

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Geológica-Geotecnia

**DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE
E INUNDACIÓN APLICANDO UN MODELO NUMÉRICO
DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA
“MINA KARLA DE TACNA” - TACNA**

TESIS

Presentada por:

Bach. Rosa Elisa Laura Quispe

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO – GEOTÉCNICO

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA-GEOTECNIA

TESIS

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E
INUNDACIÓN APLICANDO UN MODELO NUMÉRICO DE
FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA “MINA
KARLA DE TACNA” - TACNA

Tesis sustentado y aprobado el 19 de agosto del 2019, con el siguiente jurado


PRESIDENTE


Ing. Pío Angel Coila Valdez

MIEMBRO – SECRETARIO


Ing. Hernán Escobar Rivera

MIEMBRO


Ing. Hismael Tiburcio Rodríguez Illachura

ASESOR DE TESIS


Ph.D. Edwin Martin Pino Vargas

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme llegar a este momento. Por cuidarme y estar a mi lado en todos los momentos, por su infinita bondad y amor.

A mi familia, por todo su amor, sacrificio y apoyo que ofrecen por ser mi motivación para vencer todos los obstáculos y seguir adelante, aún en los peores momentos.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi reconocimiento y gratitud a Dios.

A mi asesor Ph.D Edwin Martin Pino Vargas, por su valiosa orientación y colaboración en el presente trabajo de tesis.

A mis padres, que sin su apoyo no hubiese logrado mis metas.

A todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica y Geotecnia de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, por sus enseñanzas, los que contribuyeron a mi formación académica. Un reconocimiento especial al ingeniero Fredy Cabrera Olivera, por sus valiosas sugerencias las que contribuyeron para culminar exitosamente el presente trabajo.

INDICE

CONTENIDO.....	v
RELACIÓN DE FIGURAS	vii
RELACIÓN DE TABLAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES	3
1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	3
1.2. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA	5
1.3. HIPÓTESIS.....	5
1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL.....	5
1.4. FUNDAMENTO Y JUSTIFICACIÓN	6
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES DE FLUJOS LODO Y ESCOMBROS.....	8
2.1.1. DEFINICIÓN DE QUEBRADA	8
2.1.2. CLASIFICACIÓN DE QUEBRADAS.....	9
2.1.3. TIPOS DE FLUJO QUE DISCURREN POR UNA QUEBRADA.....	13
2.1.4. CONCEPTO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS.....	16
2.1.5. CLASIFICACIÓN PARA LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS	17
2.1.6. MODELAMIENTO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS	23
2.1.7. FÓRMULAS EMPÍRICAS.....	30
2.2. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA APLICADA.....	37
2.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS.....	38
2.2.2. TIEMPO DE RETARDO (TLAG)	47
2.2.3. NÚMERO DE CURVA (CN).....	49
2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO-2D	51
2.3.1. ECUACIONES BÁSICAS	52
2.3.2. SOLUCIÓN NUMÉRICA	53
2.3.3. LÓGICA DEL FLO-2D	55
2.3.4. MODELO REOLÓGICO	59

2.3.5. MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS.....	68
2.3.6. CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA DE SEDIMENTOS.....	73
2.4. EVALUACIÓN DE RIESGOS	75
CAPITULO III. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	78
3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y FUENTE DE DATOS	78
3.2. TRABAJO DE CAMPO	79
3.3. ASPECTOS FISIOGRÁFICOS DEL ÁREA	79
3.3.1. GEOLOGÍA LOCAL.....	79
3.3.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL	83
3.3.3. PRINCIPALES ESTRUCTURAS	85
3.3.4. GEODINÁMICA	87
3.3.5. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	89
3.3.6. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	103
CAPITULO IV. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	105
4.1. SIMULACIÓN CON EL MODELO NUMÉRICO HIDRÁULICO	105
4.1.1. INFORMACIÓN BÁSICA.....	105
4.1.2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN CON EL FLO-2D ...	107
4.1.3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS.....	112
4.1.4. SIMULACIÓN DEL FLO-2D EN LA MINA KARLA DE TACNA	114
4.1.5. UTILIZACIÓN DEL POST PROCESOR (MAPPER) EN EL FLO 2D.....	117
CAPÍTULO V. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL FLO-2D Y CALIBRACIÓN CON EVIDENCIAS DE CAMPO	124
5.1. ESCENARIOS SIMULADOS.....	124
5.1.1. TIEMPO DE RETORNO (TR = 50 años)	124
5.1.2. TIEMPO DE RETORNO (TR = 100 años)	132
5.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO CON EVIDENCIAS DEL CAMPO	139
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	143
6.1. CONCLUSIONES	143
6.2. RECOMENDACIONES.....	145
BIBLIOGRAFIA.....	147

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Figura mapa Geopolítico del Perú	4
Figura 2. Mapa de ubicación macro-micro de la zona de estudio.....	4
Figura 3. Esquema de una quebrada típica, Arancibia (2001)	9
Figura 4. Clasificación de flujos según Meunier (1991).....	20
Figura 5. Clasificación de flujos, Coussot (1997).....	22
Figura 6. Perfiles longitudinales del canal para diferentes tipos de flujo, Suárez (2013) .	22
Figura 7. Movimiento idealizado de un flujo viscoso (Johnson y Rodine, 1984). (a)	31
Figura 8. Longitud y perímetro de una cuenca, Horton (1954)	39
Figura 9. Hidrogramas para cuencas con la misma área y diferentes	40
Figura 10. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, Strahler (1964).....	43
Figura 11. Formas de hidrograma en relación a la pendiente, Heras (1972)	45
Figura 12. Esquema del cálculo de la pendiente media de una cuenca, Heras (1972).....	47
Figura 13. Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta, O'Brien (2006)	57
Figura 14. Modelos de deformación del fluido, O'Brien (1993)	64
Figura 15. Viscosidad dinámica de muestras de flujos de lodo versus concentración de sedimentos, O'Brien y Julien (1988)	71
Figura 16. Esfuerzo de cedencia de muestras de flujos de lodo versus concentración de sedimentos, O'Brien y Julien (1988)	72
Figura 17. Formación Hualhuan en el cerro Llaullacane y Chachacumane.....	80
Figura 18. Vista panorámica donde se observa la unidad Yarabamba.....	81
Figura 19. Vista del depósito cuaternario.	82
Figura 20. Curva hipsométrica e histograma de la quebrada	91
Figura 21. Histograma de frecuencias altimétricas de la quebrada.....	92
Figura 22. Imagen satelital de la concesión minera Karla de Tacna.....	93
Figura 23. Mapa de ubicación de estaciones de precipitación	94
Figura 24. Modelo de Cuenca.	98
Figura 25. Método SCS.....	99
Figura 26. Método SCS - Tiempo de retardo.....	100
Figura 27. Cálculo del hidrograma líquido para CN=65, TR= 50 años (Qpico=4 m ³ /s)	100
Figura 28. Cálculo del hidrograma líquido para CN=65, TR= 100 años, (Qpico=6 m ³ /s)	101
Figura 29. Hietograma e Hidrograma líquido Obtenido Con El Hec-Hms para tr=50 años	101
Figura 30. Hietograma e Hidrograma líquido Obtenido Con El Hec-Hms para tr=100 años	102
Figura 31. Diagrama de flujo utilizado en el programa FLO-2D.	108

