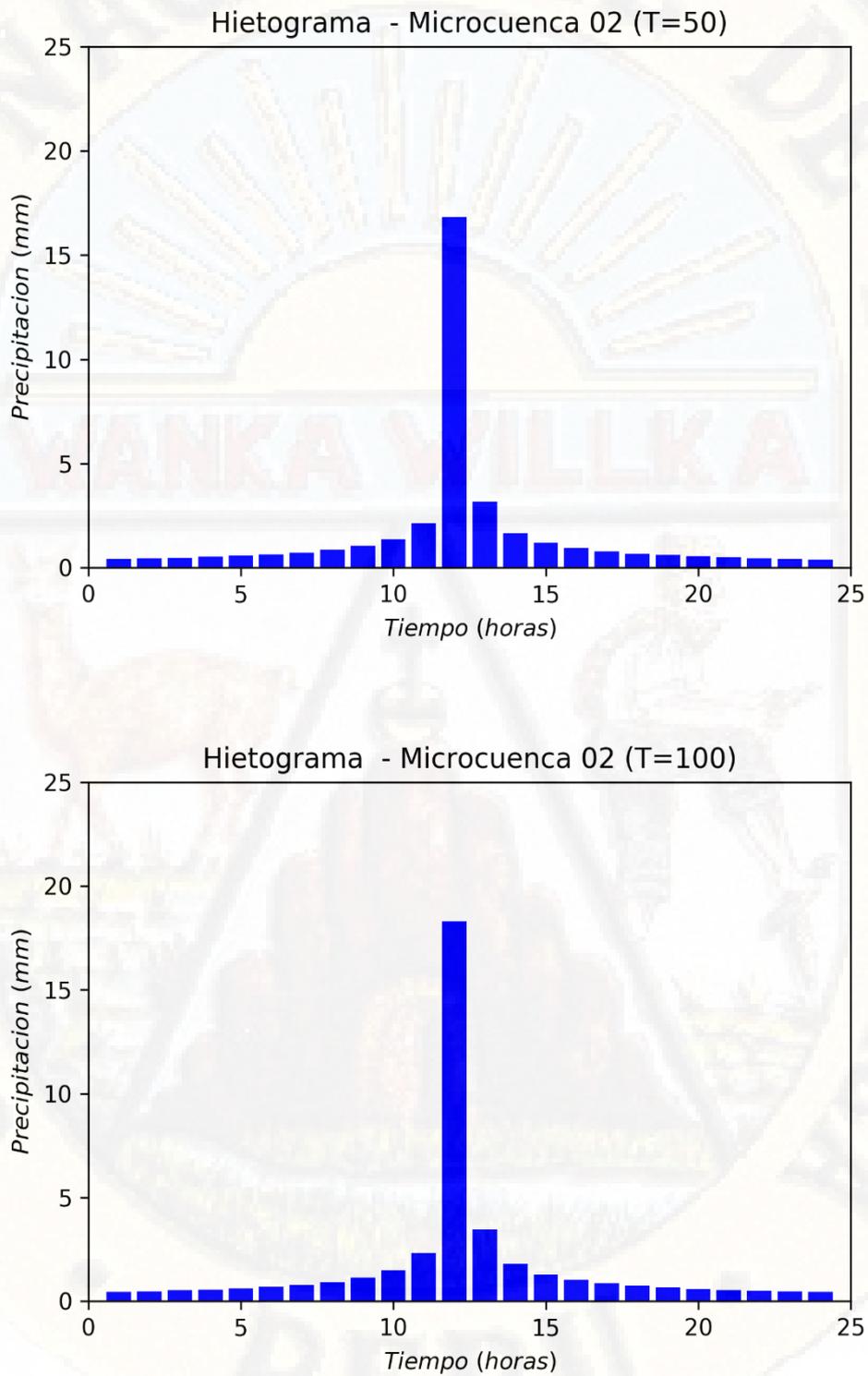
A.2 Hietogramas de las microcuencas de la subcuenca del río Sicra

Figura A.2.1. Hietogramas de la microcuencia 01 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



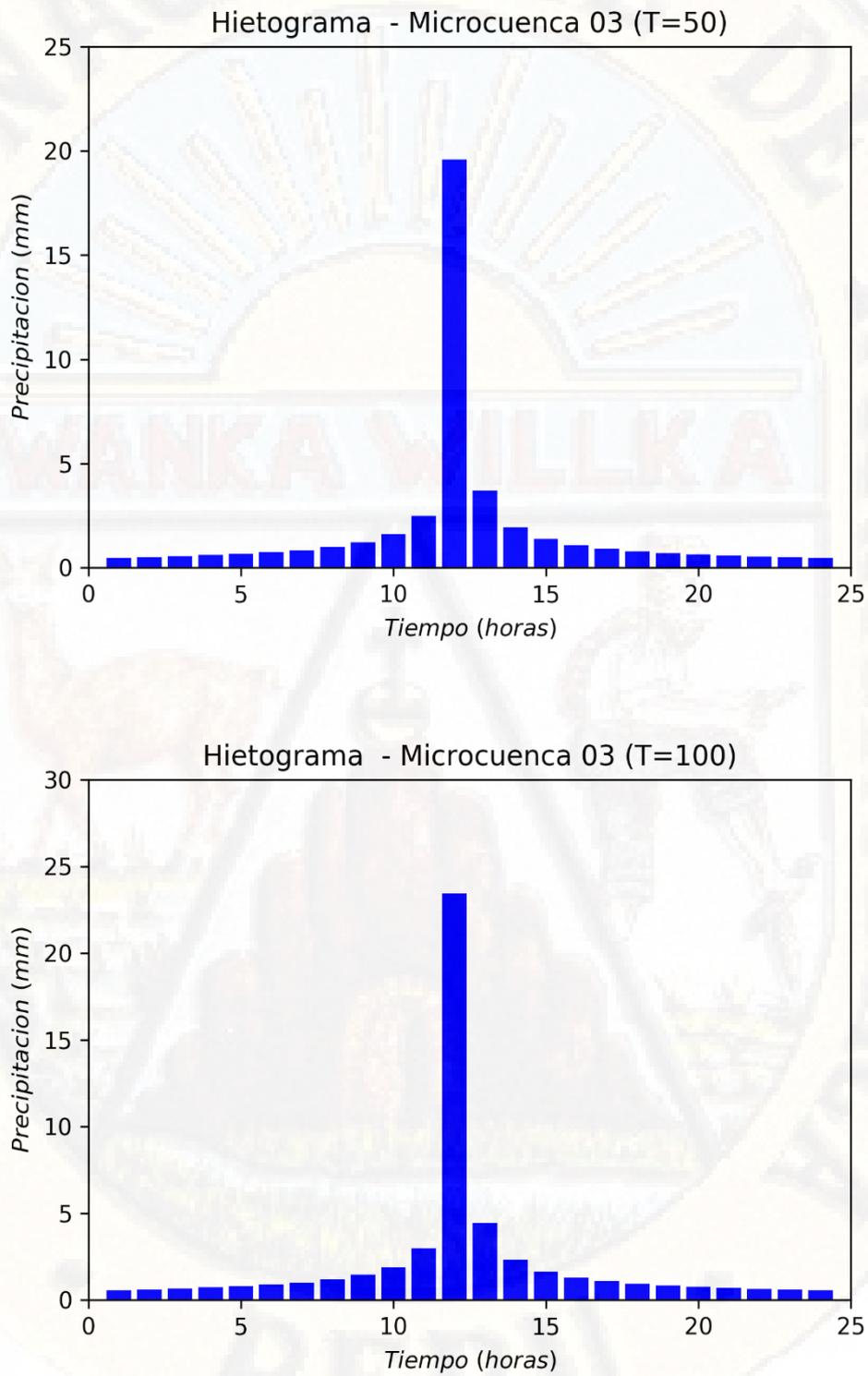
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.2. Hietogramas de la microcuenca 02 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



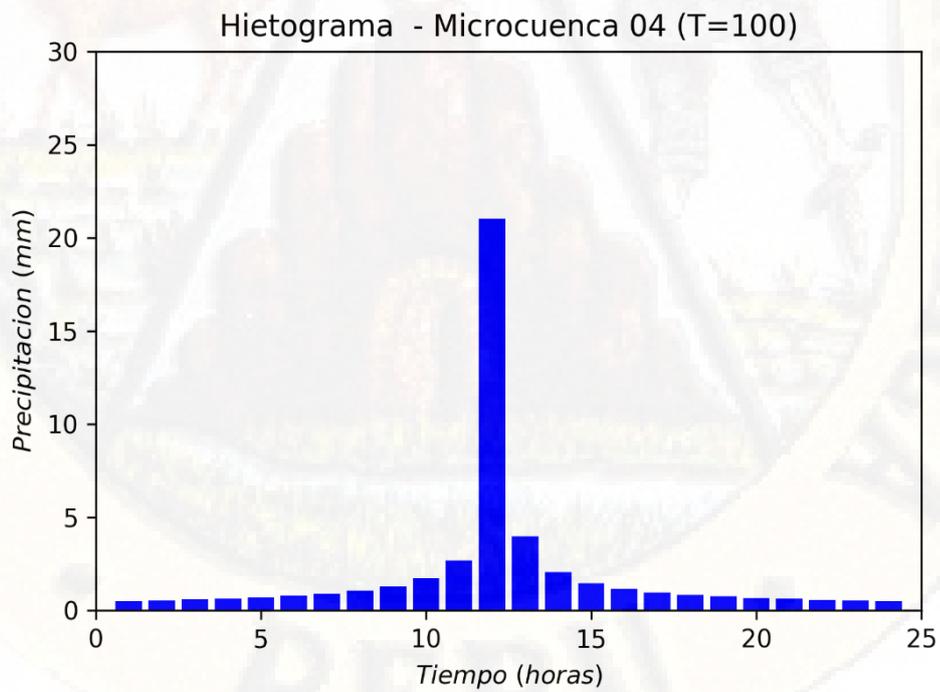
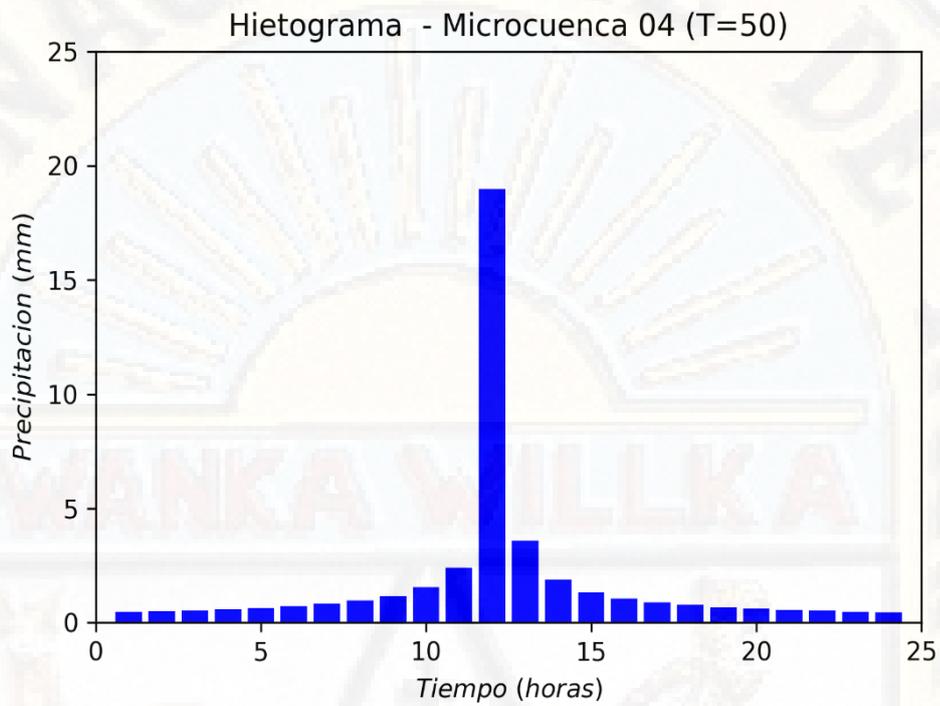
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.3. Hietogramas de la microcuenca 03 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años.



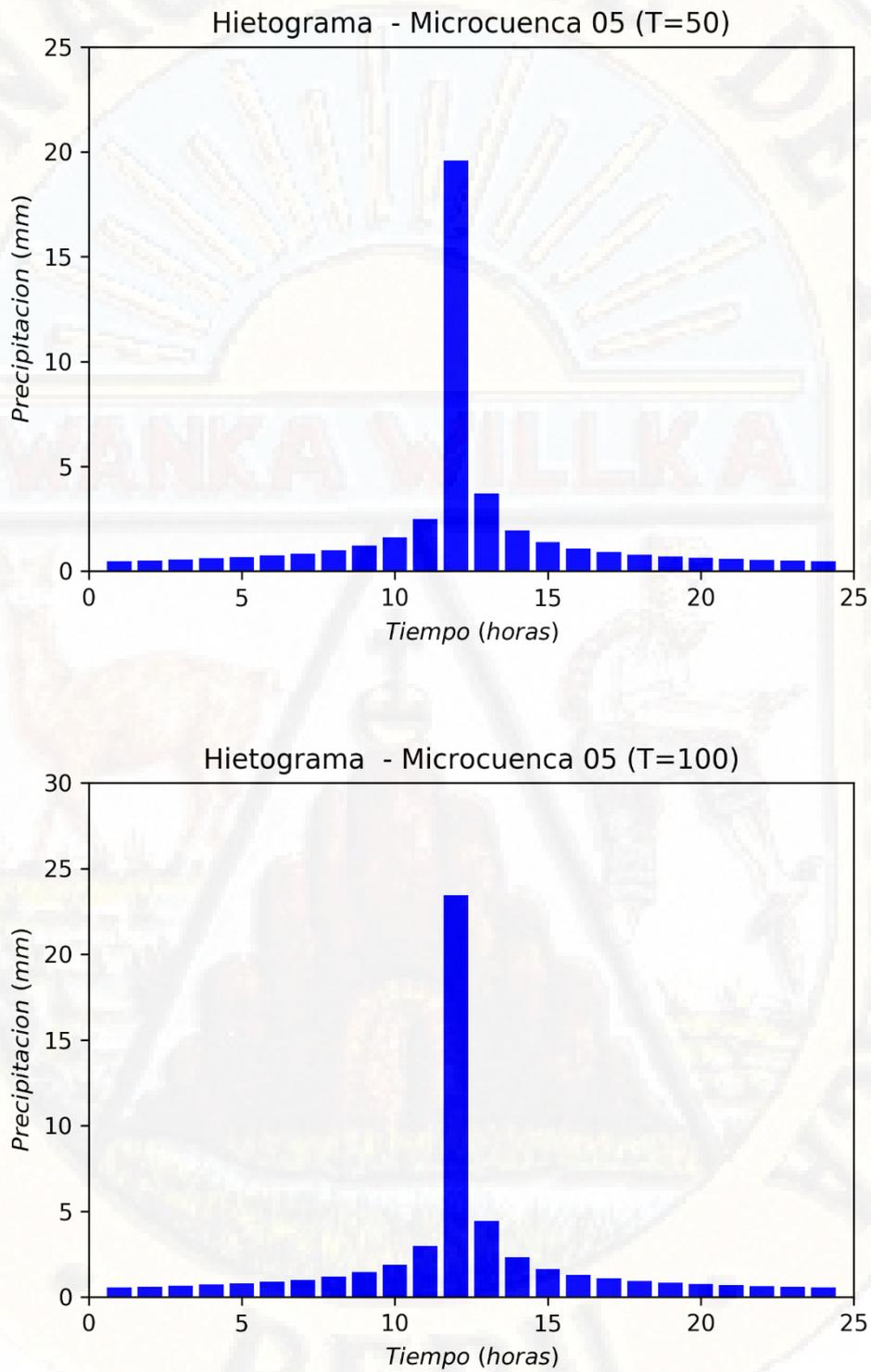
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.4. Hietogramas de la microcuenca 04 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



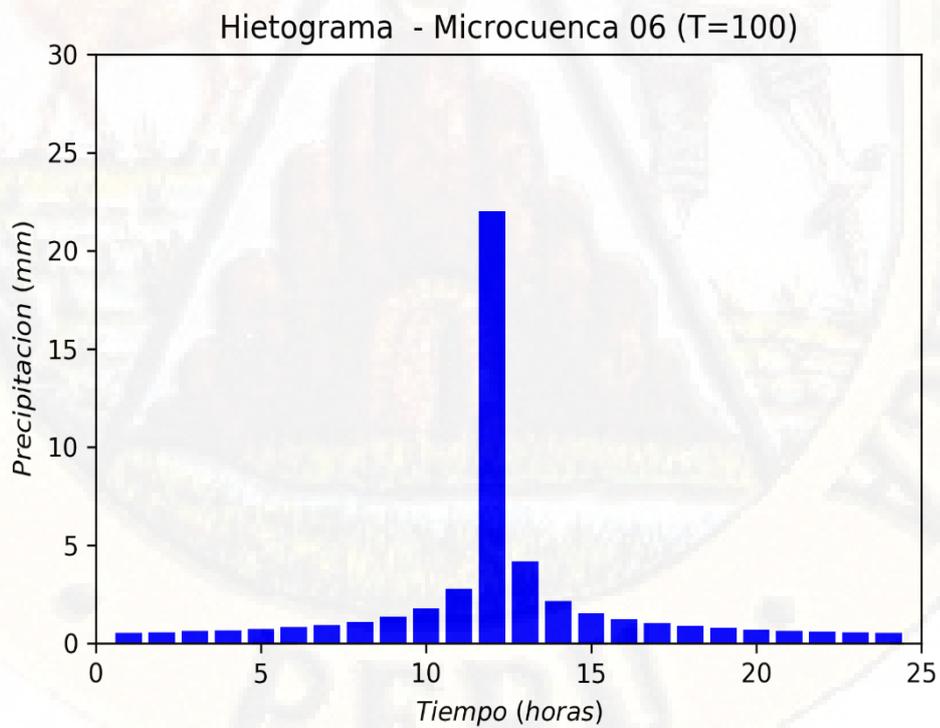
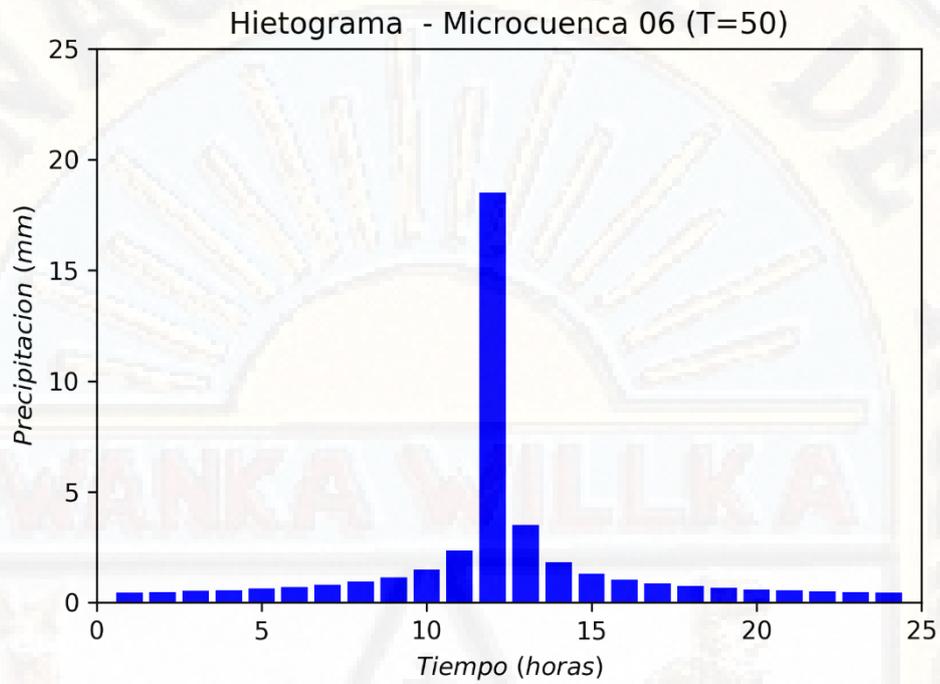
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.5. Hietogramas de la microcuenca 05 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