Figura 32. Ventana principal del FLO 2D	111
Figura 33. Archivo INFLOW.DAT en la ventana principal del FLO 2D.....	111
Figura 34. Creación de grilla e interpolación de alturas en la simulación	115
Figura 35. Introducción de parámetros correspondientes al escenario a simular.....	116
Figura 36. Ventana de FLO 2D, se aprecia en color celeste la simulación del flujo, mientras que en la ventana pequeña cómo se desarrolla el hidrograma.	117
Figura 37. Elevación de la superficie del terreno, según sus elementos de grilla.....	118
Figura 38. .Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla	119
Figura 39. Profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla...	120
Figura 40. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla	121
Figura 41. Máxima velocidad del flujo en el terreno expresado en vectores.....	122
Figura 42. Mapa de Peligros digital, generado con el software FLO-2D, expresado en polígonos.....	123
Figura 43. Elevación del terreno	126
Figura 44. Máxima elevación del agua en el terreno	127
Figura 45. Profundidad máxima de flujo	128
Figura 46. Máxima velocidad del flujo.....	129
Figura 47. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores	130
Figura 48. Mapa de Peligros Digital expresado en grillas	131
Figura 49. Mapa de Peligros Digital expresado en polígonos	132
Figura 50. Elevación del terreno por grilla	133
Figura 51. Máxima elevación del agua en el terreno	134
Figura 52. Profundidad máxima del flujo	135
Figura 53. Máxima velocidad del flujo.....	136
Figura 54. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores	137
Figura 55. Mapa de Peligros Digital, expresado en grillas	138
Figura 56. Mapa de Peligros Digital, expresado en polígonos	139
Figura 57. Marca de agua registrada en la quebrada. Altura aproximada de 0.31 m.....	140
Figura 58. Vista del campamento. Altura aproximada de 0.46 m.....	141
Figura 59. Comparación de resultados con evidencias de campo.....	142

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de coordenadas de la concesión minera Karla de Tacna.....	3
Tabla 2. Clasificación de quebradas por riesgo, Catillo (2006).....	10
Tabla 3. Clasificación por Localización, Castillo (2006)	10
Tabla 4. Clasificación por Pendiente, Castillo (2006)	11
Tabla 5. Clasificación por Área, Castillo (2006)	11
Tabla 6. Clasificación por Naturaleza del Suelo, Castillo (2006).....	11
Tabla 7. Valores de ponderación para los diferentes parámetros, Castillo (2006).....	12
Tabla 8. Clasificación según Costa (1988)	21
Tabla 9. Clasificación según Costa (1988)	21
Tabla 10. Fórmulas empíricas de la velocidad frontal	32
Tabla 11. Fórmulas para el cálculo de los coeficientes de resistencia, Costa (1998)	33
Tabla 12. Grupos de suelos hidrológicos, Chow (1998).....	50
Tabla 13. Números de curva de escorrentía para usos de suelos, Chow (1998)	50
Tabla 14. Parámetros de Resistencia para flujo laminar, Julien & Lan (1991).....	67
Tabla 15. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (limo y arcilla), O'Brien y Julien (1988).....	70
Tabla 16. Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv, O'Brien y Julien (1988).....	70
Tabla 17. Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv, O'Brien (2000) .	74
Tabla 18. Definición de riesgo de inundación, Users Manual (2009).....	76
Tabla 19. Definición de intensidad de crecidas de aguas, Flo-2D Users Manual (2009) .	77
Tabla 20. Definición de intensidad de flujos o crecidas de barro, Flo-2D Users Manual (2009).....	77
Tabla 21. Cuadro 1 Estaciones hidrometeorológicas ámbito de la cuenca, SENAMHI (2011).....	78
Tabla 22. Cuadro resumen de las características morfológicas	92
Tabla 23. Cálculo del Tiempo de retardo (Tr)	95
Tabla 24. Valores de rugosidad del suelo, Flo-2D Users Manual (2009).....	103
Tabla 25. Caudales Máximos.....	106
Tabla 26. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=4 \text{ m}^3/\text{s}$).....	125
Tabla 27. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=6 \text{ m}^3/\text{s}$).....	132

RESUMEN

Este trabajo trata de explicar los criterios de modelación de los flujos de lodo y escombros, utilizando el software de análisis de flujos hiperconcentrados. El modelo numérico empleado es el FLO-2D. 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.

La topografía para la modelación, consiste de una topografía al detalle del cono de deyección y parte de la garganta. El hidrograma líquido calculado por procedimientos normales, es utilizado en la modelación de flujos hiperconcentrados. Finalmente, los parámetros reológicos (viscosidad y esfuerzo de cedencia) son estimados de manera indirecta, comparando muestras de la quebrada a simular con muestras tipo de la literatura. La quebrada simulada en la presente tesis fue la quebrada Lluta que forma parte de la cuenca Caplina distrito Pachía, de la provincia de Tacna.

Con la simulación de la quebrada, el programa FLO-2D nos reporta tirantes y velocidades del flujo de lodo, tanto en el cono de deyección como en la confluencia con el río Caplina. A partir de las salidas del programa se puede elaborar un mapa de amenaza que ayude a mitigar los efectos del huayco en la mina Karla de Tacna

El análisis de la información ha permitido establecer el aporte de sedimentos al torrente, con lo que es posible diseñar una estrategia para incrementar la seguridad aguas abajo de las quebradas en mención.

ABSTRACT

This paper attempts to explain the criteria for modeling mud and debris flows using hyperconcentrated flow analysis software. The numerical model used in the FLO-2D version. The digital topography of the land, the geometry of the channel, the estimated values of the roughness of the channel and the floodplain, the input hydrographs and the rheological properties of the water and sediment mixture are required as input data.

The topography for modeling consists of a detailed topography of the dejection cone and part of the throat. The liquid hydrograph was by normal procedures, it is used in the modeling of hyperconcentrated flows. Finally, the rheological parameters are estimated indirectly, comparing samples from the quebrada to simulate with practices of the literature type. The currently simulated ravine is the ravine that is part of the caplina basin of the district of Pachia, in the province of Tacna.

With the simulation of the stream, the FLO-2D program reports mudflows and velocities in both the dejection cone and in the flow with the caplina river. The outputs of the program can be elaborated in a threat map that helps mitigate the effects of the huayco in the Karla mine in Tacna.

The analysis of the information has allowed to establish the content of the sediments in the torrent, with which it is possible to design a strategy to improve the safety of the waters below the streams in the mention.

INTRODUCCIÓN

El Fenómeno de El Niño (FEN), es uno de los grandes fenómenos naturales que alteran las condiciones climatológicas, provocando temporadas de fuertes lluvias, que desencadenan huaycos e inundaciones. Este fenómeno ocurre esporádicamente, y el resultado de su presencia son pérdidas de viviendas, obras civiles, zonas de cultivo y, sobre todo, pérdidas humanas.

Las quebradas son las formas más comunes y difíciles que debemos enfrentar, y los huaycos es el tipo de flujo característico que causa daño a lo largo de todo su recorrido. Principalmente, en la zona baja de la quebrada, el huayco demuestra su poderío destructivo enterrando estructuras y coches en su camino; cubriendo carreteras, campos, pastos con un gran manto de lodo y piedras de diversos tamaños.

Los pobladores que han vivido y presenciado un flujo de escombros, lo describen como: "Una pared de rocas y piedras de diferentes tamaños envueltas en una mezcla de barro, que aparece repentinamente a la salida de la quebrada, precedido por un ruido estrepitoso; el cauce permanece lleno de un torrente de escombros cargado de barro y cantos rodados rechinando y triturándose conjuntamente".

La presente investigación, trata cómo definir mapas de riesgo de flujos hiperconcentrados que se asemeje a la realidad física e hidrología, que evite zonas vulnerables de inundación en la mina Karla de Tacna, distrito Pachía, provincia de

Tacna, y la influencia de los diferentes parámetros geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos.

El uso de estos Modelos Numéricos Hidráulicos, nos facilita la tarea de cálculo de tan complejas ecuaciones que gobiernan los flujos de escombros, pero requiere de la teoría básica de estos fenómenos, para ingresar con criterio los parámetros necesarios e interpretarlos. Se efectuará la simulación de flujos de lodo y escombros, y definimos las ventajas y limitaciones del modelo numérico empleado.

CAPÍTULO I. ASPECTOS GENERALES

1.1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La mina Karla de Tacna se ubica en la zona sur del Perú, en los distritos de Pachía y Palca, región Tacna, ubicada geográficamente en las coordenadas UTM PSAD 56, Anexo 04.