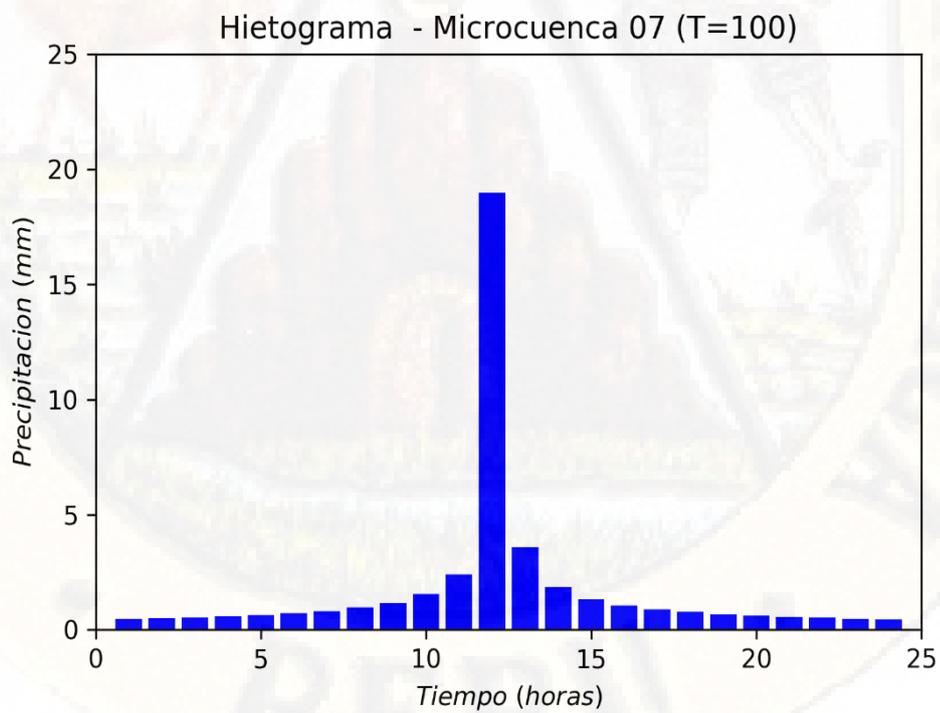
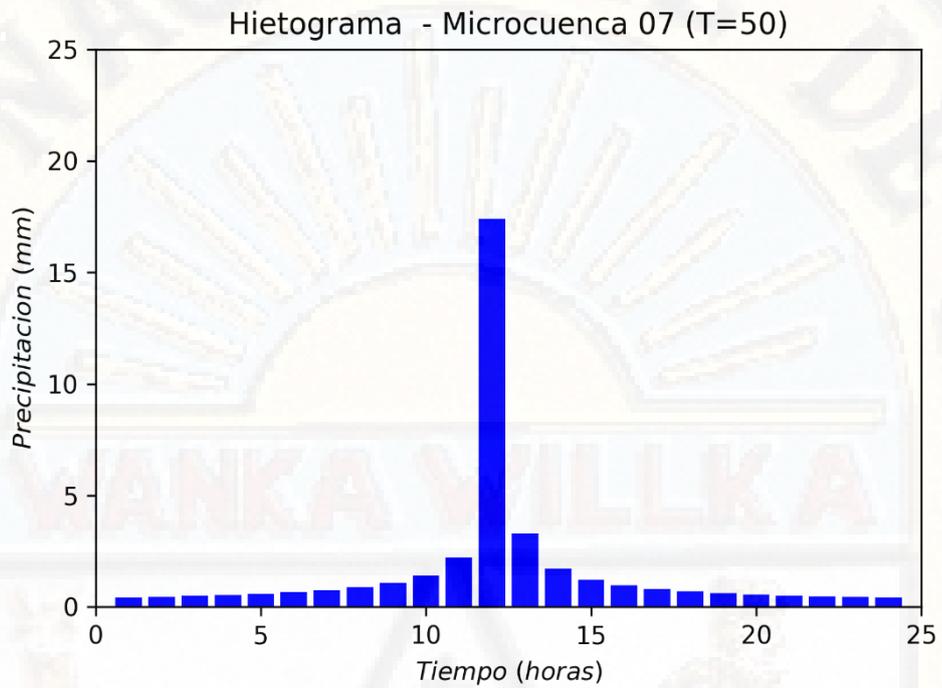
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.6. Hietogramas de la microcuenca 06 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



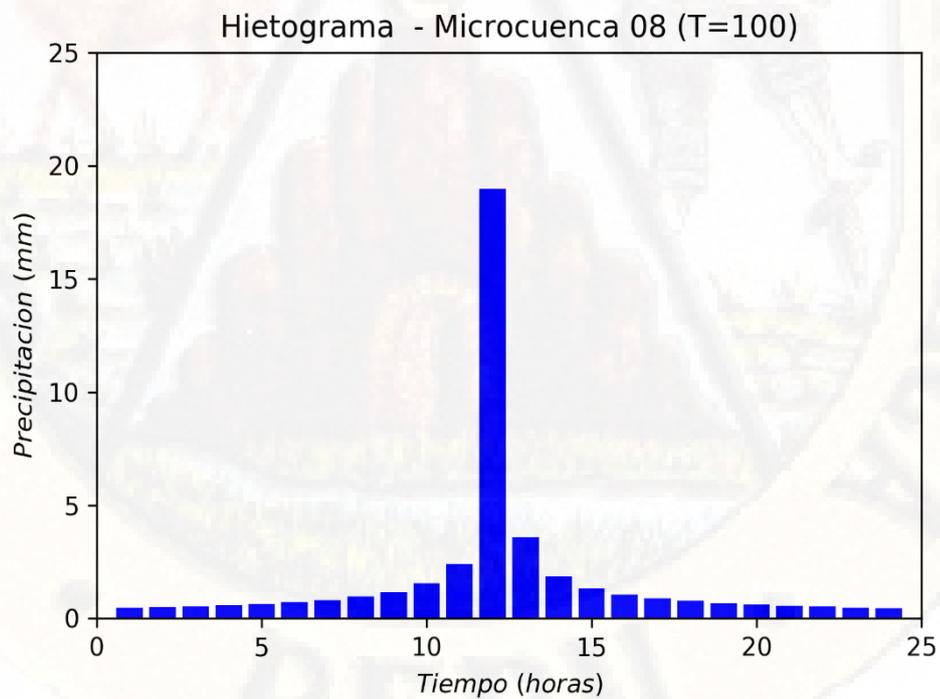
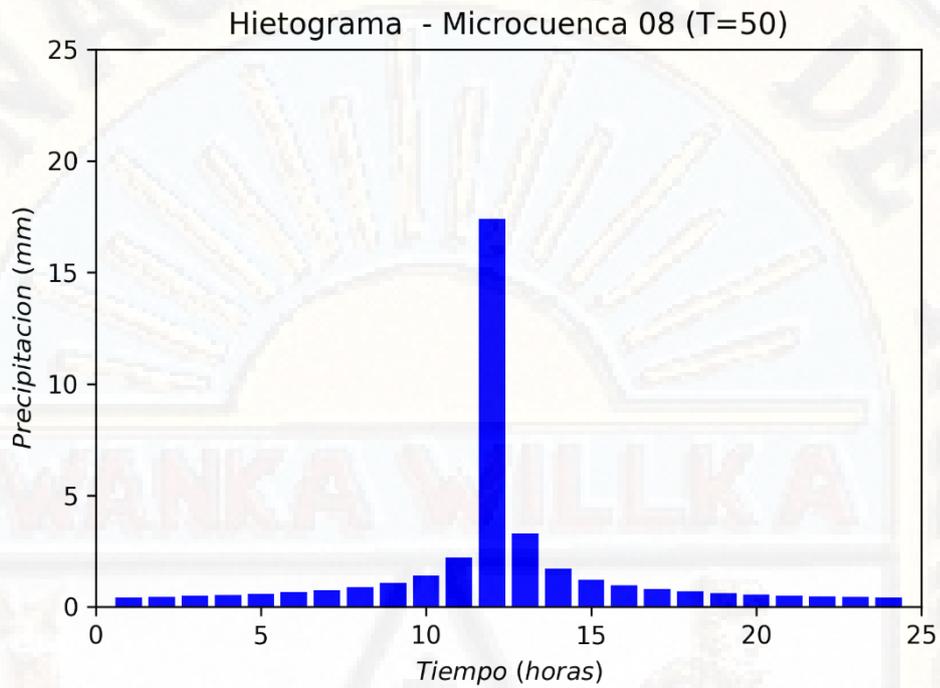
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.7. Hietogramas de la microcuenca 07 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



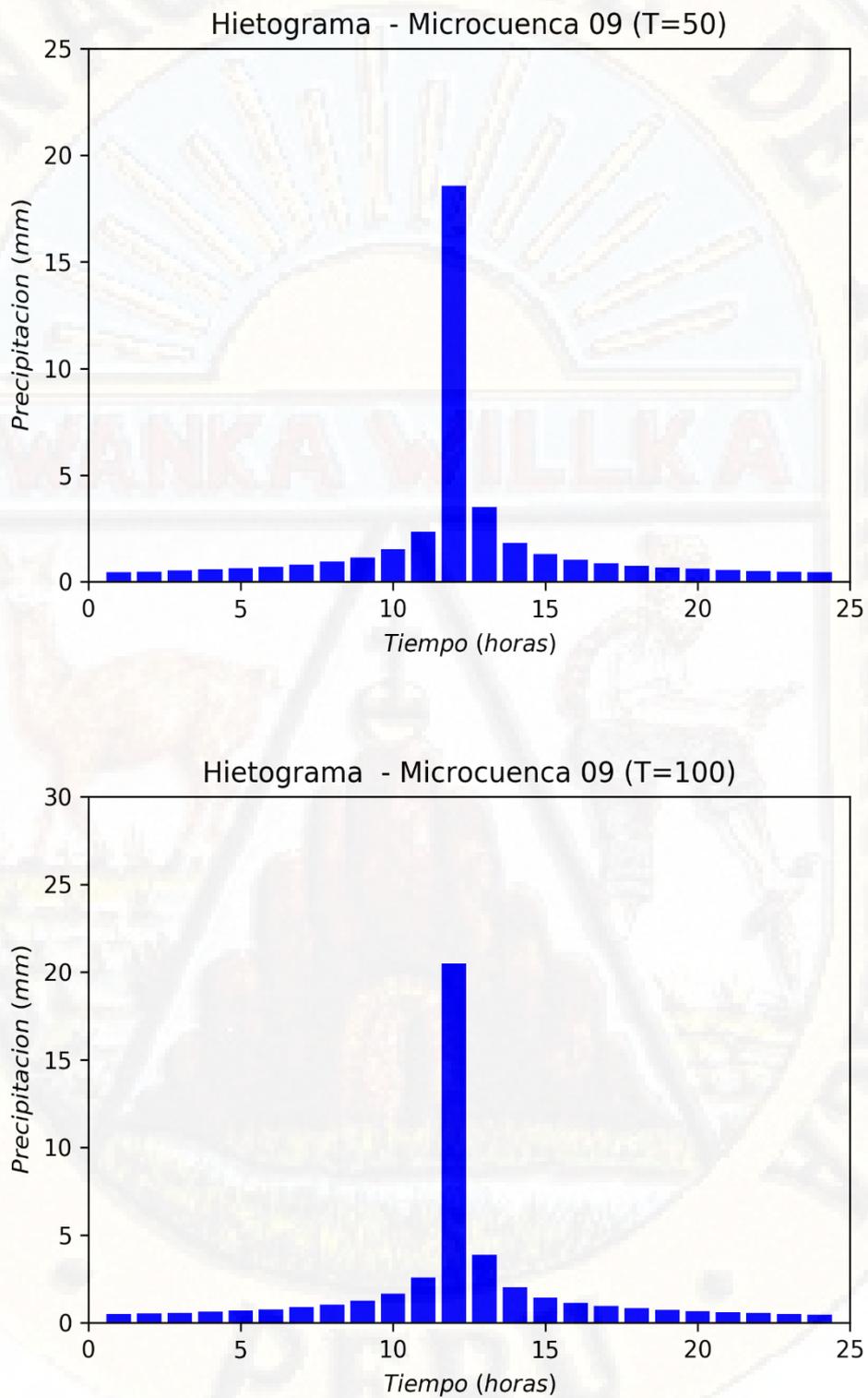
Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.8. Hietogramas de la microcuenca 08 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



Fuente: Elaboración propia

Figura A.2.9. Hietogramas de la microcuenca 09 para un $Tr = 50$ años y $Tr = 100$ años



Fuente: Elaboración propia

A.3 Hidrograma líquido con el modelo hidrológico HEC-HMS en la subcuenca del río Sicra

TIME SERIES RESULT Tr = 50 YEAR

Date	Time	Q (m3/s)				
25-Ene-17	00:00	0		25-Ene-17	06:20	0
25-Ene-17	00:10	0		25-Ene-17	06:30	0
25-Ene-17	00:20	0		25-Ene-17	06:40	0
25-Ene-17	00:30	0		25-Ene-17	06:50	0
25-Ene-17	00:40	0		25-Ene-17	07:00	0
25-Ene-17	00:50	0		25-Ene-17	07:10	0
25-Ene-17	01:00	0		25-Ene-17	07:20	0
25-Ene-17	01:10	0		25-Ene-17	07:30	0
25-Ene-17	01:20	0		25-Ene-17	07:40	0
25-Ene-17	01:30	0		25-Ene-17	07:50	0
25-Ene-17	01:40	0		25-Ene-17	08:00	0
25-Ene-17	01:50	0		25-Ene-17	08:10	0
25-Ene-17	02:00	0		25-Ene-17	08:20	0
25-Ene-17	02:10	0		25-Ene-17	08:30	0
25-Ene-17	02:20	0		25-Ene-17	08:40	0
25-Ene-17	02:30	0		25-Ene-17	08:50	0
25-Ene-17	02:40	0		25-Ene-17	09:00	0
25-Ene-17	02:50	0		25-Ene-17	09:10	0
25-Ene-17	03:00	0		25-Ene-17	09:20	0
25-Ene-17	03:10	0		25-Ene-17	09:30	0
25-Ene-17	03:20	0		25-Ene-17	09:40	0
25-Ene-17	03:30	0		25-Ene-17	09:50	0
25-Ene-17	03:40	0		25-Ene-17	10:00	0
25-Ene-17	03:50	0		25-Ene-17	10:10	0
25-Ene-17	04:00	0		25-Ene-17	10:20	0
25-Ene-17	04:10	0		25-Ene-17	10:30	0
25-Ene-17	04:20	0		25-Ene-17	10:40	0
25-Ene-17	04:30	0		25-Ene-17	10:50	0
25-Ene-17	04:40	0		25-Ene-17	11:00	0
25-Ene-17	04:50	0		25-Ene-17	11:10	0
25-Ene-17	05:00	0		25-Ene-17	11:20	0
25-Ene-17	05:10	0		25-Ene-17	11:30	0
25-Ene-17	05:20	0		25-Ene-17	11:40	0
25-Ene-17	05:30	0		25-Ene-17	11:50	0.4
25-Ene-17	05:40	0		25-Ene-17	12:00	1.4
25-Ene-17	05:50	0		25-Ene-17	12:10	3.2
25-Ene-17	06:00	0		25-Ene-17	12:20	5.7
25-Ene-17	06:10	0		25-Ene-17	12:30	8.2
				25-Ene-17	12:40	9.9

25-Ene-17	12:50	10.9	25-Ene-17	20:20	56.7
25-Ene-17	13:00	12	25-Ene-17	20:30	55.6
25-Ene-17	13:10	15.4	25-Ene-17	20:40	54.5
25-Ene-17	13:20	25.6	25-Ene-17	20:50	53.5
25-Ene-17	13:30	47.1	25-Ene-17	21:00	52.6
25-Ene-17	13:40	88.8	25-Ene-17	21:10	51.7
25-Ene-17	13:50	151.7	25-Ene-17	21:20	50.8
25-Ene-17	14:00	187.9	25-Ene-17	21:30	50
25-Ene-17	14:10	208	25-Ene-17	21:40	49.2
25-Ene-17	14:20	221	25-Ene-17	21:50	48.5
25-Ene-17	14:30	225	25-Ene-17	22:00	47.7
25-Ene-17	14:40	220.3	25-Ene-17	22:10	47
25-Ene-17	14:50	210.8	25-Ene-17	22:20	46.4
25-Ene-17	15:00	199.6	25-Ene-17	22:30	45.7
25-Ene-17	15:10	188.3	25-Ene-17	22:40	45.1
25-Ene-17	15:20	177.6	25-Ene-17	22:50	44.5
25-Ene-17	15:30	167.4	25-Ene-17	23:00	43.9
25-Ene-17	15:40	158	25-Ene-17	23:10	43.3
25-Ene-17	15:50	149.1	25-Ene-17	23:20	42.8
25-Ene-17	16:00	140.9	25-Ene-17	23:30	42.3
25-Ene-17	16:10	133.4	25-Ene-17	23:40	41.8
25-Ene-17	16:20	126.5	25-Ene-17	23:50	41.3
25-Ene-17	16:30	120.2	26-Ene-17	00:00	40.8
25-Ene-17	16:40	114.4	26-Ene-17	00:10	40.3
25-Ene-17	16:50	109.1	26-Ene-17	00:20	39.8
25-Ene-17	17:00	104.2	26-Ene-17	00:30	39.2
25-Ene-17	17:10	99.8	26-Ene-17	00:40	38.6
25-Ene-17	17:20	95.7	26-Ene-17	00:50	37.9
25-Ene-17	17:30	91.9	26-Ene-17	01:00	37.1
25-Ene-17	17:40	88.5	26-Ene-17	01:10	36.4
25-Ene-17	17:50	85.3	26-Ene-17	01:20	35.5
25-Ene-17	18:00	82.3	26-Ene-17	01:30	34.6
25-Ene-17	18:10	79.6	26-Ene-17	01:40	33.6
25-Ene-17	18:20	77	26-Ene-17	01:50	32.5
25-Ene-17	18:30	74.6	26-Ene-17	02:00	31.3
25-Ene-17	18:40	72.4	26-Ene-17	02:10	30.1
25-Ene-17	18:50	70.4	26-Ene-17	02:20	28.7
25-Ene-17	19:00	68.5	26-Ene-17	02:30	27.3
25-Ene-17	19:10	66.7	26-Ene-17	02:40	25.8
25-Ene-17	19:20	65	26-Ene-17	02:50	24.3
25-Ene-17	19:30	63.4	26-Ene-17	03:00	22.9
25-Ene-17	19:40	61.9	26-Ene-17	03:10	21.4
25-Ene-17	19:50	60.5	26-Ene-17	03:20	20.1
25-Ene-17	20:00	59.2	26-Ene-17	03:30	18.8
25-Ene-17	20:10	57.9	26-Ene-17	03:40	17.5