Tabla 1. Tabla de coordenadas de la concesión minera Karla de Tacna

CONCESION MINERA KARLA DE TACNA		
COORDENADAS UTM PSAD 56		
VERTICE	NORTE	ESTE
1	8032000	384000
2	8029000	384000
3	8029000	381000
4	8030000	381000
5	8030000	382000
6	8031000	382000
7	8031000	383000
8	8032000	383000

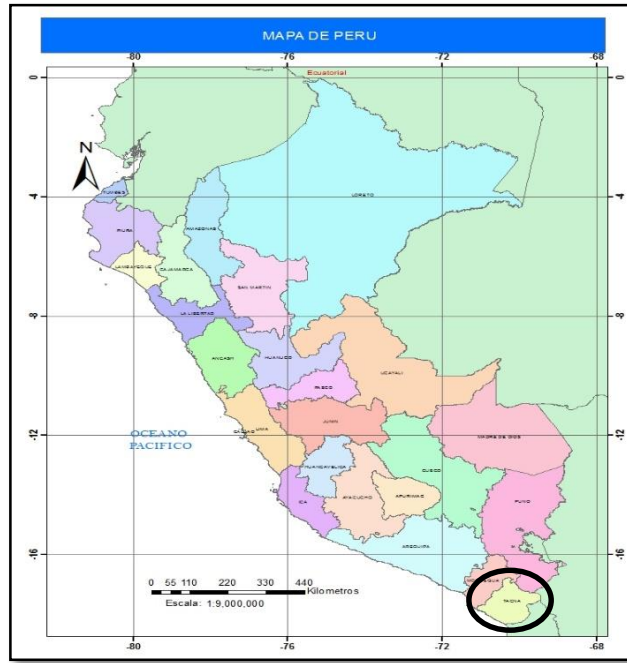


Figura 1. Figura mapa Geopolítico del Perú

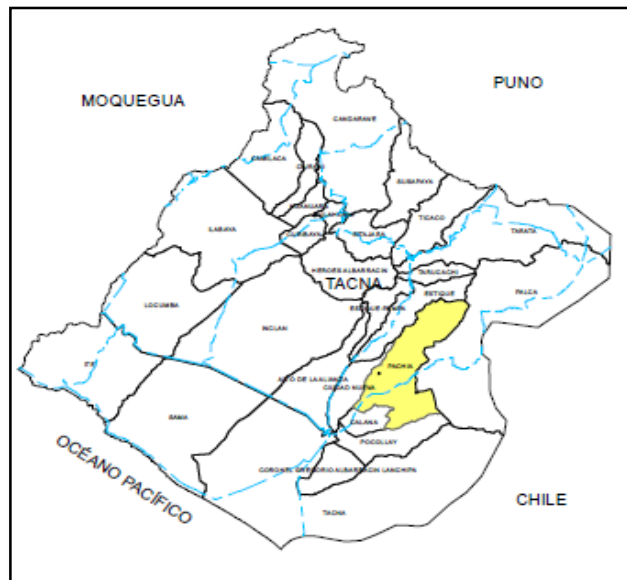


Figura 2. Mapa de ubicación macro-micro de la zona de estudio

1.2. PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

La propuesta de desarrollar este trabajo, surge como respuesta a la necesidad de identificar y predecir el grado de peligrosidad que puede estar expuesta la mina Karla de Tacna, considerando que la zona de explotación y el campamento está emplazado en la unidad geomorfológica flanco disectado de los andes, sabiendo que en esta unidad el relieve topográfico es accidentado y, además, la interacción de los agentes externos que actúan sobre ellas tales como el clima, acción del viento y la precipitación esporádica; al ocurrir un huayco puede ocasionar desastres afectando principalmente la zona de campamento minero y las zonas de explotación.

Los resultados obtenidos en la tesis con el uso del modelo FLO 2D, servirán para mejorar los estudios de seguridad en la mina Karla de Tacna, facilitando la toma de decisiones con respecto a prevención, zonificando las mismas según el grado de peligrosidad que tengan, ya sea de peligro alto, medio o bajo.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

- Se plantea el estudio de los flujos de detritos en la Mina Karla de Tacna a través del modelo FLO 2D, en el cual generamos simulaciones de flujo de detritos para conocer sus características

físicas y mecánicas sobre el terreno, así como para generar mapas de peligros.

- El modelo FLO-2D es muy útil para el manejo y tratamiento de flujos de detritos y así poder manejar situaciones de emergencia, evaluar zonas de evacuación, como mostrar zonas potenciales por donde pasaría el flujo de detritos, inclusive la altura y la velocidad del flujo.

1.4. FUNDAMENTO Y JUSTIFICACIÓN

El análisis de riesgo es muy importante para todo tipo de proyectos en general, su estabilidad como medida de seguridad dependerá de un manejo sofisticado de riesgo.

La ejecución de este trabajo de investigación, es de suma importancia porque beneficiará directamente al desarrollo socioeconómico de la mina ya que puede evitar desastres tanto en el campamento como en zonas de explotación, por otro lado también se evitará la pérdida de vidas humanas y daños materiales ocasionados por eventos extremos de movimientos de masa (huayco), que pueden ocurrir durante las épocas de mayor precipitación.

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Realizar un análisis de riesgo y evaluar el grado de peligrosidad a la que se encuentra expuesta la “Mina Karla de Tacna” por desborde e inundación utilizando el modelo FLO-2D, considerando el comportamiento de la quebrada, ante la ocurrencia de flujos de detritos bajo condiciones de descargas impuestas.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar un modelo FLO-2D y efectuar escenarios de simulación, analizando los condicionantes hidrológicas, geográficos, sedimentos, geológicos, geomorfológicos, climáticos.
- Elaborar los mapas de peligros por desborde e inundación.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE FLUJOS LODO Y ESCOMBROS

2.1.1. DEFINICIÓN DE QUEBRADA

Una quebrada es una forma topográfica de pequeña extensión producto de ciertos agentes geológicos como el viento o la fuerza de la precipitación y escorrentía en una región de terreno erosionable. Los huaycos se pueden producir en quebradas medianas (de 2.5 a 50 km²) y en quebradas grandes (de 50 a 150 km²). Según la diferencia del tamaño de la quebrada y la pendiente se pueden desarrollar diferentes tipos de flujos de escombros, como se verá más adelante (Castillo, 2006).

En una quebrada se reconocen tres zonas específicas (Fig. 3):

- Cuenca de recepción.
- Cauce de transporte.
- Cono de deyección.

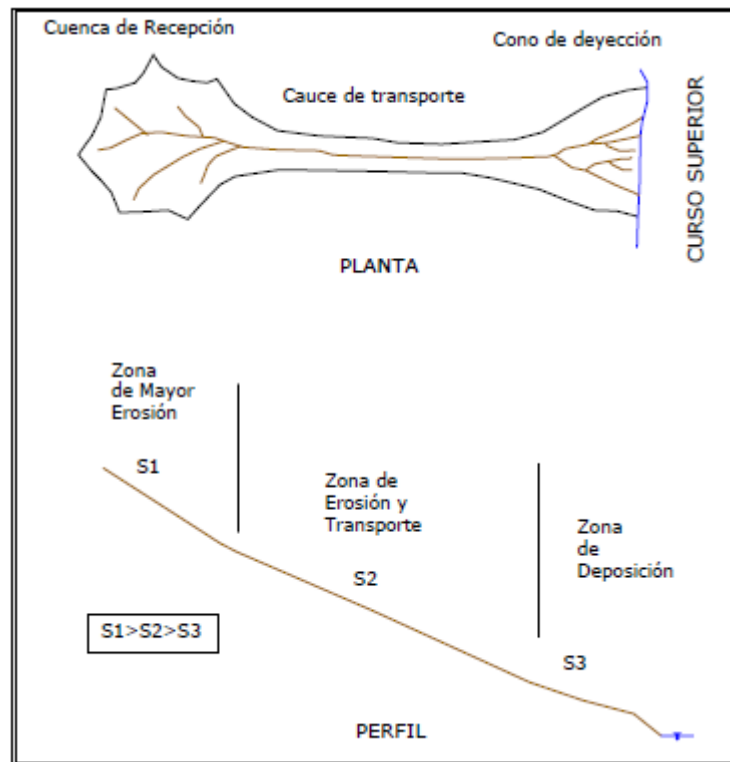


Figura 3. Esquema de una quebrada típica, Arancibia (2001)

2.1.2. CLASIFICACIÓN DE QUEBRADAS

En la tesis “Criterios para el Manejo de Quebradas y su Aplicación en el Diseño de Obras Civiles”, proponen una clasificación de quebradas con respecto al riesgo que presenta frente una obra civil. La presente clasificación se basó en características de diferentes quebradas ubicadas en el país (Valderrama, et al., 2014).