26-Ene-17	03:50	16.4	26-Ene-17	11:20	1.6
26-Ene-17	04:00	15.3	26-Ene-17	11:30	1.5
26-Ene-17	04:10	14.3	26-Ene-17	11:40	1.5
26-Ene-17	04:20	13.3	26-Ene-17	11:50	1.4
26-Ene-17	04:30	12.5	26-Ene-17	12:00	1.4
26-Ene-17	04:40	11.6	26-Ene-17	12:10	1.3
26-Ene-17	04:50	10.9	26-Ene-17	12:20	1.3
26-Ene-17	05:00	10.2	26-Ene-17	12:30	1.2
26-Ene-17	05:10	9.6	26-Ene-17	12:40	1.2
26-Ene-17	05:20	9	26-Ene-17	12:50	1.1
26-Ene-17	05:30	8.4	26-Ene-17	13:00	1.1
26-Ene-17	05:40	7.9	26-Ene-17	13:10	1.1
26-Ene-17	05:50	7.4	26-Ene-17	13:20	1
26-Ene-17	06:00	7	26-Ene-17	13:30	1
26-Ene-17	06:10	6.6	26-Ene-17	13:40	1
26-Ene-17	06:20	6.2	26-Ene-17	13:50	1
26-Ene-17	06:30	5.9	26-Ene-17	14:00	0.9
26-Ene-17	06:40	5.5	26-Ene-17	14:10	0.9
26-Ene-17	06:50	5.2	26-Ene-17	14:20	0.9
26-Ene-17	07:00	5	26-Ene-17	14:30	0.8
26-Ene-17	07:10	4.7	26-Ene-17	14:40	0.8
26-Ene-17	07:20	4.4	26-Ene-17	14:50	0.8
26-Ene-17	07:30	4.2	26-Ene-17	15:00	0.8
26-Ene-17	07:40	4	26-Ene-17	15:10	0.8
26-Ene-17	07:50	3.8	26-Ene-17	15:20	0.7
26-Ene-17	08:00	3.6	26-Ene-17	15:30	0.7
26-Ene-17	08:10	3.5	26-Ene-17	15:40	0.7
26-Ene-17	08:20	3.3	26-Ene-17	15:50	0.7
26-Ene-17	08:30	3.1	26-Ene-17	16:00	0.7
26-Ene-17	08:40	3	26-Ene-17	16:10	0.6
26-Ene-17	08:50	2.9	26-Ene-17	16:20	0.6
26-Ene-17	09:00	2.7	26-Ene-17	16:30	0.6
26-Ene-17	09:10	2.6	26-Ene-17	16:40	0.6
26-Ene-17	09:20	2.5	26-Ene-17	16:50	0.6
26-Ene-17	09:30	2.4	26-Ene-17	17:00	0.6
26-Ene-17	09:40	2.3	26-Ene-17	17:10	0.6
26-Ene-17	09:50	2.2	26-Ene-17	17:20	0.5
26-Ene-17	10:00	2.1	26-Ene-17	17:30	0.5
26-Ene-17	10:10	2	26-Ene-17	17:40	0.5
26-Ene-17	10:20	2	26-Ene-17	17:50	0.5
26-Ene-17	10:30	1.9	26-Ene-17	18:00	0.5
26-Ene-17	10:40	1.8	26-Ene-17	18:10	0.5
26-Ene-17	10:50	1.7	26-Ene-17	18:20	0.5
26-Ene-17	11:00	1.7	26-Ene-17	18:30	0.5
26-Ene-17	11:10	1.6	26-Ene-17	18:40	0.5

26-Ene-17	18:50	0.4	26-Ene-17	22:40	0.3
26-Ene-17	19:00	0.4	26-Ene-17	22:50	0.3
26-Ene-17	19:10	0.4	26-Ene-17	23:00	0.3
26-Ene-17	19:20	0.4	26-Ene-17	23:10	0.3
26-Ene-17	19:30	0.4	26-Ene-17	23:20	0.3
26-Ene-17	19:40	0.4	26-Ene-17	23:30	0.3
26-Ene-17	19:50	0.4	26-Ene-17	23:40	0.3
26-Ene-17	20:00	0.4	26-Ene-17	23:50	0.2
26-Ene-17	20:10	0.4	27-Ene-17	00:00	0.2
26-Ene-17	20:20	0.4	27-Ene-17	00:10	0.2
26-Ene-17	20:30	0.4	27-Ene-17	00:20	0.2
26-Ene-17	20:40	0.4	27-Ene-17	00:30	0.2
26-Ene-17	20:50	0.3	27-Ene-17	00:40	0.2
26-Ene-17	21:00	0.3	27-Ene-17	00:50	0.2
26-Ene-17	21:10	0.3	27-Ene-17	01:00	0.2
26-Ene-17	21:20	0.3	27-Ene-17	01:10	0.2
26-Ene-17	21:30	0.3	27-Ene-17	01:20	0.2
26-Ene-17	21:40	0.3	27-Ene-17	01:30	0.2
26-Ene-17	21:50	0.3	27-Ene-17	01:40	0.2
26-Ene-17	22:00	0.3	27-Ene-17	01:50	0.2
26-Ene-17	22:10	0.3	27-Ene-17	02:00	0
26-Ene-17	22:20	0.3			
26-Ene-17	22:30	0.3			

TIME SERIES RESULT Tr = 100 YEAR

Date	Time	Q (m3/s)			
25-Ene-17	00:00	0	25-Ene-17	03:00	0
25-Ene-17	00:10	0	25-Ene-17	03:10	0
25-Ene-17	00:20	0	25-Ene-17	03:20	0
25-Ene-17	00:30	0	25-Ene-17	03:30	0
25-Ene-17	00:40	0	25-Ene-17	03:40	0
25-Ene-17	00:50	0	25-Ene-17	03:50	0
25-Ene-17	01:00	0	25-Ene-17	04:00	0
25-Ene-17	01:10	0	25-Ene-17	04:10	0
25-Ene-17	01:20	0	25-Ene-17	04:20	0
25-Ene-17	01:30	0	25-Ene-17	04:30	0
25-Ene-17	01:40	0	25-Ene-17	04:40	0
25-Ene-17	01:50	0	25-Ene-17	04:50	0
25-Ene-17	02:00	0	25-Ene-17	05:00	0
25-Ene-17	02:10	0	25-Ene-17	05:10	0
25-Ene-17	02:20	0	25-Ene-17	05:20	0
25-Ene-17	02:30	0	25-Ene-17	05:30	0
25-Ene-17	02:40	0	25-Ene-17	05:40	0
25-Ene-17	02:50	0	25-Ene-17	05:50	0
			25-Ene-17	06:00	0

25-Ene-17	06:10	0	25-Ene-17	13:40	279.8
25-Ene-17	06:20	0	25-Ene-17	13:50	314.8
25-Ene-17	06:30	0	25-Ene-17	14:00	338.2
25-Ene-17	06:40	0	25-Ene-17	14:10	349.3
25-Ene-17	06:50	0	25-Ene-17	14:20	345.1
25-Ene-17	07:00	0	25-Ene-17	14:30	330.8
25-Ene-17	07:10	0	25-Ene-17	14:40	312
25-Ene-17	07:20	0	25-Ene-17	14:50	292.2
25-Ene-17	07:30	0	25-Ene-17	15:00	273
25-Ene-17	07:40	0	25-Ene-17	15:10	255.4
25-Ene-17	07:50	0	25-Ene-17	15:20	239.2
25-Ene-17	08:00	0	25-Ene-17	15:30	224.4
25-Ene-17	08:10	0	25-Ene-17	15:40	210.6
25-Ene-17	08:20	0	25-Ene-17	15:50	198
25-Ene-17	08:30	0	25-Ene-17	16:00	186.4
25-Ene-17	08:40	0	25-Ene-17	16:10	175.8
25-Ene-17	08:50	0	25-Ene-17	16:20	166.2
25-Ene-17	09:00	0	25-Ene-17	16:30	157.5
25-Ene-17	09:10	0	25-Ene-17	16:40	149.6
25-Ene-17	09:20	0	25-Ene-17	16:50	142.3
25-Ene-17	09:30	0	25-Ene-17	17:00	135.6
25-Ene-17	09:40	0	25-Ene-17	17:10	129.6
25-Ene-17	09:50	0	25-Ene-17	17:20	124
25-Ene-17	10:00	0	25-Ene-17	17:30	119
25-Ene-17	10:10	0	25-Ene-17	17:40	114.4
25-Ene-17	10:20	0	25-Ene-17	17:50	110.1
25-Ene-17	10:30	0	25-Ene-17	18:00	106.2
25-Ene-17	10:40	0	25-Ene-17	18:10	102.5
25-Ene-17	10:50	0	25-Ene-17	18:20	99.2
25-Ene-17	11:00	0	25-Ene-17	18:30	96
25-Ene-17	11:10	0	25-Ene-17	18:40	93.1
25-Ene-17	11:20	0	25-Ene-17	18:50	90.5
25-Ene-17	11:30	0	25-Ene-17	19:00	87.9
25-Ene-17	11:40	0.2	25-Ene-17	19:10	85.6
25-Ene-17	11:50	0.8	25-Ene-17	19:20	83.4
25-Ene-17	12:00	2.6	25-Ene-17	19:30	81.3
25-Ene-17	12:10	5.5	25-Ene-17	19:40	79.4
25-Ene-17	12:20	9.3	25-Ene-17	19:50	77.6
25-Ene-17	12:30	12.7	25-Ene-17	20:00	75.8
25-Ene-17	12:40	15	25-Ene-17	20:10	74.2
25-Ene-17	12:50	17.4	25-Ene-17	20:20	72.6
25-Ene-17	13:00	25.4	25-Ene-17	20:30	71.1
25-Ene-17	13:10	49	25-Ene-17	20:40	69.7
25-Ene-17	13:20	106.8	25-Ene-17	20:50	68.4
25-Ene-17	13:30	209.4	25-Ene-17	21:00	67.2

25-Ene-17	21:10	66	26-Ene-17	04:40	13.2
25-Ene-17	21:20	64.9	26-Ene-17	04:50	12.3
25-Ene-17	21:30	63.8	26-Ene-17	05:00	11.4
25-Ene-17	21:40	62.8	26-Ene-17	05:10	10.7
25-Ene-17	21:50	61.9	26-Ene-17	05:20	10
25-Ene-17	22:00	60.9	26-Ene-17	05:30	9.3
25-Ene-17	22:10	60	26-Ene-17	05:40	8.7
25-Ene-17	22:20	59.2	26-Ene-17	05:50	8.2
25-Ene-17	22:30	58.4	26-Ene-17	06:00	7.7
25-Ene-17	22:40	57.6	26-Ene-17	06:10	7.2
25-Ene-17	22:50	56.8	26-Ene-17	06:20	6.8
25-Ene-17	23:00	56	26-Ene-17	06:30	6.4
25-Ene-17	23:10	55.3	26-Ene-17	06:40	6
25-Ene-17	23:20	54.6	26-Ene-17	06:50	5.7
25-Ene-17	23:30	54	26-Ene-17	07:00	5.3
25-Ene-17	23:40	53.3	26-Ene-17	07:10	5.1
25-Ene-17	23:50	52.7	26-Ene-17	07:20	4.8
26-Ene-17	00:00	52.1	26-Ene-17	07:30	4.5
26-Ene-17	00:10	51.5	26-Ene-17	07:40	4.3
26-Ene-17	00:20	50.8	26-Ene-17	07:50	4.1
26-Ene-17	00:30	50.1	26-Ene-17	08:00	3.9
26-Ene-17	00:40	49.3	26-Ene-17	08:10	3.7
26-Ene-17	00:50	48.4	26-Ene-17	08:20	3.5
26-Ene-17	01:00	47.4	26-Ene-17	08:30	3.3
26-Ene-17	01:10	46.4	26-Ene-17	08:40	3.2
26-Ene-17	01:20	45.2	26-Ene-17	08:50	3
26-Ene-17	01:30	44	26-Ene-17	09:00	2.9
26-Ene-17	01:40	42.6	26-Ene-17	09:10	2.8
26-Ene-17	01:50	41	26-Ene-17	09:20	2.6
26-Ene-17	02:00	39.4	26-Ene-17	09:30	2.5
26-Ene-17	02:10	37.5	26-Ene-17	09:40	2.4
26-Ene-17	02:20	35.6	26-Ene-17	09:50	2.3
26-Ene-17	02:30	33.6	26-Ene-17	10:00	2.2
26-Ene-17	02:40	31.5	26-Ene-17	10:10	2.1
26-Ene-17	02:50	29.5	26-Ene-17	10:20	2
26-Ene-17	03:00	27.5	26-Ene-17	10:30	2
26-Ene-17	03:10	25.6	26-Ene-17	10:40	1.9
26-Ene-17	03:20	23.8	26-Ene-17	10:50	1.8
26-Ene-17	03:30	22.1	26-Ene-17	11:00	1.7
26-Ene-17	03:40	20.5	26-Ene-17	11:10	1.7
26-Ene-17	03:50	19	26-Ene-17	11:20	1.6
26-Ene-17	04:00	17.7	26-Ene-17	11:30	1.6
26-Ene-17	04:10	16.4	26-Ene-17	11:40	1.5
26-Ene-17	04:20	15.2	26-Ene-17	11:50	1.5
26-Ene-17	04:30	14.2	26-Ene-17	12:00	1.4

26-Ene-17	12:10	1.4	26-Ene-17	19:10	0.4
26-Ene-17	12:20	1.3	26-Ene-17	19:20	0.4
26-Ene-17	12:30	1.3	26-Ene-17	19:30	0.4
26-Ene-17	12:40	1.2	26-Ene-17	19:40	0.4
26-Ene-17	12:50	1.2	26-Ene-17	19:50	0.4
26-Ene-17	13:00	1.2	26-Ene-17	20:00	0.4
26-Ene-17	13:10	1.1	26-Ene-17	20:10	0.4
26-Ene-17	13:20	1.1	26-Ene-17	20:20	0.4
26-Ene-17	13:30	1	26-Ene-17	20:30	0.4
26-Ene-17	13:40	1	26-Ene-17	20:40	0.4
26-Ene-17	13:50	1	26-Ene-17	20:50	0.4
26-Ene-17	14:00	1	26-Ene-17	21:00	0.3
26-Ene-17	14:10	0.9	26-Ene-17	21:10	0.3
26-Ene-17	14:20	0.9	26-Ene-17	21:20	0.3
26-Ene-17	14:30	0.9	26-Ene-17	21:30	0.3
26-Ene-17	14:40	0.9	26-Ene-17	21:40	0.3
26-Ene-17	14:50	0.8	26-Ene-17	21:50	0.3
26-Ene-17	15:00	0.8	26-Ene-17	22:00	0.3
26-Ene-17	15:10	0.8	26-Ene-17	22:10	0.3
26-Ene-17	15:20	0.8	26-Ene-17	22:20	0.3
26-Ene-17	15:30	0.7	26-Ene-17	22:30	0.3
26-Ene-17	15:40	0.7	26-Ene-17	22:40	0.3
26-Ene-17	15:50	0.7	26-Ene-17	22:50	0.3
26-Ene-17	16:00	0.7	26-Ene-17	23:00	0.3
26-Ene-17	16:10	0.7	26-Ene-17	23:10	0.3
26-Ene-17	16:20	0.6	26-Ene-17	23:20	0.3
26-Ene-17	16:30	0.6	26-Ene-17	23:30	0.3
26-Ene-17	16:40	0.6	26-Ene-17	23:40	0.3
26-Ene-17	16:50	0.6	26-Ene-17	23:50	0.3
26-Ene-17	17:00	0.6	27-Ene-17	00:00	0.2
26-Ene-17	17:10	0.6	27-Ene-17	00:10	0.2
26-Ene-17	17:20	0.6	27-Ene-17	00:20	0.2
26-Ene-17	17:30	0.5	27-Ene-17	00:30	0.2
26-Ene-17	17:40	0.5	27-Ene-17	00:40	0.2
26-Ene-17	17:50	0.5	27-Ene-17	00:50	0.2
26-Ene-17	18:00	0.5	27-Ene-17	01:00	0.2
26-Ene-17	18:10	0.5	27-Ene-17	01:10	0.2
26-Ene-17	18:20	0.5	27-Ene-17	01:20	0.2
26-Ene-17	18:30	0.5	27-Ene-17	01:30	0.2
26-Ene-17	18:40	0.5	27-Ene-17	01:40	0.2
26-Ene-17	18:50	0.5	27-Ene-17	01:50	0.2
26-Ene-17	19:00	0.4	27-Ene-17	02:00	0

ANEXO B – EMS

B.1 Estudio de mecánica de suelos realizado en el laboratorio de la Universidad Nacional de Huancavelica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL HUANCAMELICA
ÁREA DE PRODUCCIÓN DE LA EPICH



“AÑO DE LA UNIVERSALIZACION DE LA SALUD”

EL JEFE DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL HUANCAMELICA, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA, otorga la presente:

CONSTANCIA

A: **HUMAN MARTINEZ, Pool Jonhni y TITO RAMOS, Nils Meyer**, bachilleres de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil - Huancavelica, Facultad de Ciencias de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Huancavelica, quienes han concluido con el desarrollo los siguientes ensayos en el laboratorio de **GEOTÉCNIA I** de la EPICH:

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	04
2	ANÁLISIS DE LÍMITE LÍQUIDO	02
3	ANÁLISIS DE LÍMITE PLÁSTICO	02
4	ANÁLISIS DE CONTENIDO DE HUMEDAD	02

Durante los días 28 - 29 de noviembre, y 02 - 03 de diciembre de 2019, del proyecto de tesis: “MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO-2D, DE LA SUBCUENCA DEL RIO SICRA, LIRCAY-HUANCAMELICA”.

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado para fines que estime por conveniente.

Huancavelica, 02 de marzo de 2020.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL - HVCA
ÁREA DE PRODUCCIÓN

Msc. Marco Antonio López Barrantes
JEFE

N° 001-2020

C. C.
Archivo
AP

ANEXO C – Flo - 2D

C.1 Simulación de flujos de lodo y escombros para un Tr = 50 años

NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
----------------------------	-------------------------------	------------------------------------	-------------------

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 18.12.20

1.000	1.598	0.000000	0.000000
2.001	2.189	0.000000	0.000000
3.000	2.467	0.000000	0.000000
4.000	2.657	0.000000	0.000000
5.000	2.804	0.000000	0.000000
6.000	2.923	0.000000	0.000000
7.001	3.024	0.000000	0.000000
8.001	3.112	0.000000	0.000000
9.000	3.189	0.000000	0.000000
10.000	3.259	0.000000	0.000000
11.001	3.322	0.000000	0.000000
12.000	3.111	0.000000	0.000000
13.000	0.722	-0.000000	0.000000
14.000	0.203	-0.000000	0.000000
15.000	0.067	0.000000	0.000000
16.000	0.072	-0.000000	0.000000
17.000	0.083	-0.000000	0.000000
18.000	0.092	-0.000000	0.000000
19.000	0.120	-0.000000	0.000000
20.000	0.135	-0.000000	0.000000
21.000	0.144	-0.000000	0.000000
22.000	0.154	0.000000	0.000000
23.000	0.218	-0.000000	0.000000
24.000	0.292	-0.000000	0.000000
25.000	0.368	-0.000000	0.000000
26.000	0.430	-0.000000	0.000000
27.000	0.500	-0.000000	0.000000
28.000	0.531	-0.000000	0.000000
29.000	0.508	-0.000000	0.000000
30.000	0.785	-0.000000	0.000000
31.000	0.969	-0.000000	0.000000
32.000	1.086	-0.000000	0.000000
33.000	0.978	-0.000000	0.000000
34.000	1.154	-0.000000	0.000000
35.000	1.460	-0.000000	0.000000
36.000	1.531	-0.000000	0.000000
37.000	1.643	-0.000000	0.000000
38.000	1.759	-0.000000	0.000000
39.000	1.789	-0.000001	0.000000

40.000	1.819	-0.000001	0.000000
41.000	1.852	-0.000001	0.000000
42.000	1.864	-0.000001	0.000000
43.000	1.888	-0.000001	0.000000
44.000	1.899	-0.000001	0.000000
45.001	1.947	-0.000001	0.000000
46.000	1.947	-0.000001	0.000000
47.001	1.955	-0.000001	0.000000
48.001	1.964	-0.000001	0.000000
49.001	1.970	-0.000001	0.000000
50.000	1.973	-0.000000	0.000000
51.000	1.965	-0.000000	0.000000
52.000	2.001	-0.000001	0.000000
53.000	2.052	-0.000000	0.000000
54.000	2.065	-0.000000	0.000000
55.000	2.091	-0.000000	0.000000

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

*** INFLOW (CU METERS) ***

WATER BULKED W/SEDIMENT

SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH 4224965.695
5737539.536

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW

WATER

BULKED W/SEDIMENT

FLOODPLAIN STORAGE

5679.728

7473.183

FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH

4230216.343

5730066.354

FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE

4235896.071

5737539.536

TOL FLOODPLAIN STORAGE

2255.960

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM

4230216.343

5730066.354

TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE

4235896.071

5737539.536

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:

(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03 M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS: 75200.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS: 74325.000 SQ. METERS

GRID ELEMENT SIZE: 5.0 M
TOTAL NUMBER OF GRID ELEMENTS: 14465
GRID SYSTEM AREA: 361625.00 SQ M 0.3616 SQ. KM.