Para la clasificación de quebradas se utilizó la siguiente tabla, basada en valores de ponderación:

Tabla 2. Clasificación de quebradas por riesgo, Catillo (2006)

CLASE	RIESGO	VALORES DE PONDERACIÓN PUNTAJE
TIPO I	Alto	45 – 65
TIPO II	Moderado	36 – 44
TIPO III	Bajo	21 – 35

El procedimiento a seguir es denominar un puntaje a cada parámetro que define una quebrada: Localización, pendiente, área, naturaleza del suelo, tipo de vía; según los cuadros presentados a continuación (Noya 2002).

Clasificación por Localización:

Debemos clasificar la quebrada para una respectiva vertiente según sea su ubicación. Una vez ubicada la vertiente correspondiente, se procede a realizar las combinaciones según la tabla siguiente:

Tabla 3. Clasificación por Localización, Castillo (2006)

Vertiente del Pacífico			Vertiente del Atlántico	Vertiente del Lago Titicaca
Norte b	Centro c	Sur d	a	B
Chala o Costa b			Omagua o Selva Baja - b	
Yunga a			Selva Alta - a	
Quechua a			Yunga Fluvial - b	
Suni b			Quechua - a	
Puna c			Suni - b	Suni
Janca d			Puna - c	Puna
			Janca - d	Janca

A: Si se dan las combinaciones: aa o ab

B: Si se dan las combinaciones: bb o ac

C: Si se dan las combinaciones: cc, ad o bc

D: Si se dan las combinaciones: bd, cd o dd

Clasificación por Pendiente:

Tabla 4. Clasificación por Pendiente, Castillo (2006)

A: Fuerte	S < 10%
B: Media	10% < S < 40%
C: Suave	40% < S

Clasificación por Área:

Tabla 5. Clasificación por Área, Castillo (2006)

A: Grande	$50 \text{ Km}^2 < A < 150 \text{ Km}^2$
B: Mediana	$2.5 \text{ Km}^2 < A < 50 \text{ Km}^2$
C: Pequeña	$A < 2.5 \text{ Km}^2$

Clasificación por Naturaleza del Suelo:

Investigadores Canadienses reportan las siguientes características de acuerdo al grado potencial de contribución de material sólido.

Tabla 6. Clasificación por Naturaleza del Suelo, Castillo (2006)

A: Alta contribución	Material de laderas: suelos no cohesivos, sueltos, áreas de avalancha, con alturas > 5 m y con Sladeras > 35°
B: Moderada contribución	Material de laderas en suelos cohesivos y densos con alturas > 5 m. En suelos no cohesivos y sueltos < 5m y con Sladeras entre 15° y 45°
C: Baja contribución	Lechos de roca sana, y o fracturada, material de las riberas denso con alturas < 5 m y con Sladeras < 15°

Una vez denominado la letra A, B, C o D para los diferentes parámetros, obtenemos sus puntajes de la siguiente tabla.

Tabla 7. Valores de ponderación para los diferentes parámetros, Castillo (2006)

LOCALIZACIÓN	A 5	B 4	C 3	D 2
PENDIENTE	A 4	B 3	C 2	
ÁREA	A 3	B 2	C 1	
SUELO	A 3	B 2	C 1	
TIPO DE VÍA	A 50	B 30	C 15	
	Duales y 1ra	2da y 3ra	Trochas	
	Clase	Clase		

Finalmente, obtenemos la suma de los valores de ponderación para los diferentes parámetros, clasificando a la quebrada según la Tabla 2 (Tipo I, II o III).

Aplicando la metodología expuesta para la quebrada de la Concesión minera Karla de Tacna tenemos:

- Nombre: Quebrada de la Concesión minera Karla de Tacna
- Ubicación: Distrito de Pachía, provincia Tacna y departamento Tacna
- Área de drenaje: 0.278 Km²
- Pendiente promedio: 31.06%
- Tipo de Vía: trocha
- Vertiente del Pacífico-Centro: d

- Yunga: a
- Lo que nos da localización: C

De la tabla 4 al cuadro 6 se obtienen los otros valores. Una vez reconocida la letra (A, B, C) se le asigna su puntaje correspondiente por medio de la tabla 7:

- Localización: $c = 3$
- Pendiente: $b = 3$
- Área: $C=1$
- Naturaleza del suelo: $b = 2$
- Tipo de infraestructura: $c=30$
- Total: 39

Para este puntaje, según la tabla 2, la quebrada de la concesión minera Karla de Tacna se considera una quebrada moderada por riesgo, del Tipo II.

2.1.3. TIPOS DE FLUJO QUE DISCURREN POR UNA QUEBRADA

a. Avenidas de Agua

Flujos con una carga normal de transporte de sedimentos, que discurre por el cauce de una quebrada en régimen predominantemente turbulento. La cantidad de sedimento en suspensión es insuficiente

para afectar el comportamiento del agua. Las propiedades del fluido Newtoniano gobiernan a éste tipo de flujo (Felices, 2007).

b. Flujos de lodo

Consisten de altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas). De acuerdo a experimentos de Chow (1998), un fluido se convierte en una mezcla lechosa a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m^3 . A medida que la concentración de finos aumenta, la estructura de los sedimentos se flocula formándose una especie de cohesión de mezcla suelo-agua. Los flujos de lodo son distinguidos por la presencia de al menos 50% de arena, sedimento y partículas del tamaño de la arcilla. Los flujos viscosos se caracterizan por pulsos intermitentes. La deposición final del flujo viscoso mantiene la estructura dinámica de su movimiento creando filas de islas o dunas que son paralelas a la dirección del flujo, las cuales pueden tener forma de lengua. La velocidad de deposición es muy pequeña (Varnes, 1998).

c. Flujos Hiperconcentrados

Está formado por una mezcla de partículas gruesas y agua. Predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos rodados y bloques) por lo tanto la mezcla no tiene cohesión (Vivas, 2008).

Se considera un flujo como hiperconcentrado si la concentración de sedimentos varía entre 20% y 60% en volumen, valor que corresponde a un peso específico de 2.0 ton/m³ de la mezcla aproximadamente. Al disminuir la velocidad, las partículas se van sedimentando; primero las más gruesas y luego las más finas formando un depósito clasificado de partícula.

d. Flujos de Detritos

En los flujos de detritos los sedimentos controlan totalmente el flujo. Se puede relacionar generalmente con “flujo turbulento de granos”. El mecanismo de movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

Los flujos son no-viscosos y son generalmente flujos turbulentos de dos fases.

La fase líquida es un “slurry” consistente en agua y partículas finas y la base propiamente sólida son las partículas gruesas. Aunque los flujos de detritos contienen partículas más gruesas, mayores

concentraciones, mayores pesos específicos y menores cantidades de agua, la mecánica en algunos aspectos es similar a los de los flujos hiperconcentrados. Cuando el cambio en el ancho del cauce es muy fuerte, o se presenta una disminución fuerte de la pendiente del cauce, la velocidad disminuye abruptamente y se deposita la mayoría del material sólido, formando abanicos o barras de grandes bloques (James, 2008).

2.1.4. CONCEPTO DE FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS.

Según Mainali & Rajaratnam (1999), los flujos de lodo y escombros son 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.

Según Takahashi (1980), los flujos de lodo y escombros son flujos antiguos conformados 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.

Según Suarez (2008), los flujos de lodo y escombros ocurren cuando masas de sedimento pobremente graduadas, agitadas y saturadas con agua, caen precipitadamente por efecto de la atracción de la gravedad.

Existen diversas definiciones sobre flujos de escombros, pero básicamente se trata de una mezcla de agua con sedimento que transita hacia aguas abajo, sobre una pendiente pronunciada y que aumenta su volumen debido a rocas, arbustos y troncos que encuentra en su camino.