AVERAGE GRID ELEMENT FLOW DIRECTION FLOODPLAIN HYDRAULICS:

DISCHARGE (CFS OR CMS): 6.555
VELOCITY (FPS OR CMS): 1.327
FLOW AREA (FT^2 OR M^2): 3.733
FLOW DEPTH (FT OR M): 1.802
FLOW WIDTH (FT OR M): 2.071

TOTAL COMPUTATIONS: 1205419388.

COMPUTER RUN TIME IS : 0.69409 HRS

THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 3/5/2020 AT: 0:23:48

C.2 Simulación de flujos de lodo y escombros para un $Tr = 100$ años

NEGATIVE VOLUME CONSERVATION (CUBIC METERS)
INDICATES EXCESS VOLUME (OUTFLOW + STORAGE > INFLOW)

SIMULATION TIME (HOURS)	AVERAGE TIMESTEP (SECONDS)	VOLUME CONSERVATION (CU METERS)	PERCENT OF INFLOW
----------------------------	-------------------------------	------------------------------------	-------------------

SUMMARY.OUT FILE
Pro Model - Build No. 18.12.20

1.000	1.598	0.000000	0.000000
2.001	2.189	0.000000	0.000000
3.000	2.467	0.000000	0.000000
4.000	2.657	0.000000	0.000000
5.000	2.804	0.000000	0.000000
6.000	2.923	0.000000	0.000000
7.001	3.024	0.000000	0.000000
8.001	3.112	0.000000	0.000000
9.000	3.189	0.000000	0.000000
10.000	3.259	0.000000	0.000000
11.001	3.322	0.000000	0.000000
12.000	2.679	-0.000000	0.000000
13.000	0.621	-0.000000	0.000000
14.000	0.098	0.000000	0.000000
15.000	0.058	0.000000	0.000000
16.000	0.065	0.000000	0.000000
17.000	0.074	-0.000000	0.000000
18.000	0.084	0.000000	0.000000
19.000	0.091	-0.000000	0.000000
20.000	0.106	-0.000000	0.000000
21.000	0.130	-0.000000	0.000000
22.000	0.137	-0.000000	0.000000
23.000	0.142	0.000000	0.000000
24.000	0.148	0.000000	0.000000
25.000	0.171	0.000000	0.000000
26.000	0.272	0.000000	0.000000
27.000	0.416	0.000000	0.000000
28.000	0.547	0.000000	0.000000
29.000	0.455	0.000000	0.000000
30.000	0.756	0.000000	0.000000
31.000	0.900	0.000000	0.000000
32.000	1.117	0.000000	0.000000
33.000	1.008	0.000000	0.000000
34.000	1.196	0.000000	0.000000
35.000	1.270	0.000000	0.000000
36.000	1.611	0.000000	0.000000
37.000	1.714	0.000000	0.000000
38.000	1.735	0.000000	0.000000
39.000	1.791	0.000000	0.000000
40.000	1.810	-0.000000	0.000000
41.000	1.847	-0.000000	0.000000
42.000	1.871	-0.000000	0.000000
43.001	1.889	-0.000000	0.000000

44.000	1.893	-0.000000	0.000000
45.000	1.942	-0.000000	0.000000
46.000	1.971	-0.000000	0.000000
47.001	1.993	-0.000000	0.000000
48.000	1.987	-0.000000	0.000000
49.000	1.988	-0.000000	0.000000
50.000	2.004	-0.000000	0.000000
51.000	2.005	-0.000000	0.000000
52.000	2.039	-0.000000	0.000000
53.000	2.090	-0.000000	0.000000
54.001	2.105	-0.000000	0.000000
55.000	2.123	-0.000000	0.000000

MASS BALANCE INFLOW - OUTFLOW VOLUME

*** INFLOW (CU METERS) ***

WATER BULKED W/SEDIMENT

SURFACE WATER INFLOW HYDROGRAPH 5964864.820
8113853.353

*** SURFACE OUTFLOW (CU METERS) ***

OVERLAND FLOW

WATER

BULKED W/SEDIMENT

FLOODPLAIN STORAGE

6223.721

8278.044

FLOODPLAIN OUTFLOW HYDROGRAPH

5921035.376

8105575.309

FLOODPLAIN OUTFLOW AND STORAGE

5927259.098

8113853.353

TOL FLOODPLAIN STORAGE

2494.105

*** TOTALS ***

TOTAL OUTFLOW FROM GRID SYSTEM

5921035.376

8105575.309

TOTAL VOLUME OF OUTFLOW AND STORAGE

5927259.098

8113853.353

SURFACE AREA OF INUNDATION REGARDLESS OF THE TIME OF OCCURRENCE:
(FOR FLOW DEPTHS GREATER THAN THE "TOL" VALUE TYPICALLY 0.1 FT OR 0.03
M)

THE MAXIMUM INUNDATED AREA IS:

83150.000 SQ. METERS

THE MAXIMUM INUNDATED AREA (DEPTH > 0.15 M) IS:
METERS

82625.000 SQ.

GRID ELEMENT SIZE: 5.0 M
TOTAL NUMBER OF GRID ELEMENTS: 14465
GRID SYSTEM AREA: 361625.00 SQ M 0.3616 SQ. KM.

AVERAGE GRID ELEMENT FLOW DIRECTION FLOODPLAIN HYDRAULICS:

DISCHARGE (CFS OR CMS): 8.143
VELOCITY (FPS OR CMS): 1.444
FLOW AREA (FT^2 OR M^2): 4.267
FLOW DEPTH (FT OR M): 2.060
FLOW WIDTH (FT OR M): 2.071

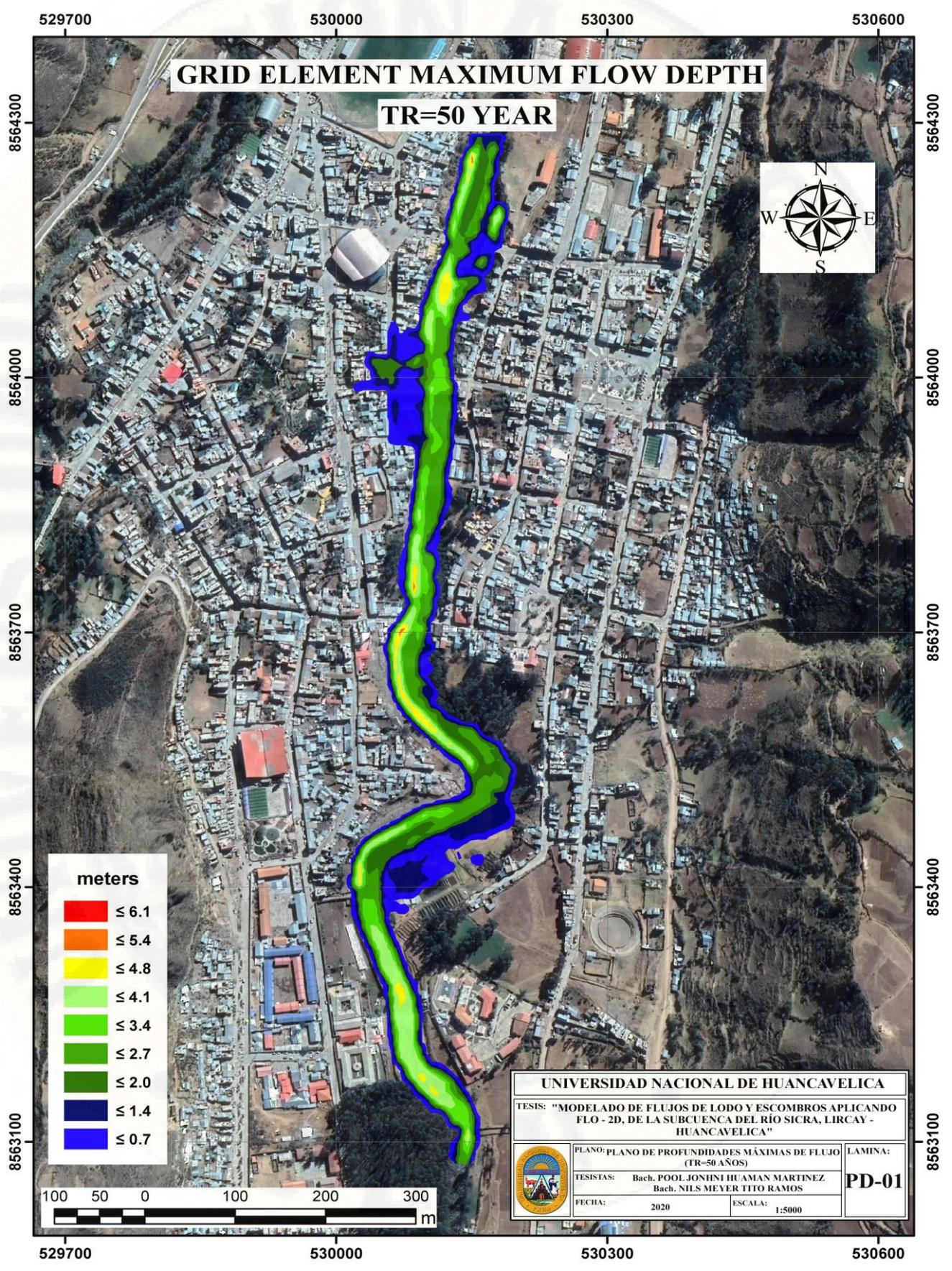
TOTAL COMPUTATIONS: 1686192887.

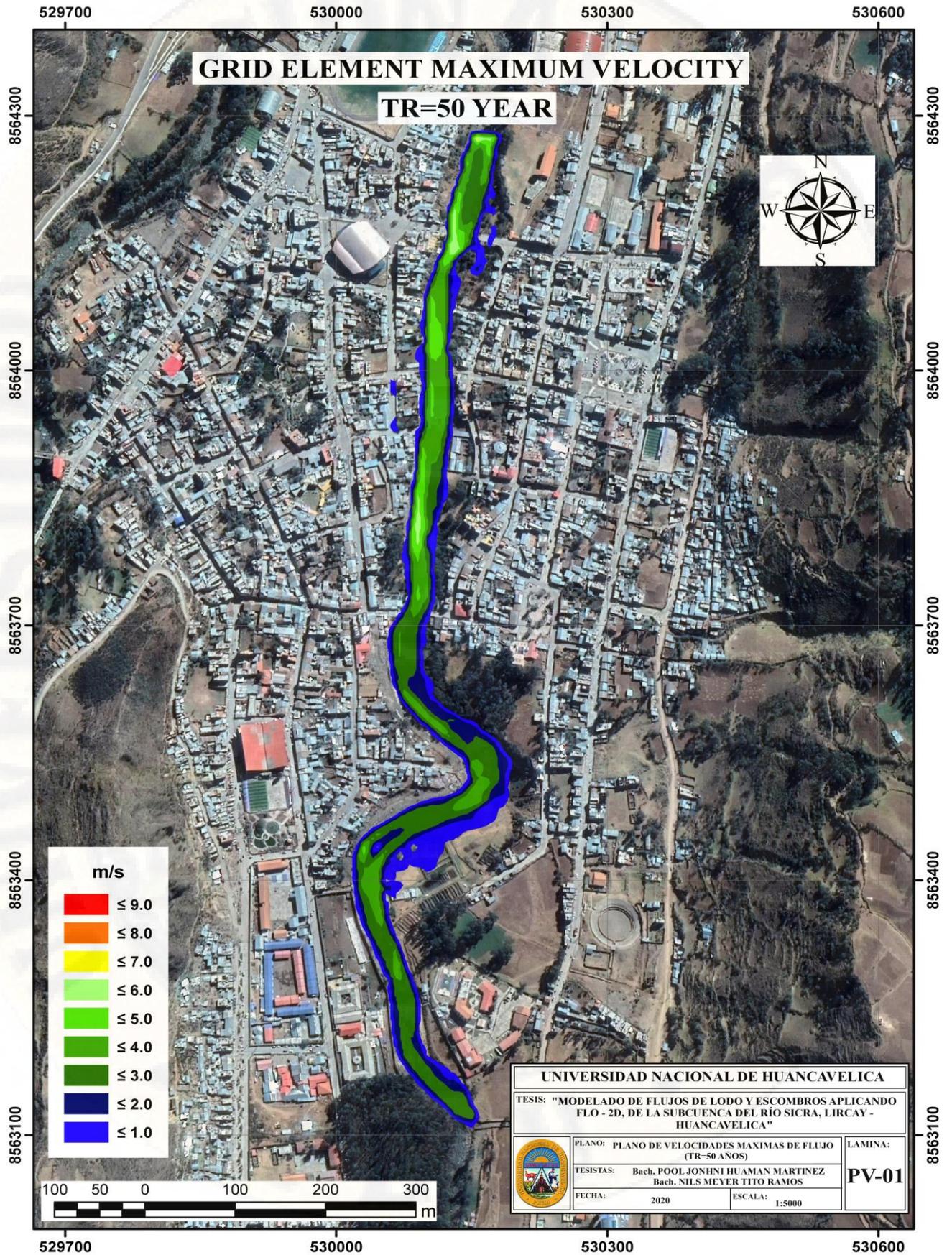
COMPUTER RUN TIME IS : 0.71143 HRS

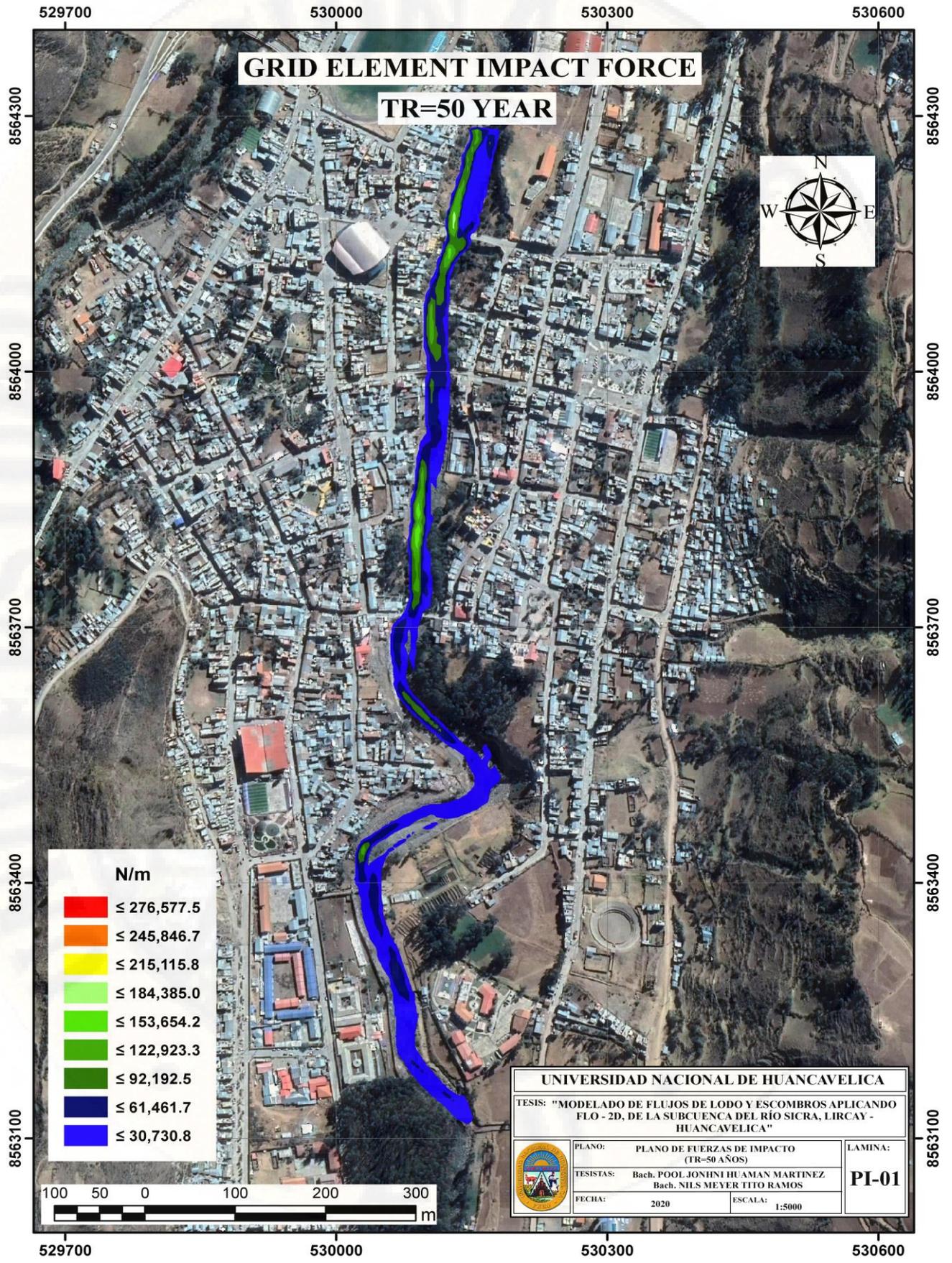
THIS OUTPUT FILE WAS TERMINATED ON: 3/8/2020 AT: 17:40:31

C.3 Planos generados en entorno GIS, con los datos obtenidos del modelo Flo - 2D y el post procesador MAPPER PRO.