2.1.5. CLASIFICACIÓN PARA LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS

Los huaycos no pueden ser tratados normalmente dentro del campo de la hidráulica fluvial. Sus características marcadas grandemente por su alta concentración la hacen digna de un estudio especial, Valderrama (2012).

Las diferencias de la hidráulica torrencial respecto a la hidráulica fluvial comienzan por el comportamiento del fluido. La viscosidad dinámica μ de los flujos torrenciales puede ser varias órdenes de magnitud mayor que la del agua pura.

La viscosidad aparente del pico de una avenida máxima del flujo de escombros llega a alcanzar 3×10^6 veces la viscosidad del agua. Si el material dominante es fino (arcillas) un mecanismo importante es la floculación de las partículas, lo que explica que exista un umbral de tensión que debe superarse para que empiece a fluir. Si el material dominante es granular, el flujo puede ser turbulento.

Una clasificación para flujos de escombros se basa en el tipo del mecanismo de material, el movimiento, y la concentración del sedimento. Esta clasificación se enfoca principalmente en la banda de flujos de gravedad (mezclas de sedimento y agua) que fluyen a diversas tasas de concentraciones. Una de estas clasificaciones fue dada por Costa, (1987).

Los flujos de agua-sedimento pueden ser agrupados dentro de 3 bandas principales:

- **Flujos de corriente ordinario:** Los flujos de corriente son flujos de agua y sedimento con bajas concentraciones de sedimento; el flujo se comporta esencialmente como un fluido Newtoniano. Debido a que las concentraciones del sedimento aumentan, la interacción entre partículas aumenta. Si las partículas de arcilla están presentes en el flujo, ellos empiezan a formar aglomeraciones debido a la presencia de fuerzas electroquímicas.

- **Flujos Hiperconcentrados:** Del resultado de un estudio de flujos de corriente concentrados, Jakob & Hungr (2005) definieron Hiperconcentración como la concentración mayor al 40% de sedimento por peso. Ellos sugirieron un límite superior de 80%, clasifican a los flujos de escombros (debris flows) como un tipo de flujo hiperconcentrado.

-Flujos Granulares: Esta condición describe al flujo con altas concentraciones de sólidos. Se describe 3 clases de flujos granulares:

- a) Cusi estático
- b) Macro viscoso
- c) Inercia granular

Esta clasificación es una extensión de la clasificación antigua dada por Bagnold (2007), que definió un régimen llamado macroviscoso donde la concentración de partículas y las tasas de deformación son pequeñas y el fluido intersticial juega un rol importante para determinar la naturaleza viscosa del flujo.

Díez et al. (2008), realizan otra clasificación para el caso de flujos con una alta concentración y con pendientes que van desde los 30 a los 50% marcando el inicio de la formación de huaycos. La hidráulica fluvial como disciplina caería dentro del rango de pendientes naturales menores que el 2%. Importante y práctico es saber que las fórmulas clásicas de hidráulica fluvial podrían ser usadas con buena aproximación hasta una pendiente natural que van desde los 7% al 10% (Fig 4).

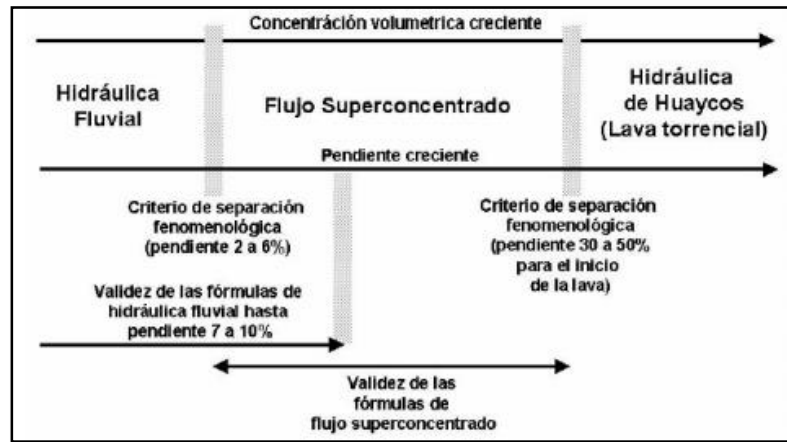


Figura 4. Clasificación de flujos según Meunier (1991)

Costa (1998), al igual que Meunier diferencia 3 tipos de flujo: avenidas de agua (water flood), flujos hiperconcentrados y flujos de detritos (debris flow).

La clasificación de Costa (1998) es sumamente práctica para identificar estos tipos de flujo tomando en cuenta la concentración. Clasifica también los flujos desde el punto de vista reológico. Las fuerzas internas del flujo, la granulometría y el comportamiento laminar o turbulento llega a ser tomado en cuenta también para caracterizar los diferentes tipos de flujo (véase Tablas 8 y 9), los huaycos tienen un comportamiento laminar.

Tabla 8. Clasificación según Costa (1988)

Flujo	Concentración	Densidad de sólidos	τ_y (dm/cm ²)	Tipo de fluido
Avenida de Agua	1-40% en peso	1.01-1.33	0-100	Newtoniano
	0.4-20% en volumen			
Flujo hiperconcentrado	40-70% en peso	1.33-1.8	100-400	No Newtoniano
	20-47% en volumen			
Flujo de escombros	70-90% en peso	1.8-2.3	>400	Viscoplástico
	47-775% en volumen			

Tabla 9. Clasificación según Costa (1988)

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

Coussot (1997) clasifica los huaycos utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido (Fig. 5). El flujo torrencial, flujo hiperconcentrado, así como también los deslizamientos de suelos llegan a ser contemplados dentro de ésta clasificación de flujos.

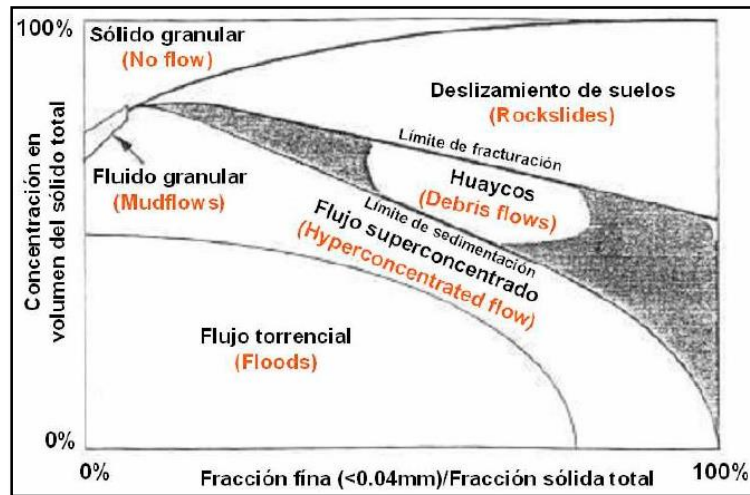


Figura 5. Clasificación de flujos, Coussot (1997)

En la Figura 6. Se muestra el perfil longitudinal de los canales de algunas avalanchas y se puede observar el 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.

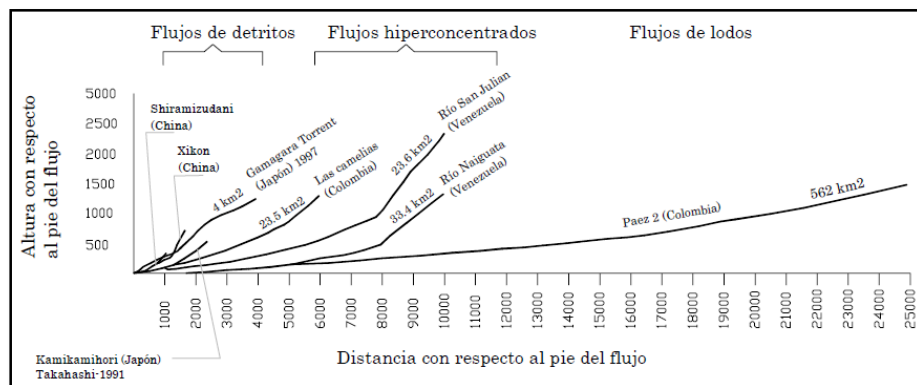


Figura 6. Perfiles longitudinales del canal para diferentes tipos de flujo, Suárez (2013)

2.1.6. MODELAMIENTO DE FLUJOS DE LODO Y 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. 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 (Johnson & Rodine, 1984).