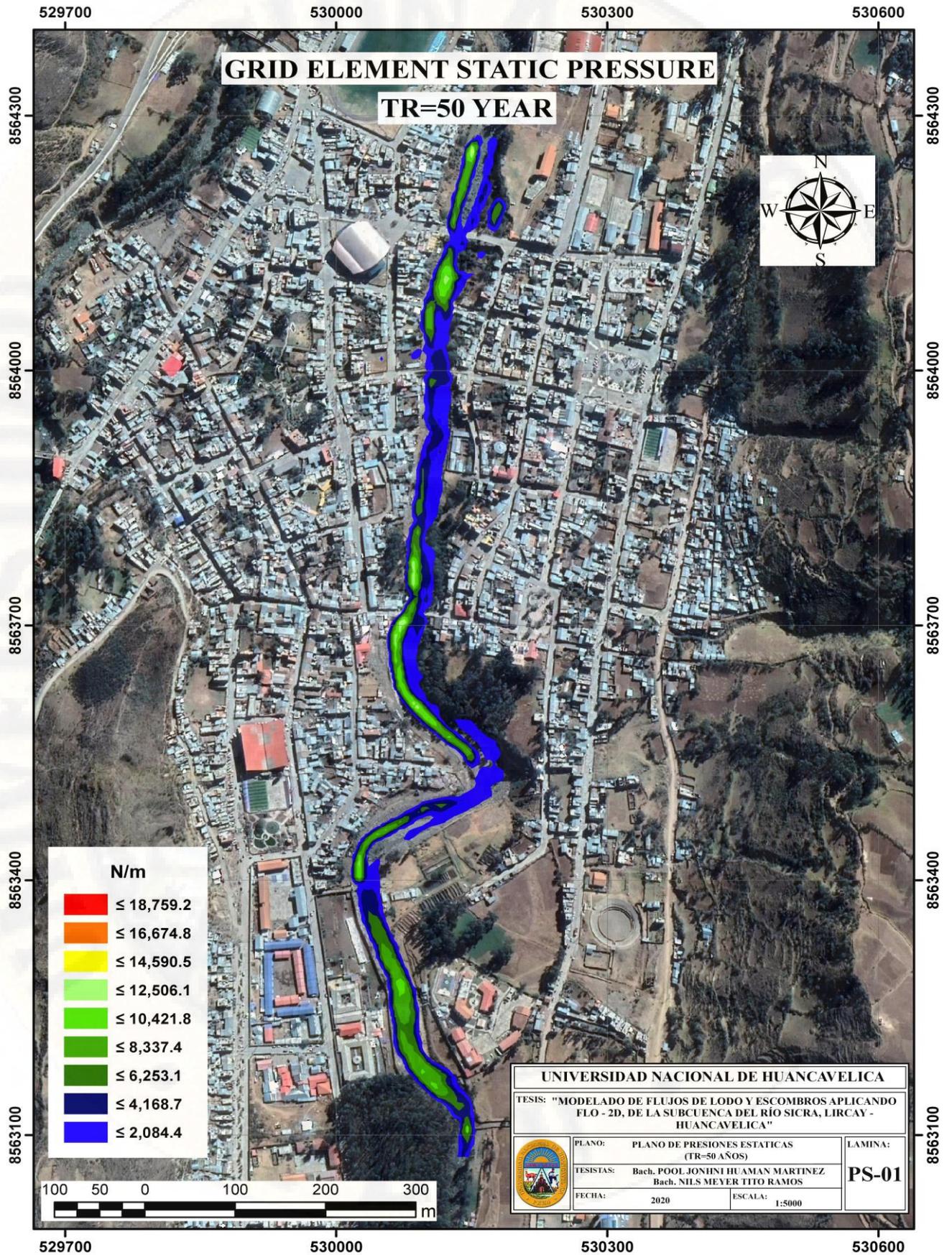
WATER EVENT (TR = 50 AÑOS)

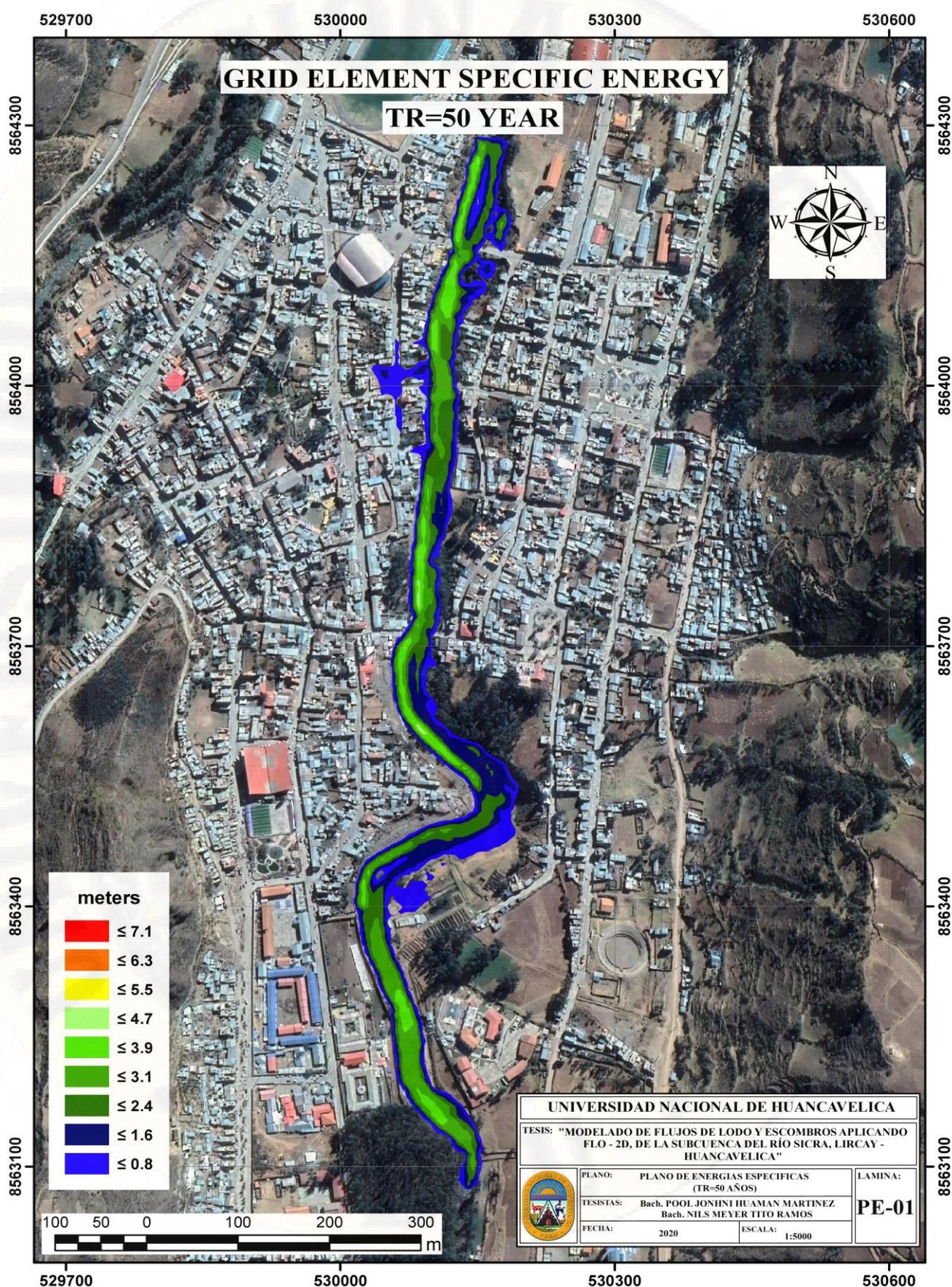






UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA		
TESIS: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA, LIRCAY - HUANCAMELICA"		
	PLANO: PLANO DE FUERZAS DE IMPACTO (TR=50 AÑOS)	LAMINA:
	TESISTAS: Bach. POOL JONHNI HUAMAN MARTINEZ Bach. NILS MEYER TITO RAMOS	PI-01
	FECHA: 2020	ESCALA: 1:5000





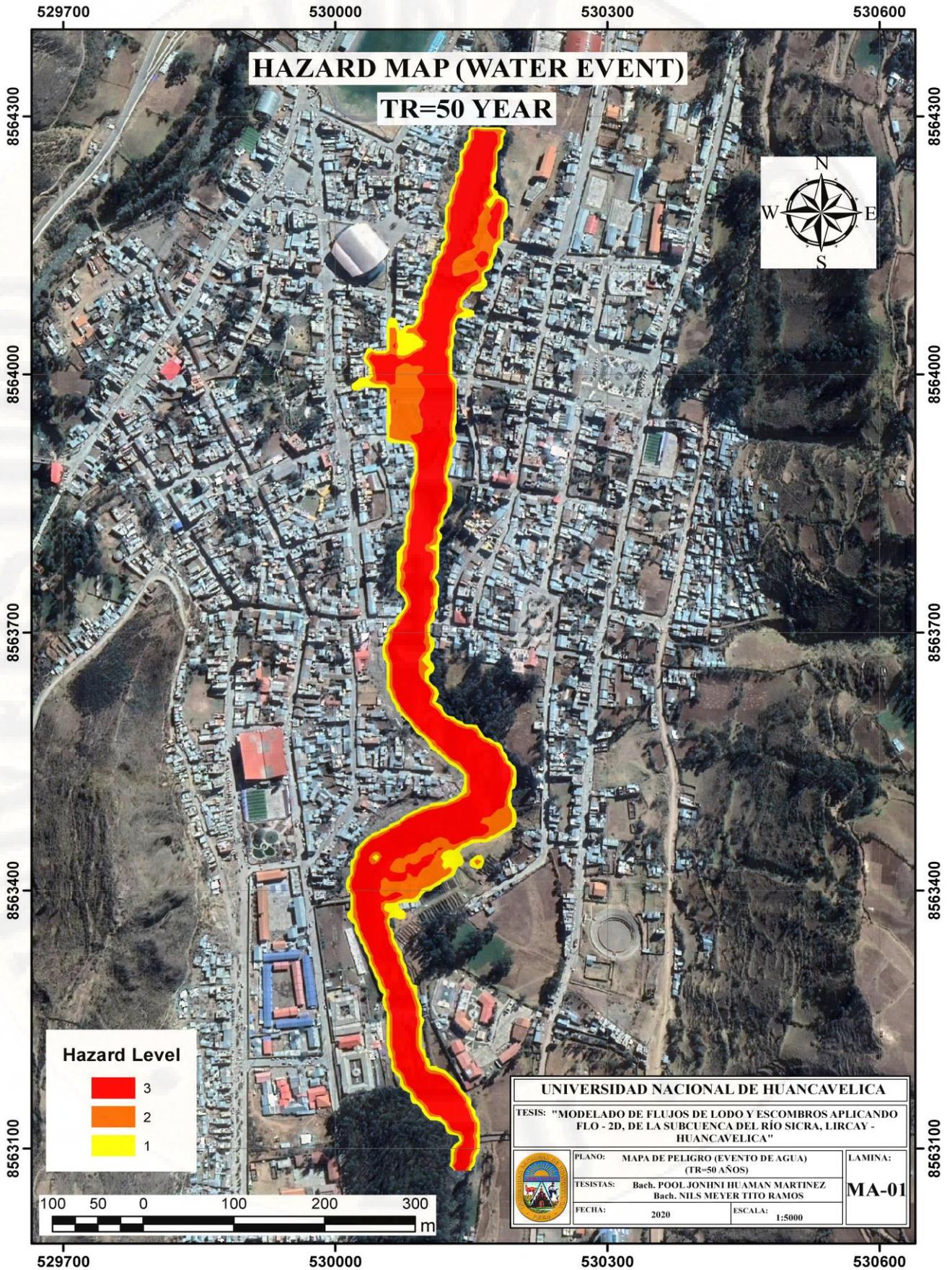
GRID ELEMENT SPECIFIC ENERGY

TR=50 YEAR

meters

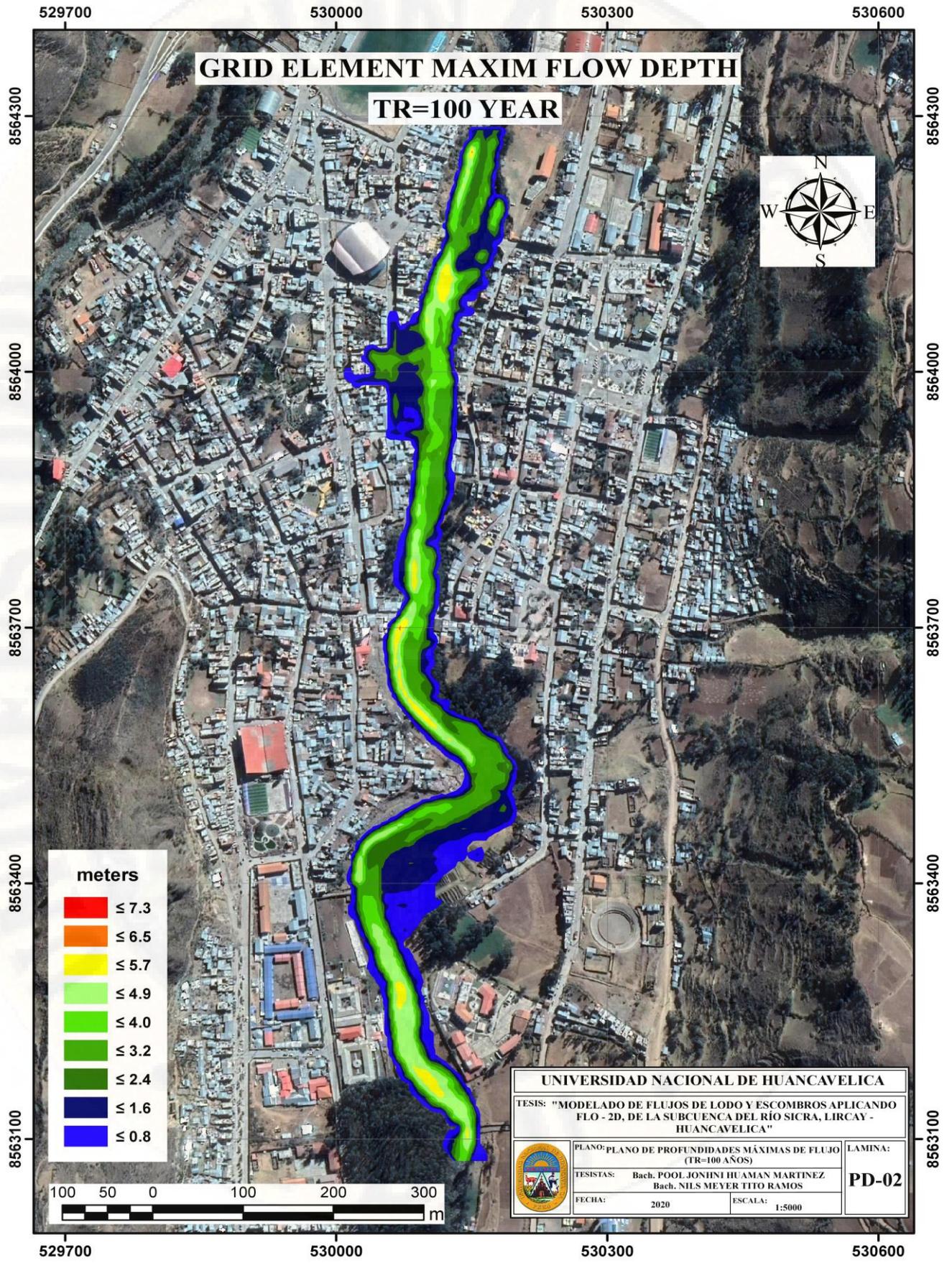
Red	≤ 7.1
Orange	≤ 6.3
Yellow	≤ 5.5
Light Green	≤ 4.7
Green	≤ 3.9
Dark Green	≤ 3.1
Dark Blue	≤ 2.4
Blue	≤ 1.6
Dark Blue	≤ 0.8

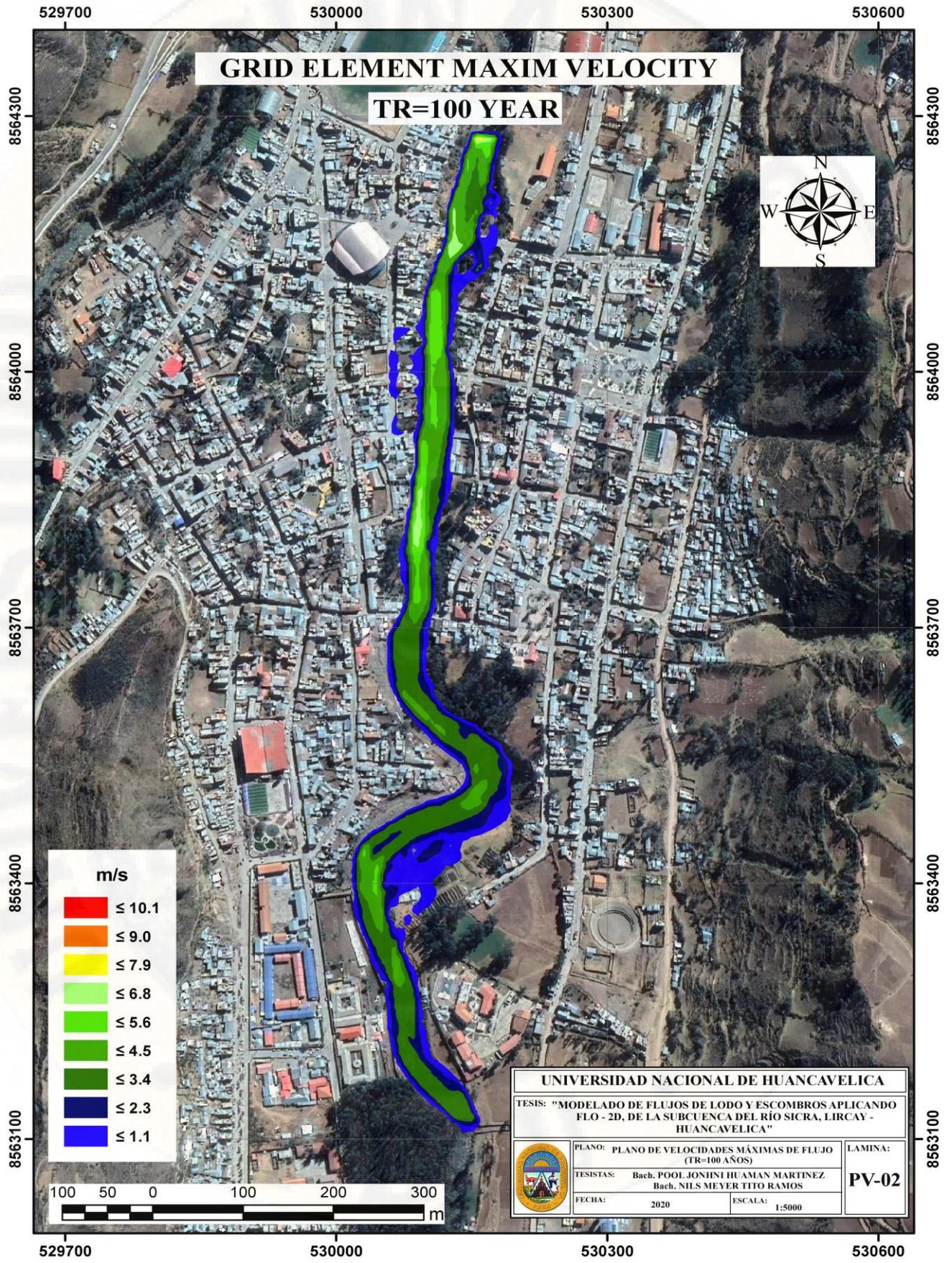
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA		
TESIS: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA, LIRCAY - HUANCAMELICA"		
	PLANO: PLANO DE ENERGIAS ESPECIFICAS (TR=50 AÑOS)	LAMINA: PE-01
	TESISTAS: Bach. POOL JONHNI HUAMAN MARTINEZ Bach. NILS MEYER TITO RAMOS	
	FECHA: 2020	ESCALA: 1:5000





WATER EVENT
(TR = 100 AÑOS)

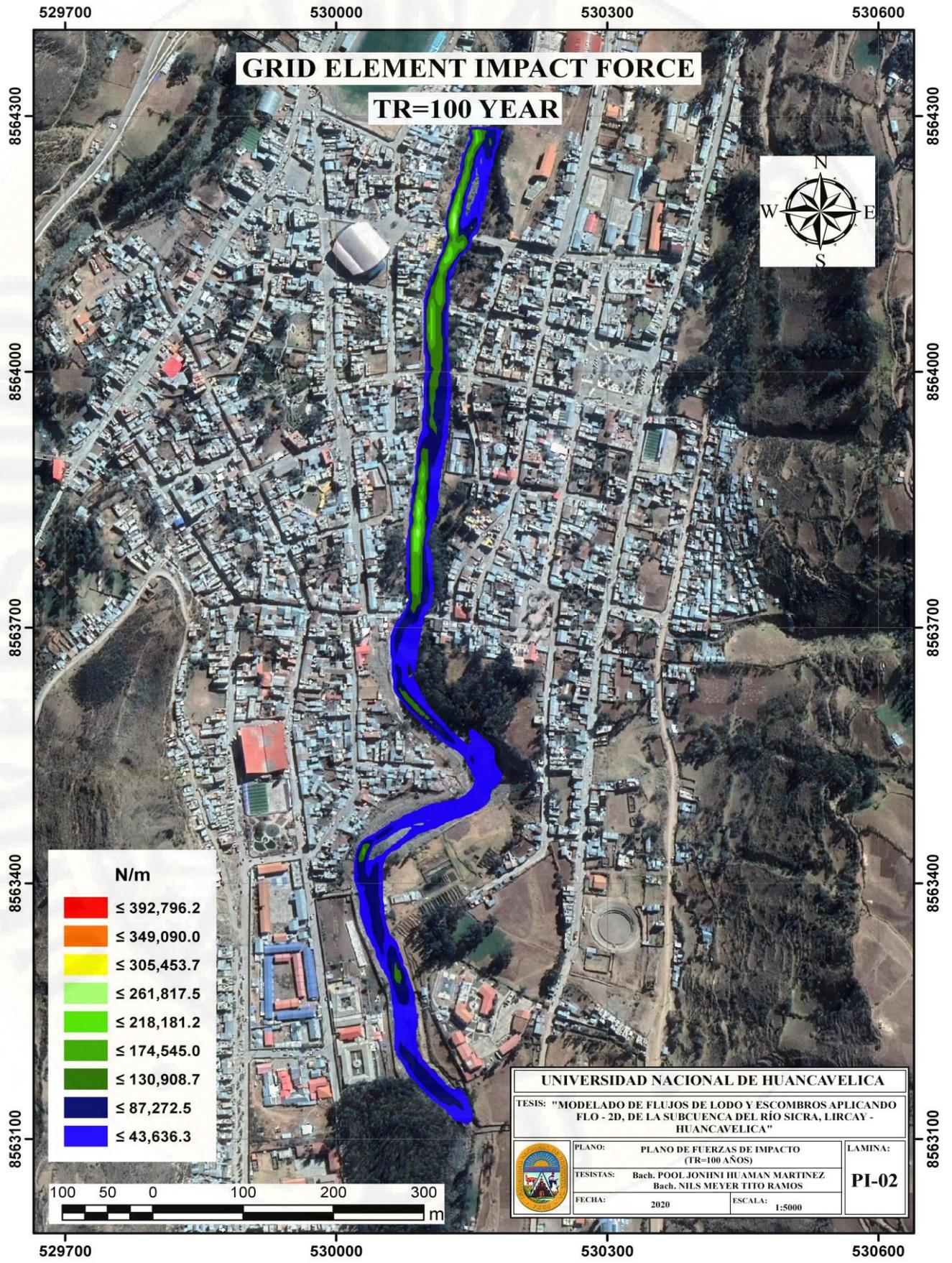


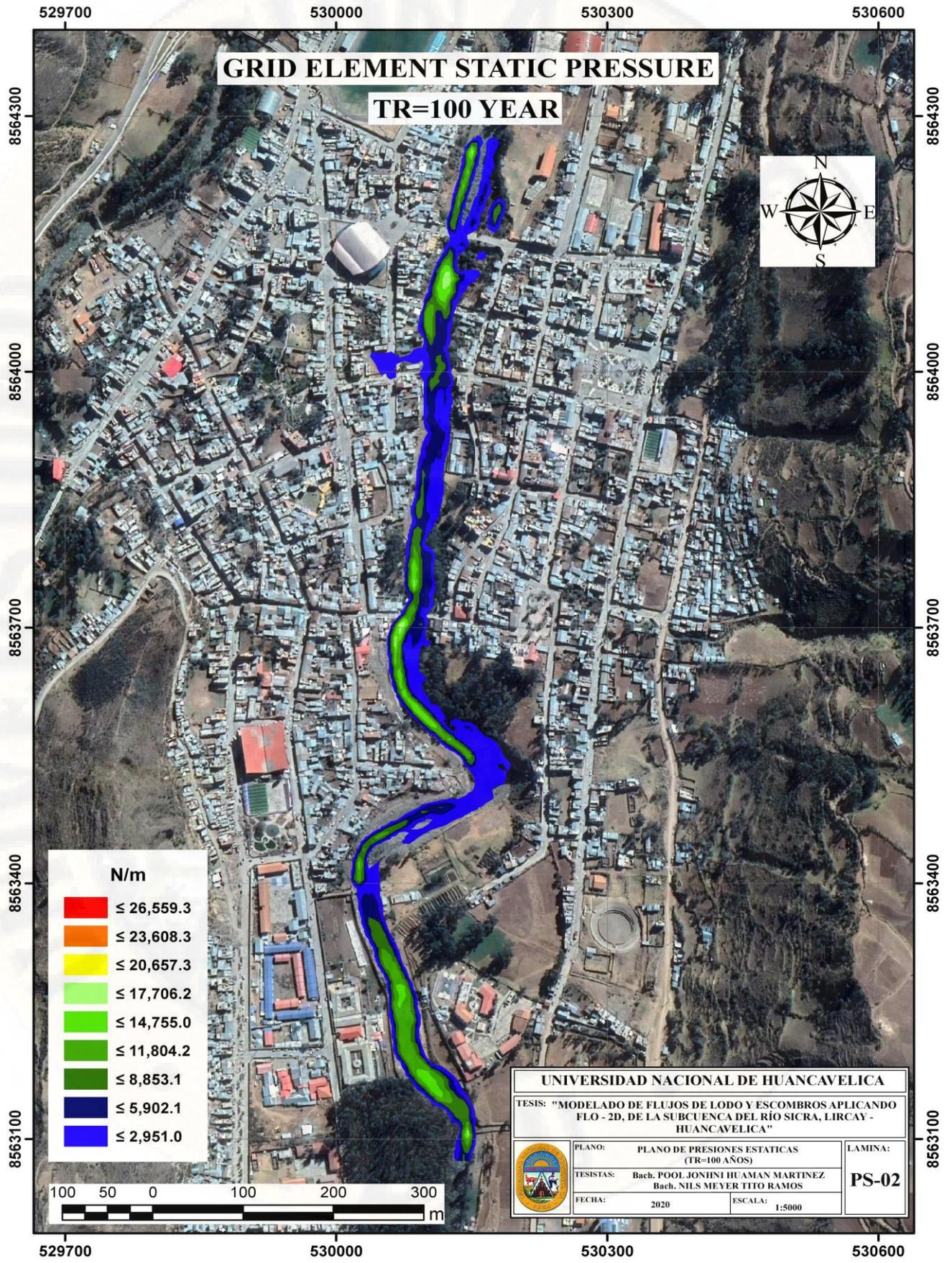


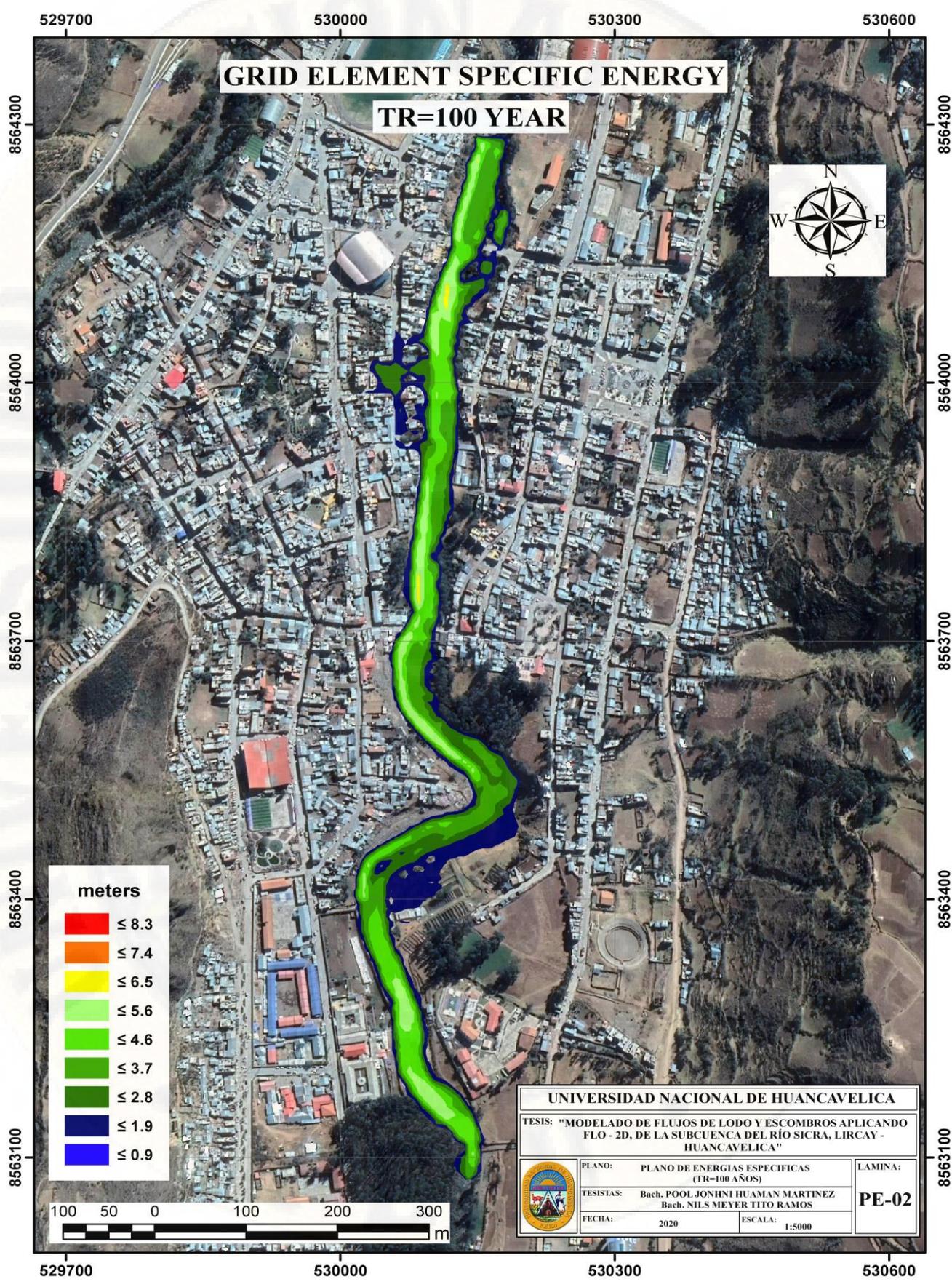
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA

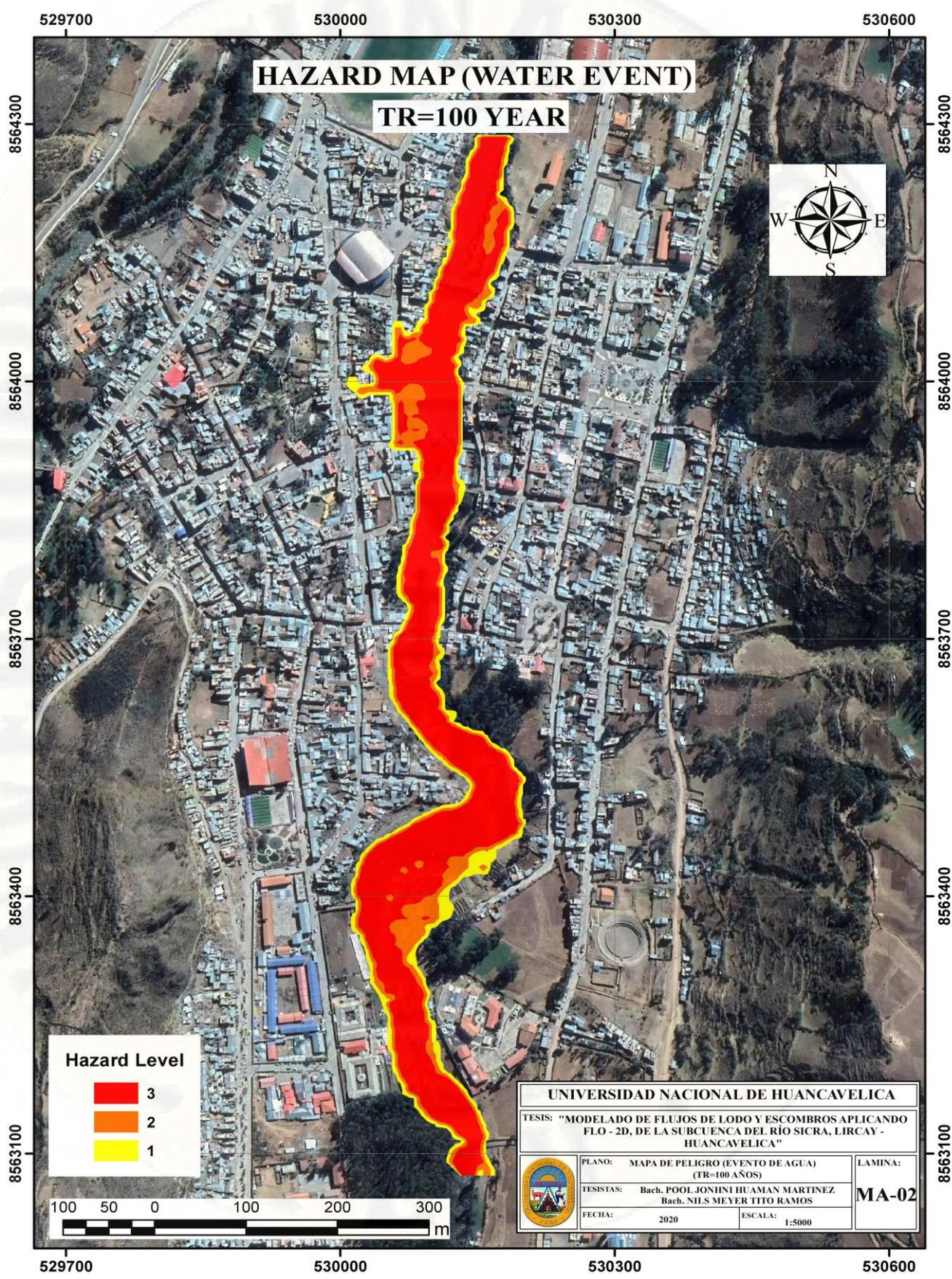
TESIS: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA, LIRCAY - HUANCAMELICA"

	PLANO: PLANO DE VELOCIDADES MÁXIMAS DE FLUJO (TR=100 AÑOS)	LAMINA:
	TESISTAS: Bach. POOL JONHNI HUAMAN MARTINEZ Bach. NILS MEYER TITO RAMOS	PV-02
FECHA: 2020	ESCALA: 1:5000	







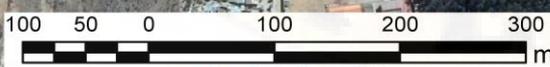


HAZARD MAP (WATER EVENT)