De acuerdo a las características de la mezcla, pendiente y forma del canal se genera un fluido con diferentes características. El modelo de fluido involucra la dinámica interna de la mezcla y el tipo de flujo los mecanismos generales del movimiento (Paucarmayta, 2011).

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

1. 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.
2. 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.

Modelo viscoso de coulomb (1970)

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi + \mu \frac{\delta u}{\delta y} \quad (1)$$

μ = viscosidad

$\delta u / \delta y$ = tasa de deformación

Este es uno de los modelos más antiguos sobre flujos de escombros.

Modelos de fluido Bingham y Pseudoplásticos (1987)

Este modelo es muy bien relacionado con el flujo de lodo debido a la presencia de granulometría fina. El modelo de fluido plástico es caracterizado por una relación lineal entre los esfuerzos cortantes y tasa de deformación. El esfuerzo de cedencia τ_y y la viscosidad μ son los dos parámetros.

$$\tau = \tau_y + \mu \frac{\delta u}{\delta y} \quad (2)$$

Este modelo ha sido frecuentemente usado en el pasado en flujos de lodo y flujos hiperconcentrados. 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. Johnson (1970), usó este modelo para describir el flujo de escombros permanentes en un canal circular.

Los dos parámetros en el modelo de Bingham son determinados de experimentos. Estos dependen de la concentración de sedimentos y del tamaño de la partícula.

El modelo que no generó mucho entusiasmo fue el modelo pseudoplástico o el modelo de la ley de potencia.

$$\tau = \mu \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^n \quad (3)$$

μ = viscosidad aparente

n = índice del comportamiento del flujo, en este caso, es menor que 1.

Esfuerzo cortante turbulento vs. Esfuerzo de Bagnold

El modelo de Bagnold y los modelos de esfuerzos cortantes turbulentos son basados sobre ideas similares a la teoría cinética de gases. Ambos usan esta analogía para describir el cortante entre dos capas de fluido en movimiento. El modelo de fluido dilatante de Bagnold es escrito como:

$$\tau_s = a_i \rho_s \lambda^2 D^2 \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 \text{sen} \phi_d \quad (4)$$

Es un modelo de fluido no-Newtoniano. El modelo de esfuerzo cortante turbulento es dado por:

$$\tau_t = \rho k_v^2 y^2 \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 \quad (5)$$

τ_t =Esfuerzo cortante

ρ =Densidad del fluido

k_v =Constante de von Karman

Y =Distancia desde el fondo

Esto nos da una clara indicación de la naturaleza no-Newtoniana de los flujos turbulentos. En el caso de mezclas de sedimentos diluidas k_v es una función de la concentración de sedimentos C_v . En flujos de altas concentraciones λ es también una función de C_v . En transporte de sedimentos la turbulencia es responsable de la suspensión de las partículas de sedimento. Similarmente, en flujos de escombros la presión dispersiva es principalmente responsable de la dispersión de las partículas del sedimento.

Modelo cuadrático de O'Brien y Julien

Un modelo cuadrático reológico fue presentado por O'Brien et al., (1993).

$$\boldsymbol{\tau} = \tau_y + \mu \frac{\delta u}{\delta y} + c_1 \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 \quad (6)$$

τ_y =Esfuerzo de cedencia

μ =Viscosidad dinámica

c_1 =Parámetro turbulento-dispersivo

Modelo de fluido Dilatante

Los antiguos intereses de Bagnold estaban sobre la mecánica del transporte de la carga de lecho de sedimento. Este interés motivo a Bagnold a realizar un experimento clásico con esferas uniformes de 0.13 cm. suspendidas aleatoriamente en agua y una mezcla de glicerina y alcohol (fluido Newtoniano) y llevadas a un cilindro rotatorio, Bagnold (2007). Un material flexible fue usado para formar la pared interior del cilindro. De esta manera, Bagnold fue capaz de medir la presión normal en la dirección radial así como el torque. Este experimento envuelve cortante a varias concentraciones de granos en el cilindro rotatorio.

Bagnold definió los siguientes tres regímenes del comportamiento del flujo basado sobre el grado de tasa cortante:

- ✓ Macroviscoso
- ✓ Transicional
- ✓ Inercia del grano

La variación entre los esfuerzos inerciales y los esfuerzos viscosos fue definido por un grupo N adimensional donde:

$$N = \frac{\lambda^2 \rho_s D^2}{\mu} \frac{\delta u}{\delta y} \quad (7)$$

ρ_s = Densidad de masa de las partículas

μ = Viscosidad del fluido intersticial

D = Diámetro de la partícula

Λ = Concentración lineal de las partículas

Macroviscoso y régimen Inercia del grano. Estos son definidos basados en el grado relativo de la tasa de corte en el flujo. En términos de N, a mayor N mayor será la importancia de la inercia, por la tanto, hablamos de un régimen de inercia del grano. Cuando N es bajo, hay mayores efectos viscosos que efectos inerciales y hablamos de un régimen macroviscoso (Fabian, 2014).

En el régimen macroviscoso ($N < 40$) la viscosidad es dominante y los esfuerzos cortantes y normales son funciones lineales de la gradiente de velocidad $\delta u / \delta y$.

En el régimen de inercia del grano ($N > 450$) el fluido intersticial tiene menos influencia y los efectos principales son debidos a la interacción grano a grano. Bagnold atribuyó el mecanismo primario a la transferencia de momentum por la colisión de una capa de partículas moviéndose sobre otra capa de partículas.

De experimentos, Bagnold encontró que el esfuerzo dispersivo normal se relaciona con el esfuerzo cortante del grano por.

$$\tau_g = P \tan \phi_d \quad \text{o} \quad (8)$$

$$\tau_s = a_i \rho_s \lambda f(\lambda) D^2 \left(\frac{\delta u}{\delta y} \right)^2 \text{sen} \phi_d \quad (9)$$

a_i = constante determinado de experimentos par el régimen de inercia del grano (Bagnold dio $a_i = 0.042$)

ρ_s = Densidad de las partículas

$f(\lambda)$ = función incógnita de λ

Los esfuerzos cortantes del grano es una adición de otros esfuerzos del fluido como los esfuerzos turbulentos. Sin embargo, a altas concentraciones, Bagnold argumentó que la turbulencia era amortiguada. La región entre las regiones macroviscoso y cuasi-estático ha sido definido por Bagnold como la transición donde $40 < N < 450$.

2.1.7. FÓRMULAS EMPÍRICAS

De acuerdo a algunas investigaciones, según observaciones de campo y pruebas analíticas, se han desarrollado fórmulas empíricas y semi-empíricas que nos ayudan a conocer los parámetros característicos de un flujo de escombros.

A continuación, citaremos las fórmulas más utilizadas en el análisis de flujos de escombros para ciertas condiciones del tipo del flujo.

Velocidad del flujo viscoso en curvas

En las curvas la superficie del flujo se levanta en forma importante debido a la fuerza centrífuga, la cual se convierte en fuerza hacia arriba, en un proceso de colisión de partículas (Fig. 7). Esta sobreelevación en las curvas es utilizada como parámetro para calcular la velocidad del flujo. Esta fórmula es aplicada para el caso de flujos de lodo con gran

cantidad de material fino. La velocidad promedio del flujo se puede obtener de la siguiente manera, (Johnson & Rodine, 1984):

$$\bar{w} = (g\psi g\psi \cos\delta \tan\beta)^{1/2} \quad (10)$$

\bar{w} = velocidad promedio

Ψ = Radio de la curva

δ = Pendiente del canal

β = Sobreinclinación del flujo en curva

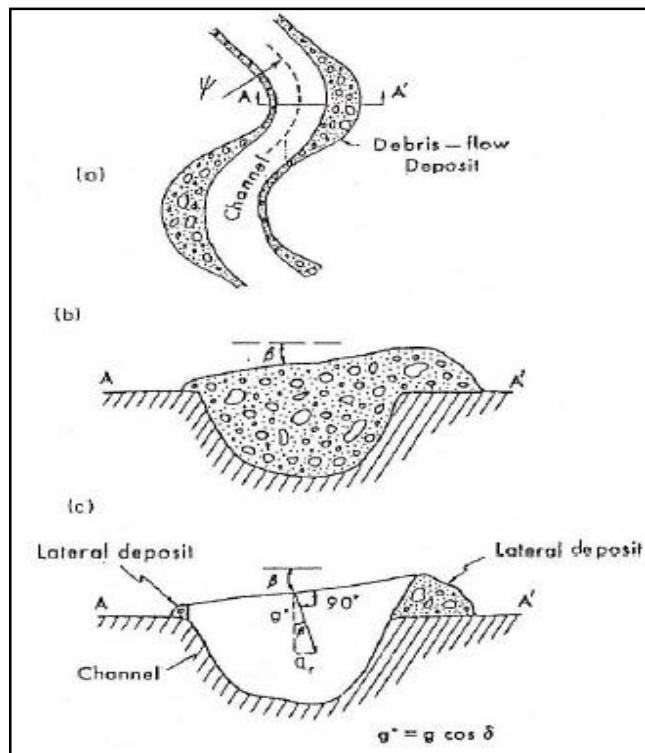


Figura 7. Movimiento idealizado de un flujo viscoso (Johnson y Rodine, 1984). (a) planta, (b) y (c) sobreelevación durante y después.

Velocidad de la parte frontal de la onda

De la literatura se ha podido dar relación a una serie de fórmulas concernientes a la velocidad máxima del frente del flujo de escombros. Estas fórmulas están basadas en estudios de campo de los mismos autores:

Tabla 10. Fórmulas empíricas de la velocidad frontal

Tipo de flujo	Formulas	Notas	Referencias
Flujo laminar newtoniano	$V = \left(\frac{1}{3}\right) \rho g H^2 S / \mu$	Canal rectangular	
Dilatante	$V = \left(\frac{2}{3}\right) \xi H^{1.5} S^{0.5}$	Canal rectangular ancho	Barnold, 1954
Flujo turbulento newtoniano	$V = \left(\frac{1}{n}\right) H^{2/3} S^{1/2}$	Ecuación de Manning	PWRI, 1988
	$V = C H^{1/2} S^{1/2}$	Ecuación de Chezy	Rickenmann, 1990

En esta tabla, V(m/s) es la velocidad media de la sección transversal, H(m) es el tirante del flujo máximo, S es la pendiente del lecho del canal, ρ (kg/m³) es la densidad de la mezcla agua-sedimento, ξ (1/sm^{1/2}) es un coeficiente que depende del tamaño del grano y su concentración, n (s/m^{1/3}) es el coeficiente de Manning, C(m^{1/2}/S) es el coeficiente de

Chezy. Los coeficientes de resistencia al flujo o parámetros del material pueden ser calculados como una función de la descarga pico:

Tabla 11. Fórmulas para el cálculo de los coeficientes de resistencia, Costa (1998)

Tipo de flujo	Formulas
Flujo laminar newtoniano	$\mu = 20Q^{3/5}$
Dilatante	$\xi = 150Q^{-2/5}$
Flujo turbulento newtoniano: Manning Strickler	$n = 0.077Q^{1/15}$
Flujo laminar newtoniano: Chezy Equation	$C = 22$

Según reportes de Costa (1998), otra relación para el cálculo de la velocidad del flujo de escombros en función del caudal (Q) y la pendiente (S) es:

$$V = 2.1Q^{0.33}S^{0.33} \quad (11)$$

Estimación de los caudales máximos

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

La metodología usada por JICA se basa los desarrollos de Takahashi. Según Takahashi (1980) el volumen de lodo y piedras es igual a:

$$V_s = 1000R_t A F_r \left(\frac{C_d}{C^* - C_d} \right) \quad (12)$$

V_s =Volumen de detritos en m^3

V_a =Volumen de agua en m^3

R_t = Precipitación total durante la descarga de flujo de lodo y piedra en mm

A = Área de la cuenca en km^2

F_r = Coeficiente de escorrentía

C_d = Densidad volumétrica del flujo de lodo y piedras

C^* = Densidad volumétrica de sedimentos del lecho

C_d Se estima según la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \Phi - \tan \theta)} \quad (13)$$

ρ = Densidad de fluidos de detritos (t/m^3)

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

θ = ángulo de talud

Φ = ángulo de fricción interna

De acuerdo a la ecuación, la relación $\frac{V_s}{V_a}$ se puede expresar como,

$$\frac{V_s}{V_a} \frac{C_d}{C^* - C_d} \quad (14)$$

Las otras ecuaciones aplicadas siguiendo el método de Takahashi, son las que permiten estimar el caudal máximo de lodos y piedras, y caudal máximo de material fino; como una función del caudal líquido.

$$Q_s = \left(\frac{C^*}{C^* - C_d} \right) Q_p \quad (15)$$

$$Q_f = \left(\frac{\rho - 1}{\rho - \sigma} \right) Q_p \quad (16)$$

$$Q_t = Q_s + Q_f \quad (17)$$

Q_t : Caudal total (máximo) del flujo de detritos en m³/s

Q_s : Caudal de lodos y piedras (máximo) en m³/s

Q_f : Caudal del material fino (máximo) en m³/s

Q_p : Caudal líquido (máximo) en m³/s

Es importante observar que el coeficiente que multiplica Q_p en la ecuación (15) es igual a:

$$\frac{C^*}{C^* - C_d} = 1 + \frac{C_d}{C^* - C_d} \quad (18)$$

Por lo tanto, según la ecuación (14), la expresión (18) puede escribirse como:

$$\frac{c^*}{c^*-c_d} = 1 + \frac{V_s}{V_a} \quad (19)$$

y sustituyendo (19) y (16) en (17), se obtiene

$$Q_t = \left(\left(1 + \frac{V_s}{V_a} \right) + \frac{(\rho-1)}{(\sigma-\rho)} \right) * Q_p \quad (20)$$

V_s (m³) = Volumen de detritos

V_a (m³) = Volumen del agua

ρ (t/m³) = Densidad del fluido de detritos

σ (t/m³) = Densidad del sedimento

Q_p (m³/s) = Caudal líquido

Otra metodología empleada es la propuesta por O'Brien (2000) donde el hidrograma de flujo de detritos se estima a partir del hidrograma de flujo de agua multiplicado por un factor que es una función de la concentración volumétrica de detritos. La ecuación utilizada por O'Brien es la siguiente:

$$Q_t = BFxQ_t \quad (21)$$

$$BF = \frac{1}{1-C_v} \quad (22)$$

Q_t = Caudal total de flujo de detritos (m^3/s)

Q_l = Caudal líquido (m^3/s)

BF= Factor (Bulking Factor)

C_v : Concentración volumétrica de detritus.

Según la referencia de O'Brien (2000), para flujos de detritos el valor de

C_v varía entre 0.20 (para flujos bajos) y 0.45 (para flujos altos).

2.2. CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA APLICADA

Para la simulación de los flujos de lodo y escombros es necesario conocer las características hidrológicas de la cuenca y su influencia sobre el hidrograma líquido. Un hidrograma de caudal es un 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 y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la esorrentía de una cuenca de drenaje particular” Chow (1959). Para la estimación del hidrograma, es necesario conocer las características geomorfológicas de la cuenca, el tiempo de retardo, el número de curva (CN) y la precipitación máxima de 24 horas.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS

Área de la Cuenca

Está definida como la proyección horizontal de toda el área de drenaje.

El área de una cuenca es la característica geomorfológica más importante para el diseño. Su importancia radica en las siguientes razones:

- Este valor se utiliza para muchos cálculos en varios modelos hidrológicos.
- Para una misma región hidrológica o regiones similares, se puede decir que a mayor área, mayor caudal medio.
- El área de la cuenca se relaciona en forma inversa con la relación entre caudales extremos.

Estadísticamente se ha demostrado que el factor "área" es el más importante en las relaciones entre escorrentía y las características de una cuenca. Esto se puede afirmar por el alto valor de los coeficientes de correlación cuando se grafica escorrentía respecto al área. Pero hay otros parámetros que también tienen su influencia en la escorrentía como la pendiente del canal, la pendiente de la cuenca, la vegetación y la densidad de drenaje.