TR=100 YEAR

Hazard Level

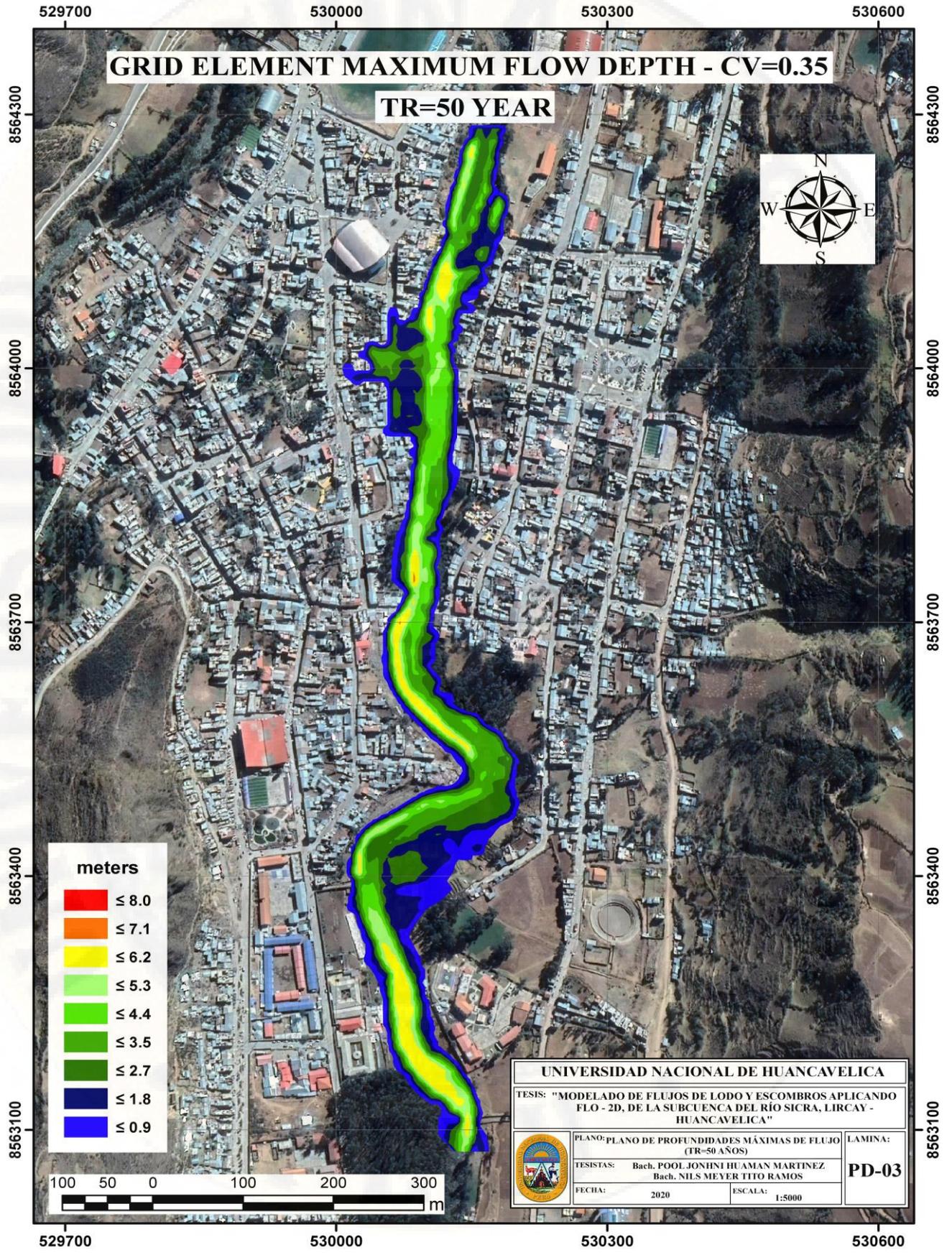
- 3
- 2
- 1

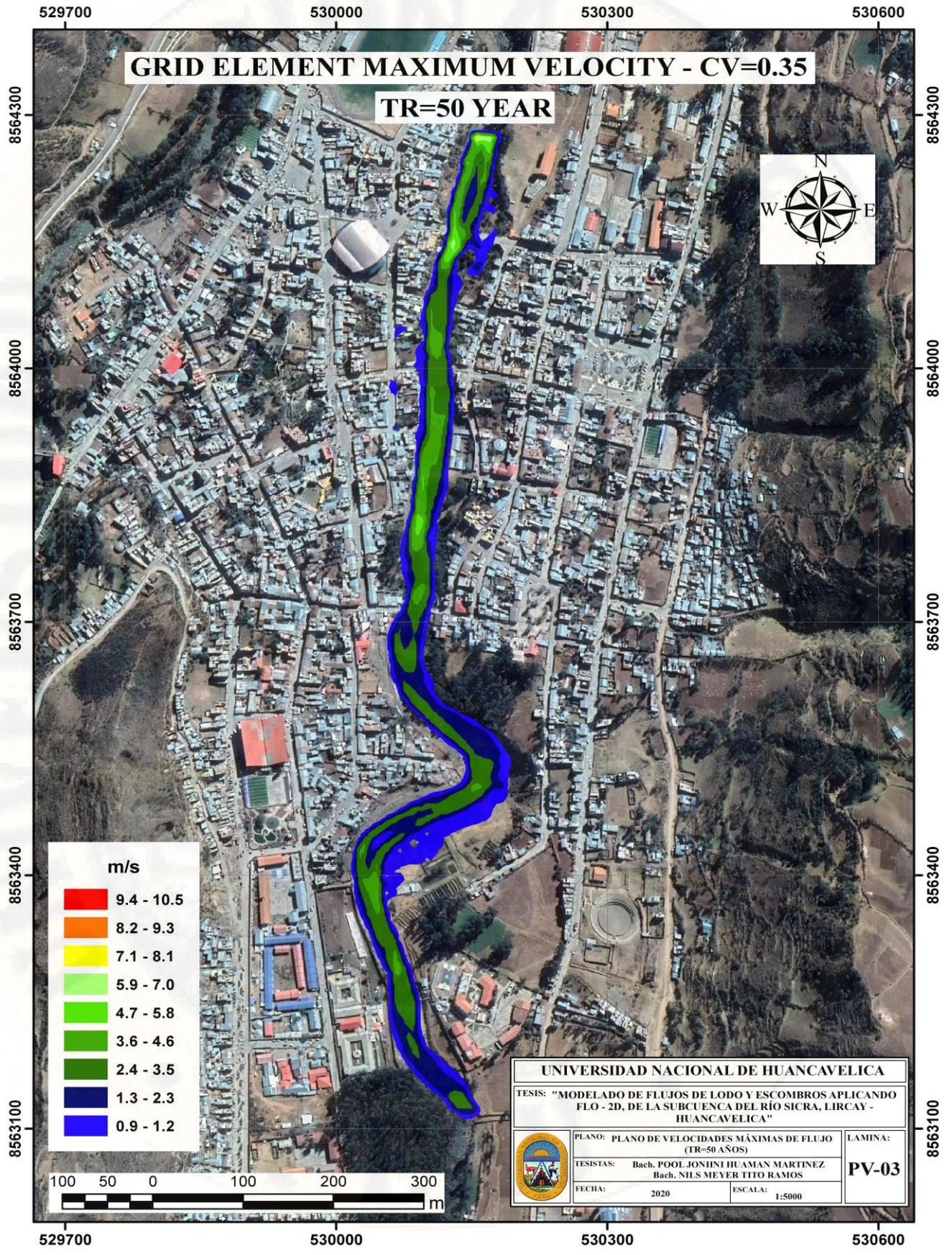


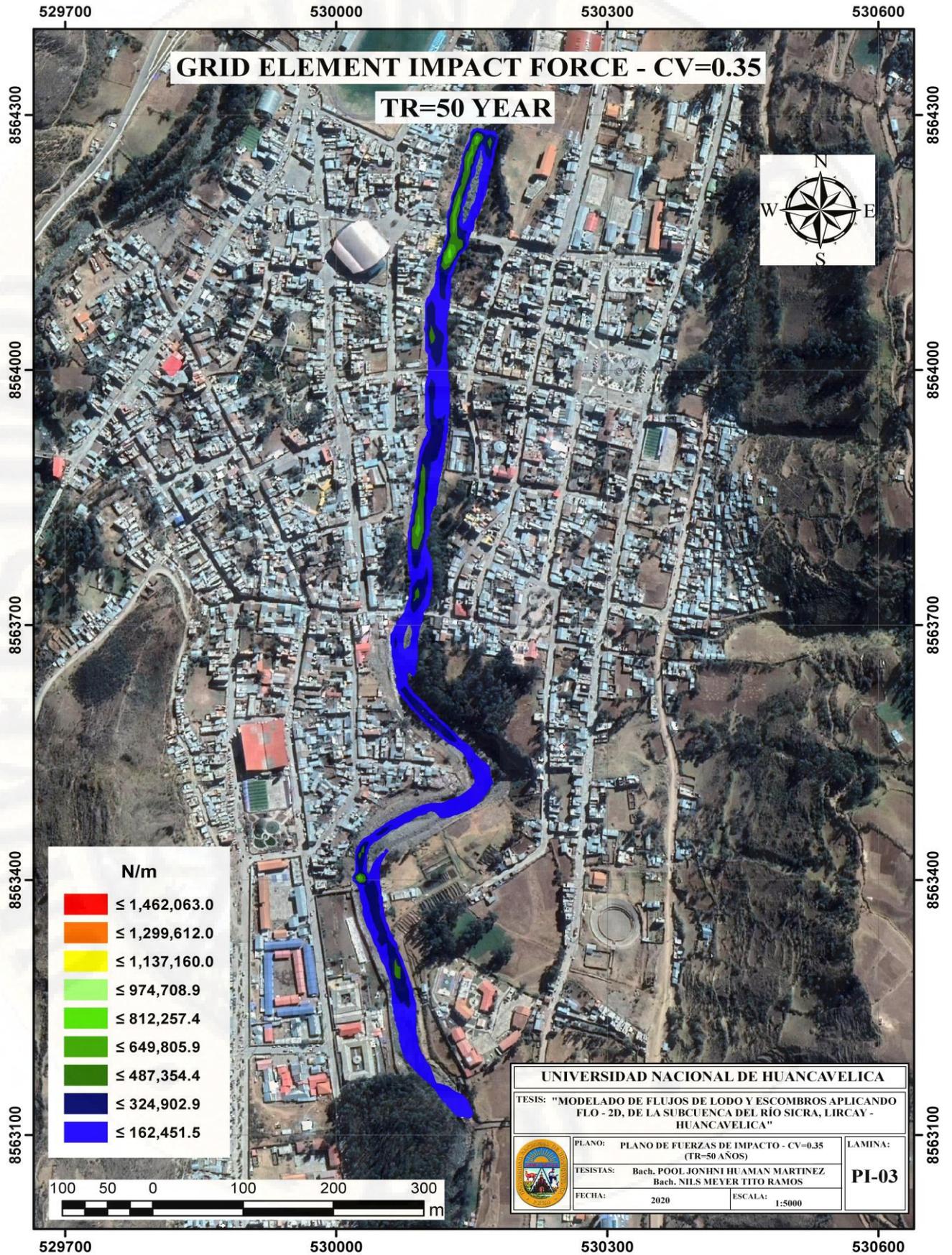
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA		
TESIS: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA, LIRCAY - HUANCAMELICA"		
	PLANO: MAPA DE PELIGRO (EVENTO DE AGUA) (TR=100 AÑOS)	LAMINA:
	TESISTAS: Bach. POOL JONHNI HUAMAN MARTINEZ Bach. NILS MEYER TITO RAMOS	MA-02
	FECHA: 2020	ESCALA: 1:5000

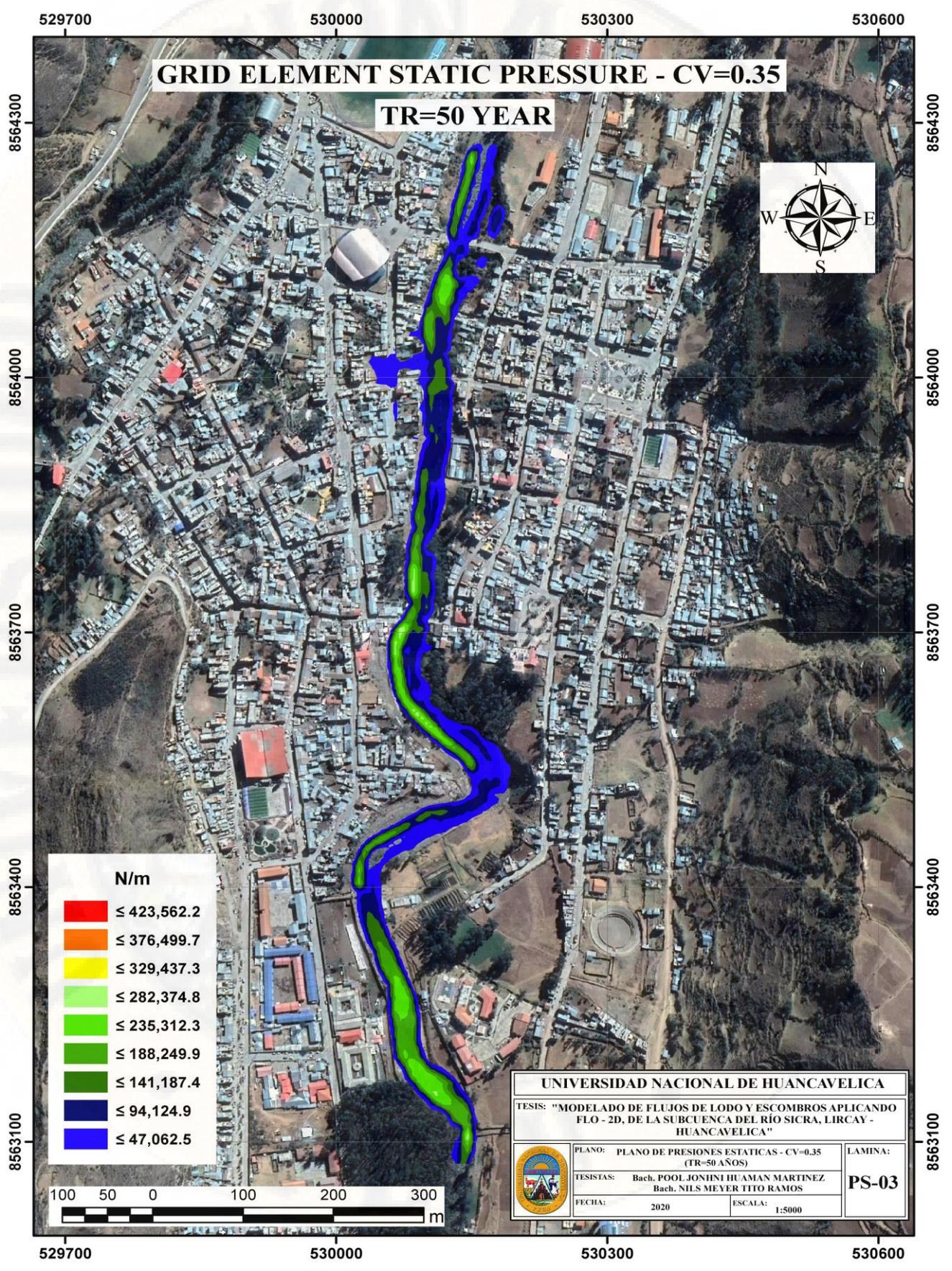


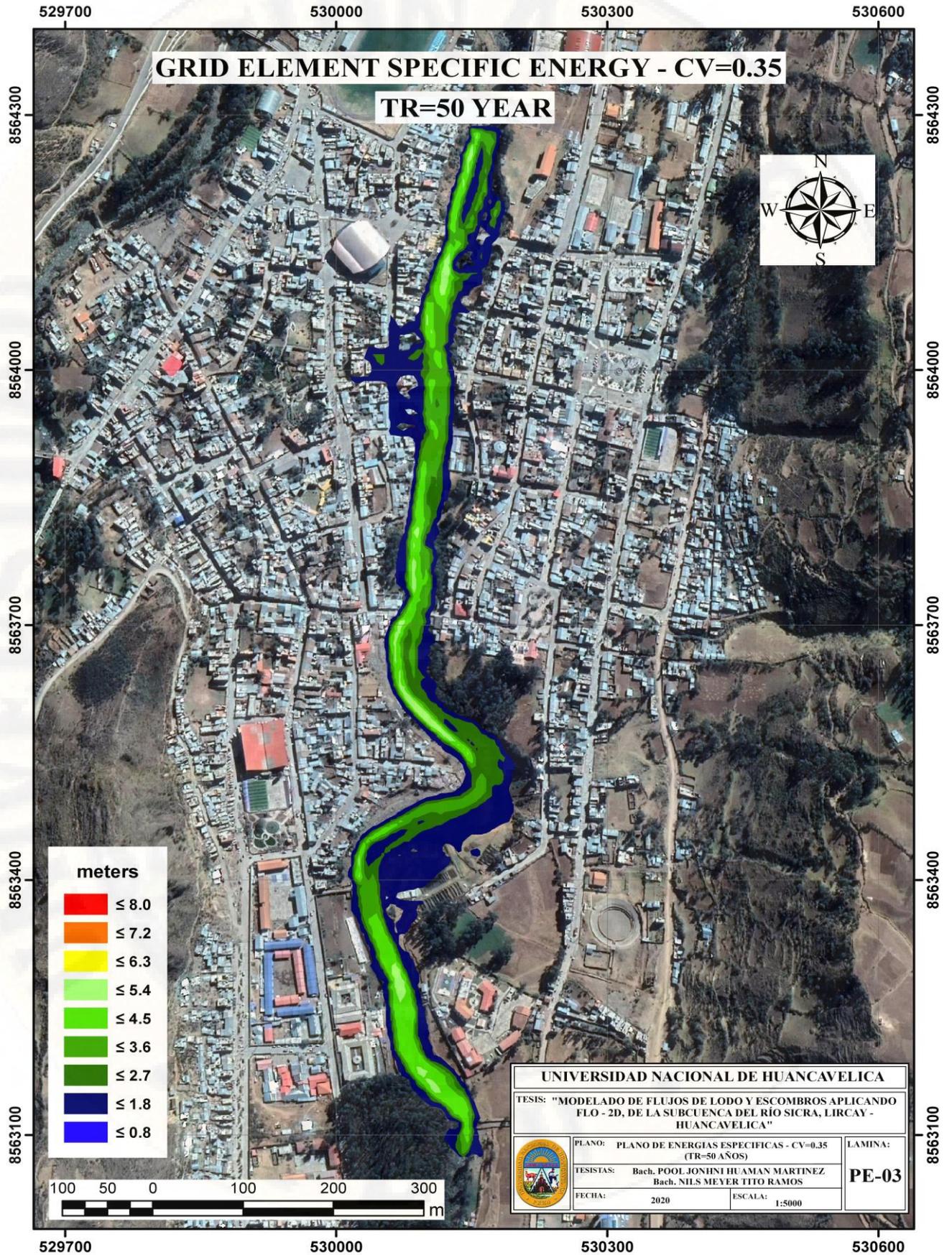
**MUD EVENT (TR
= 50 AÑOS)**











GRID ELEMENT SPECIFIC ENERGY - CV=0.35

TR=50 YEAR

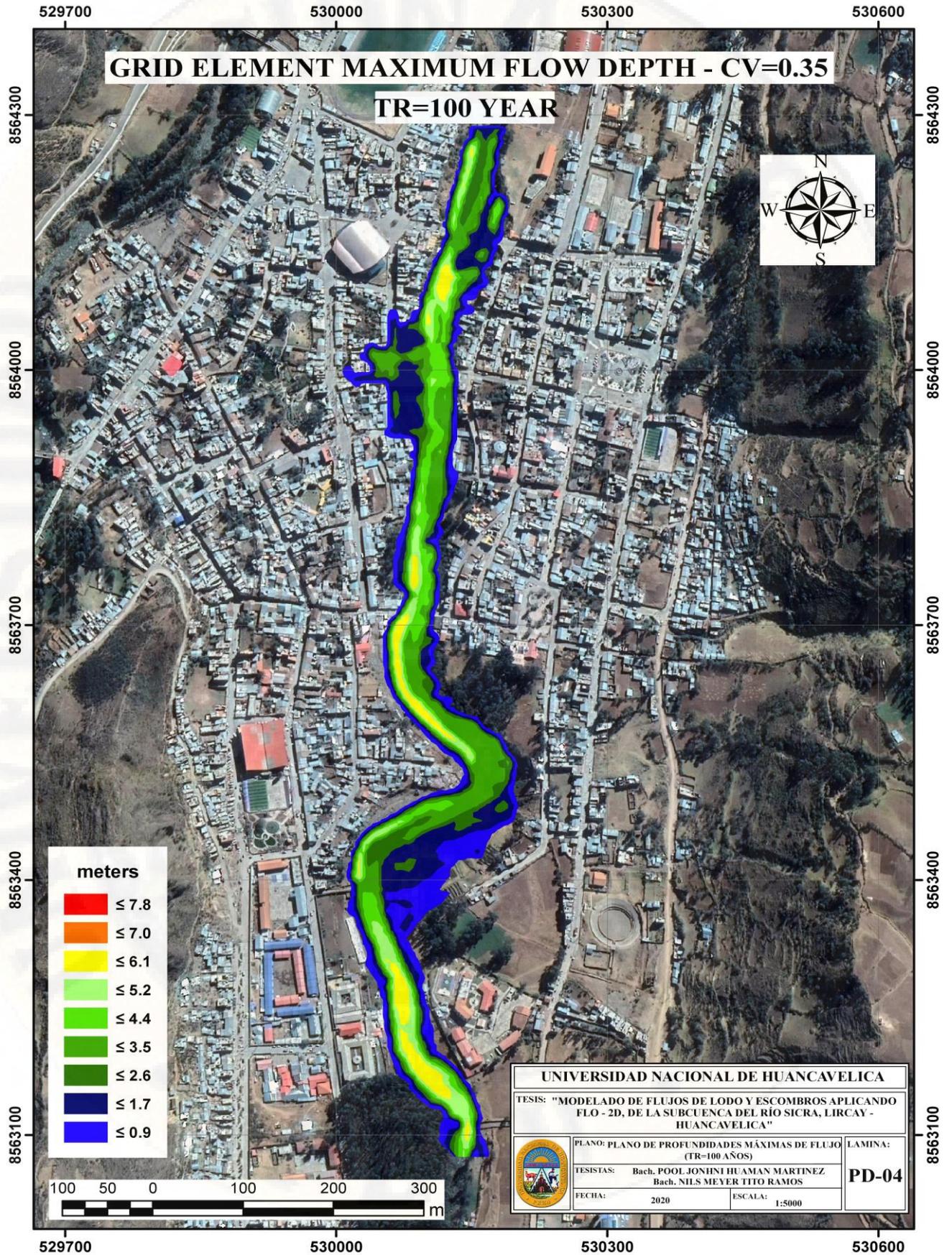
meters

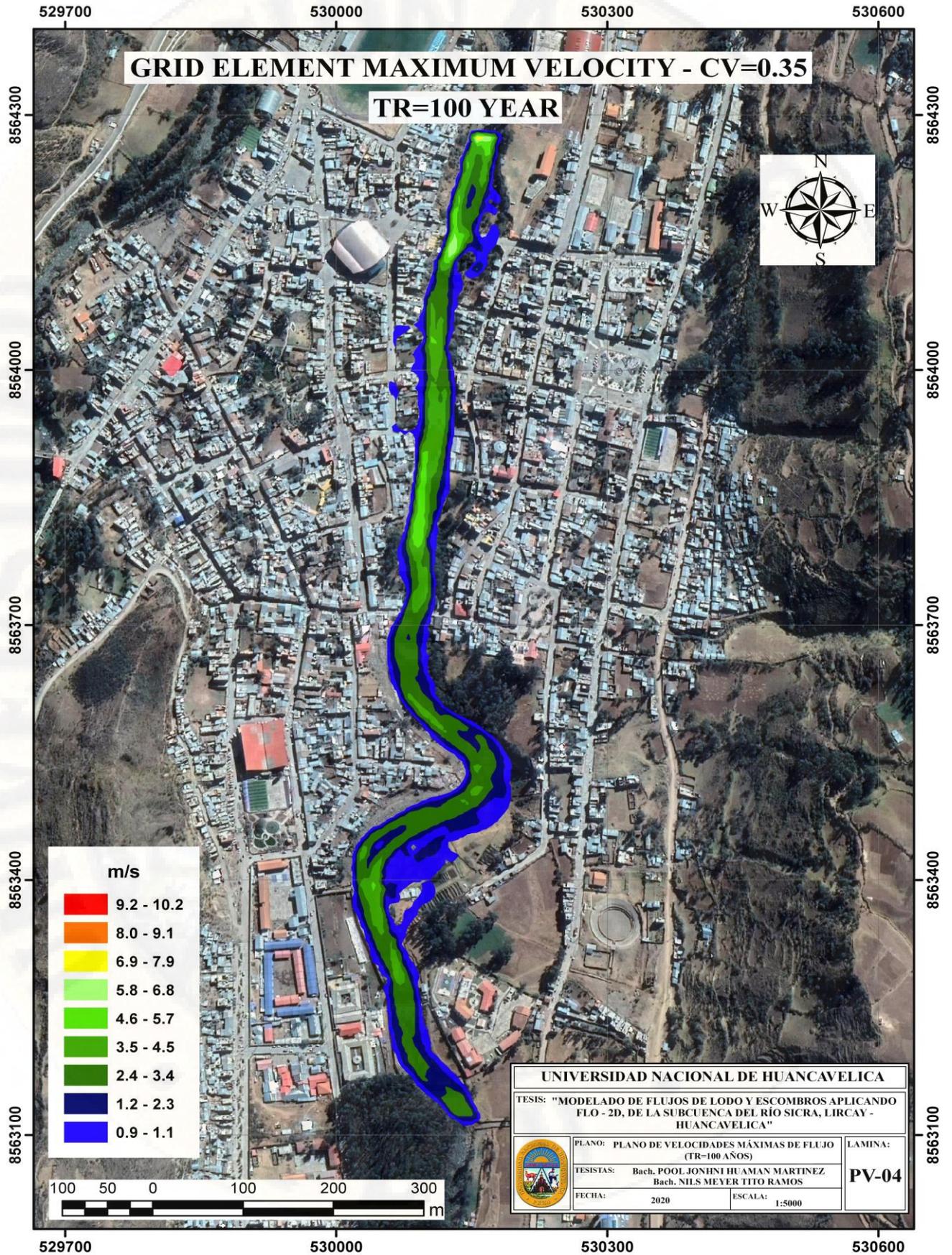
Red	≤ 8.0
Orange	≤ 7.2
Yellow	≤ 6.3
Light Green	≤ 5.4
Green	≤ 4.5
Dark Green	≤ 3.6
Dark Blue	≤ 2.7
Blue	≤ 1.8
Dark Blue	≤ 0.8

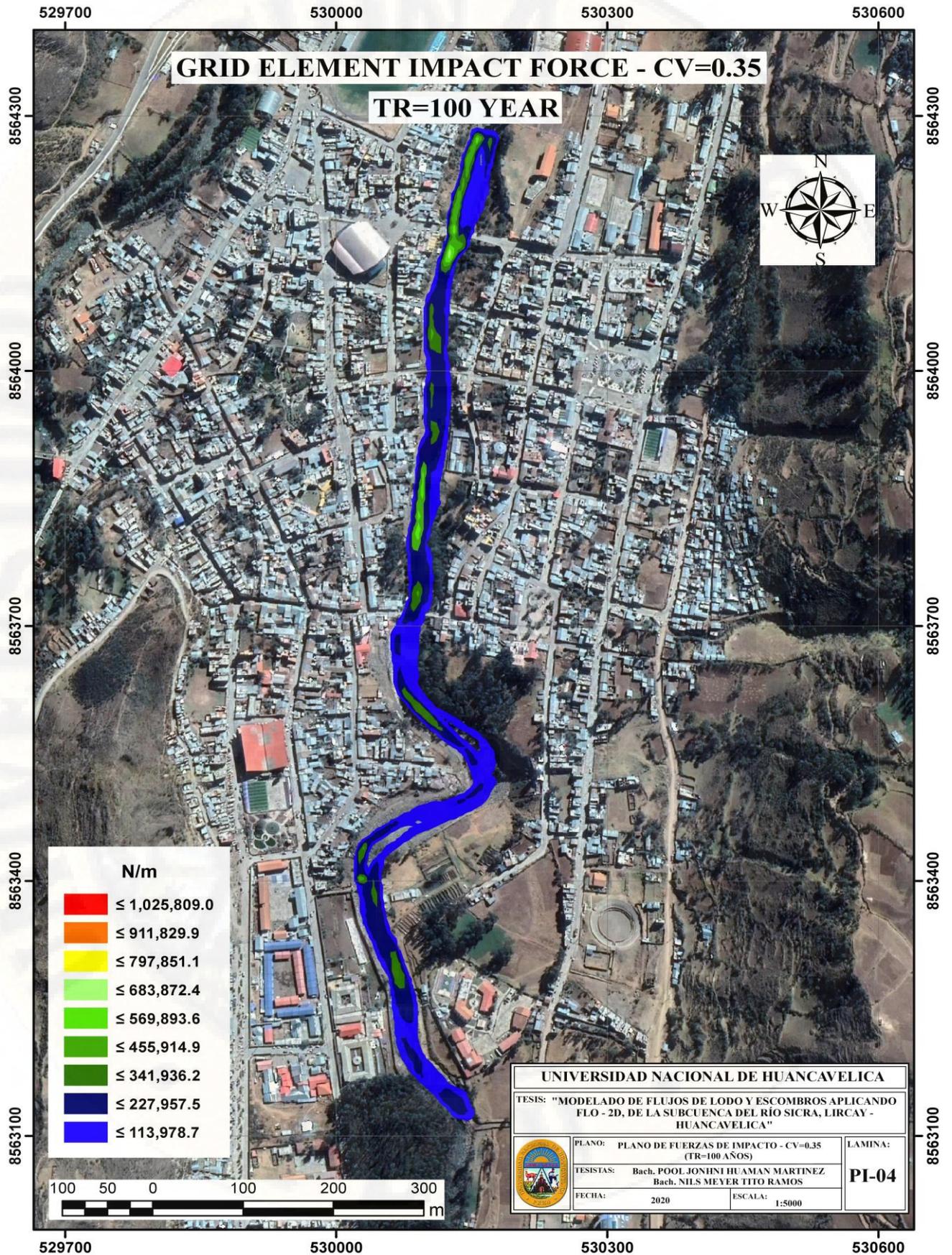
UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAMELICA		
TESIS: "MODELADO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS APLICANDO FLO - 2D, DE LA SUBCUENCA DEL RÍO SICRA, LIRCAY - HUANCAMELICA"		
	PLANO: PLANO DE ENERGIAS ESPECIFICAS - CV=0.35 (TR=50 AÑOS)	LAMINA:
	TESISTAS: Bach. POOL JONHNI HUAMAN MARTINEZ Bach. NILS MEYER TITO RAMOS	PE-03
FECHA: 2020	ESCALA: 1:5000	

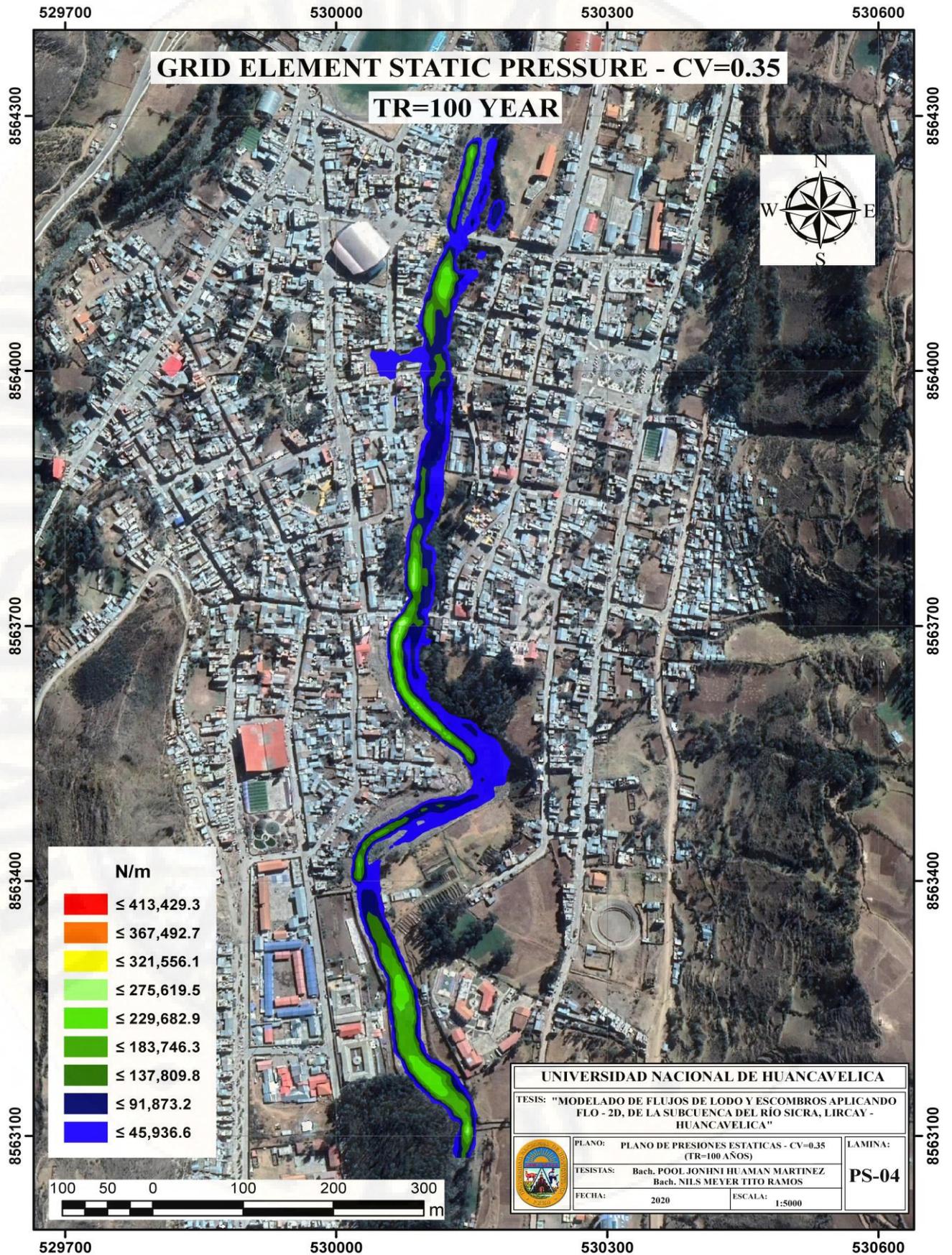


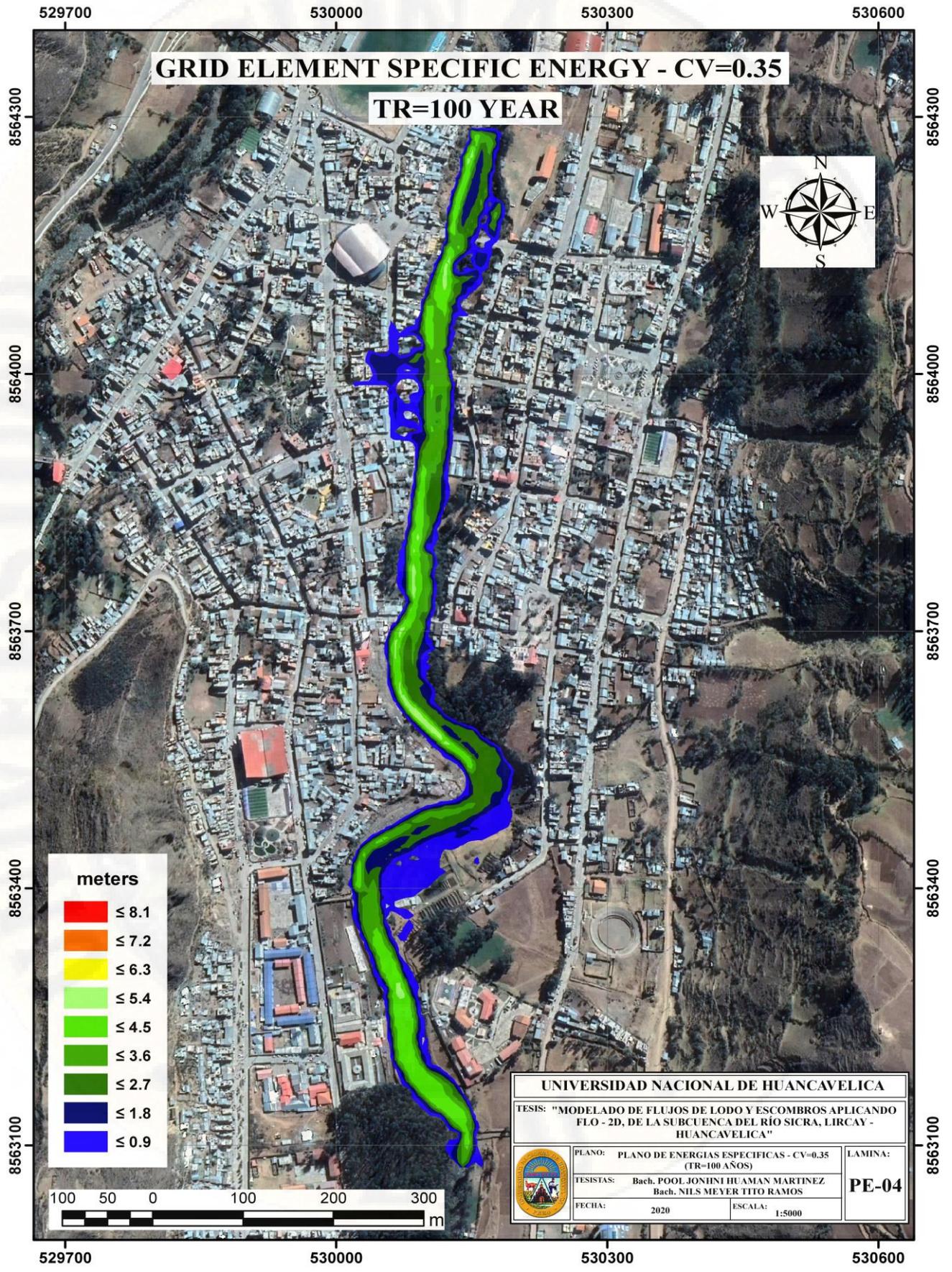
**MUD EVENT (TR
= 100 AÑOS)**











ANEXO D – PANEL FOTOGRAFICO

D.1 Panel fotográfico



Figura D.1. Vista del cauce del río Sicra



Figura D.2. Identificación de zonas de deslizamientos en la subcuenca del río Sicra



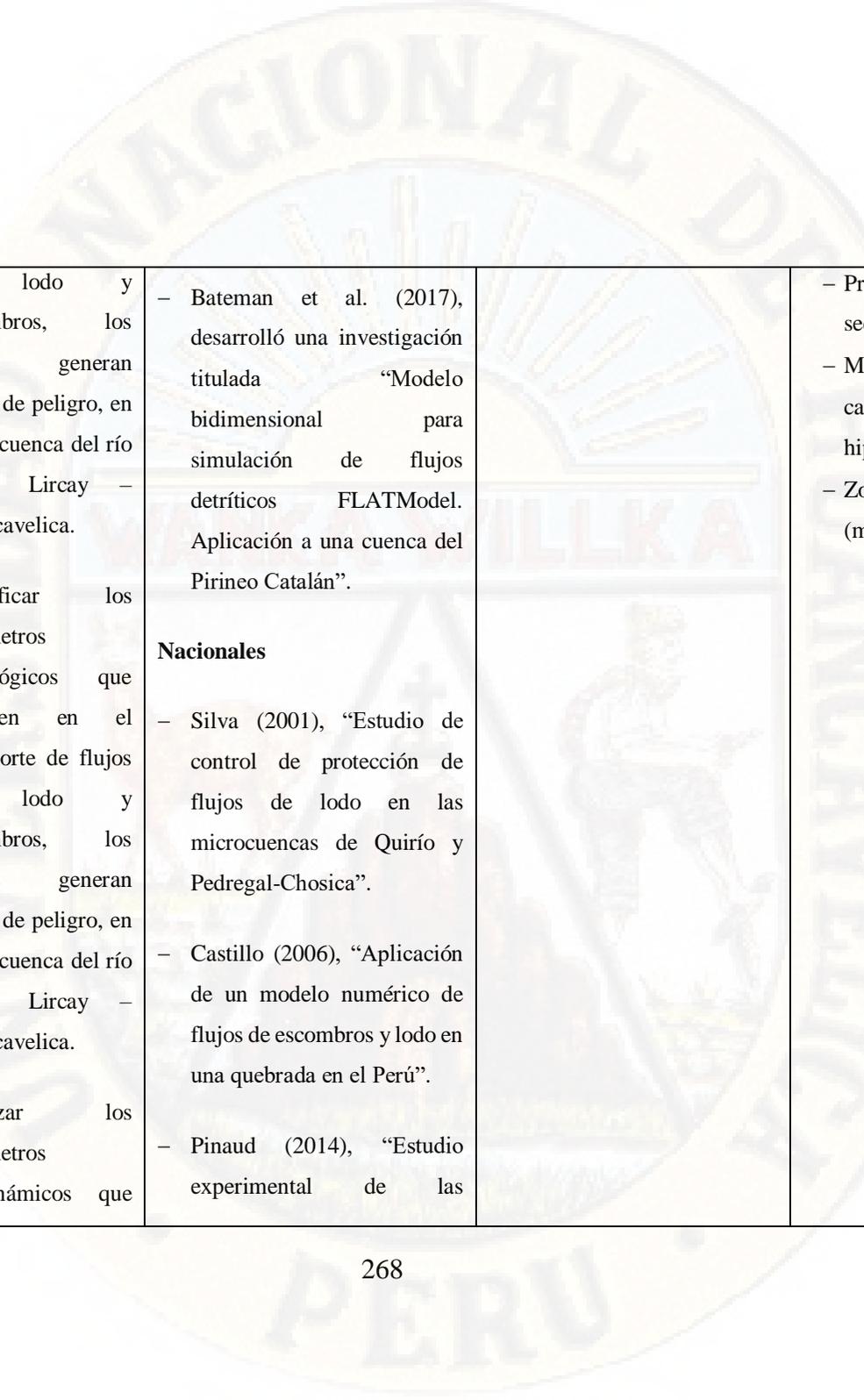
Figura D.3. Analisis de muestras de suelo en laboratoria de E.P Ingeniería Civil – Hvca



Figura D.4. Vuelo del dron sobre el area de estudio (Tramo del cauce del río Sicra)

ANEXO E – MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVO	MARCO TEÓRICO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son las zonas de peligro por flujos de lodo y escombros generados por parámetros geomorfológicos, hidrológicos, y geodinámicos en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>– ¿Qué parámetros geomorfológicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Definir zonas de peligro por flujos de lodo y escombros generados por parámetros geomorfológicos, hidrológicos, y geodinámicos en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>– Determinar los parámetros geomorfológicos que influyen en el transporte de flujos</p>	<p>Antecedentes</p> <p>Internacionales</p> <p>– Aguirre et al. (2000), “Flujos y deposición de barros y escombros”.</p> <p>– Oliveira (2012), “Estudio del impacto de los flujos de escombros en la cuenca del río San Antonio - Brasil”.</p> <p>– Sepúlveda et al. (2016), “Metodología para evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvias caso Útica - Colombia”.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>La presente investigación por el nivel en el que se desarrolla no presenta hipótesis. Según Hernández, et al. (2014, p.104), “No en todas las investigaciones cuantitativas se plantean hipótesis. El hecho de que planteemos o no hipótesis depende de un factor esencial. El alcance inicial del estudio”.</p>	<p>Variable 01</p> <p>Subcuenca del río Sicra.</p> <p>Dimensiones:</p> <p>– Geomorfológicas</p> <p>– Hidrológicas</p> <p>– Geodinámicos</p> <p>Variables 02</p> <p>Flujos de lodo y escombros.</p> <p>Dimensiones:</p> <p>– Cantidad de sedimento transportado</p>	<p>Tipo: Aplicada.</p> <p>Nivel: Descriptivo.</p> <p>Método: Deductivo.</p> <p>Diseño: No experimental – longitudinal.</p> <p style="text-align: center;">M → O</p> <p>Donde:</p> <p>M: Muestra.</p> <p>O: Observación</p> <p>Población y muestra</p>

<p>cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?</p> <p>– ¿Qué parámetros hidrológicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica?</p> <p>– ¿Qué parámetros geodinámicos influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca</p>	<p>de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.</p> <p>– Identificar los parámetros hidrológicos que influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.</p> <p>– Analizar los parámetros geodinámicos que</p>	<p>– Bateman et al. (2017), desarrolló una investigación titulada “Modelo bidimensional para simulación de flujos detríticos FLATModel. Aplicación a una cuenca del Pirineo Catalán”.</p> <p>Nacionales</p> <p>– Silva (2001), “Estudio de control de protección de flujos de lodo en las microcuencas de Quirío y Pedregal-Chosica”.</p> <p>– Castillo (2006), “Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú”.</p> <p>– Pinaud (2014), “Estudio experimental de las</p>		<p>– Profundidad de sedimento</p> <p>– Magnitud del caudal de flujo hiperconcentrado</p> <p>– Zonas de peligro (mapas de peligro</p>	<p>Población: Subcuenca del río Sicra.</p> <p>Muestra: No probabilística, de progresiva 0+565 km al 1+744 km del cauce principal del río Sicra (área urbana del distrito de Lircay).</p> <p>Técnica e instrumentos:</p> <p>Técnicas:</p> <p>– Observación sistemática.</p> <p>– Acopio de datos</p> <p>Instrumentos:</p> <p>– Fichas bibliográficas</p>
---	---	--	---	--	--

<p>del río Sicra, Lircay – Huancavelica?</p>	<p>influyen en el transporte de flujos de lodo y escombros, los cuales generan zonas de peligro, en la subcuenca del río Sicra, Lircay – Huancavelica.</p>	<p>características dinámicas de un dispositivo disipador viscoso a escala reducida”.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gamión (2014), “Modelo de flujo de escombros y lodo aplicando Flo - 2D, caso subcuenca del río Shullcas”. - Banda (2015), “Análisis comparativo de un modelo hidrodinámico unidimensional para flujo newtonianos y no newtonianos del río seco zona urbana Tacna”. - Escusa (2016), “Análisis y modelamiento de flujos de escombros en la zona de Maranura La Convención - Cuzco” 		<p>- Datos de campo</p> <p>Técnicas de procesamiento y análisis de datos:</p> <p>Se utilizó el modelo bidimensional de diferencias finitas Flo - 2D para la generación de mapas de peligro por flujos de lodo y escombros en la subcuenca del río Sicra.</p>
--	--	--	--	---