- Longitud, Perímetro y Ancho

La longitud “L” de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal entre un punto aguas abajo (punto más bajo del eje de la quebrada) y otro punto aguas arriba donde el eje de la quebrada principal corte la línea de contorno de la cuenca (Fig. 8).

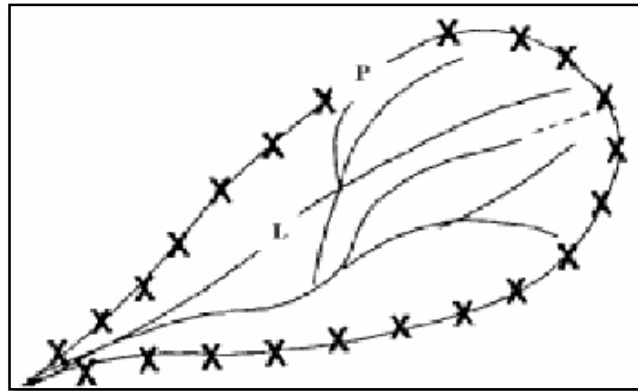


Figura 8. Longitud y perímetro de una cuenca, Horton (1954)

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divisoria de la quebrada es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. Usualmente, este parámetro físico es simbolizado por la mayúscula P.

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

$$W = \frac{A}{L} \tag{23}$$

- Parámetros de Forma de la Cuenca.

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar estas características por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento (hidrogramas). En la figura 9, vemos varias hidrogramas para cuencas con la misma área y diferentes formas ante una lámina precipitada igual.

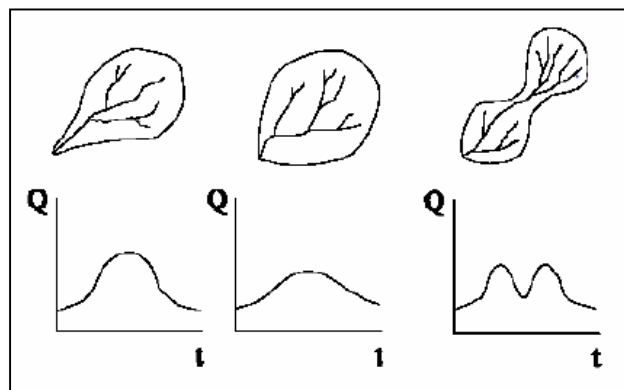


Figura 9. Hidrogramas para cuencas con la misma área y diferentes formas ante una lámina precipitada igual, Horton (1945)

Parece claro que existe una fuerte componente probabilística en la determinación de una cuenca mediante sus parámetros y las características de la red de drenaje. Por esta razón, se han buscado relaciones de similitud geométrica entre las características medias de una cuenca y de su red de canales con esas de otras cuencas. Los principales factores de forma son:

- Factor de Forma de Horton

La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por lo que se han hecho numerosos esfuerzos para tratar de cuantificar este efecto por medio de un valor numérico. Horton sugirió un factor adimensional de forma R_f , como índice de forma de una cuenca.

$$R_f = \frac{A}{L^2} \quad (24)$$

Donde A es el área de la cuenca y L es la longitud de la misma, medida desde la salida hasta el límite de la quebrada, cerca de la cabecera del cauce más largo, a lo largo de una línea recta. Este índice y su recíproco han sido usados como indicadores de la forma del hidrograma unitario.

- Coeficiente de Compacidad o índice de Gravelius

Este está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$I_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (25)$$

Donde R es el radio del círculo equivalente en área a la cuenca. Por la forma como fue definido: $K \geq 1$. Obviamente para el caso $K = 1$, obtenemos una cuenca circular.

- Razón por Circularidad

Este parámetro relaciona el área de la cuenca con un área de un círculo, cuyo perímetro es igual al perímetro de la cuenca.

$$R_{ci} = \frac{4ILA}{p^2} \quad (26)$$

La importancia de estos parámetros relacionados a la cuenca, nos dan una idea como primera aproximación de la tendencia del hidrograma y del caudal máximo.

- Parámetros relativos al relieve

La curva hipsométrica: Proporciona una información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Dicha curva presenta, en ordenadas, las distintas cotas de altura de la cuenca, y en abscisas la superficie de la cuenca que se halla por encima de dichas cotas, en km² o en porcentaje de la superficie total de la cuenca.

De esta curva se puede extraer una importante relación, y es la “Relación Hipsométrica”:

$$R_h = \frac{S_s}{S_i} \quad (27)$$

Donde S_s y S_i son, respectivamente, las áreas sobre y bajo la curva hipsométrica.

Según Strahler (1974), la importancia de esta relación reside 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 10 muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos.

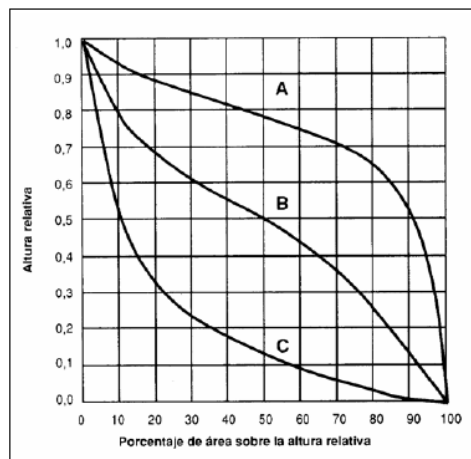


Figura 10. Curvas hipsométricas características del ciclo de erosión, Strahler (1964)

La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos:

- Curva A: Fase de juventud
- Curva B: Fase de madurez

- Curva C: Fase de vejez

Histograma de frecuencias altimétricas: Es la representación de la superficie en km^2 o en porcentaje, comprendida entre dos niveles, siendo la marca de clase el promedio de las alturas. De esta forma, con diferentes niveles se puede formar el histograma. Este diagrama de barras puede ser obtenido de los mismos datos de la curva hipsométrica. Realmente contiene la misma información de ésta pero con una representación diferente, dándonos una idea probabilística de la variación de la altura en la cuenca

Altura y Elevación promedio de la cuenca: La elevación promedio en una cuenca tiene especial interés en zonas montañosas pues nos puede dar una idea de la climatología de la región, basándonos en un patrón general climático de la zona. La elevación promedio está referida al nivel del mar. Este valor puede ser encontrado usando la curva hipsométrica o el histograma de frecuencias altimétricas. La estimación por una media aritmética ponderada en el caso del histograma, o de la curva hipsométrica calculando el área bajo la curva y dividiéndola por el área total.

La altura media, H , es la elevación promedio referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca.

Perfil altimétrico del cauce principal y su pendiente promedio: El perfil altimétrico es simplemente el gráfico de altura en función de la longitud a lo largo del eje principal de la quebrada.

Con base en la forma del perfil altimétrico del cauce se puede inferir rasgos generales de la respuesta hidrológica de la cuenca en su expresión del hidrograma, o sea, la variación del caudal con el tiempo. También los perfiles se usan para estudios de: Prefactibilidad de proyectos hidroeléctricos, producción de sedimentos, ubicación de posibles sitios susceptibles de avalanchas, etc. Generalmente cuencas con pendientes altas en el cauce principal tienden a tener hidrogramas más picudas y más cortas que cuencas con pendientes menores (Fig. 11).

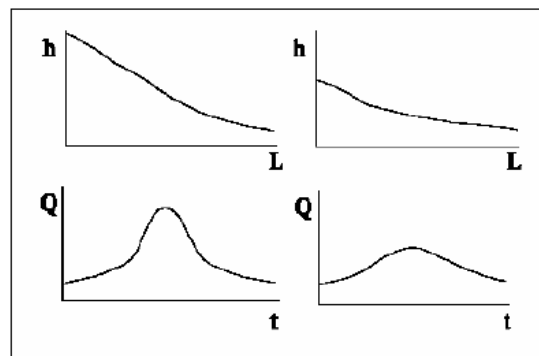


Figura 11. Formas de hidrograma en relación a la pendiente, Heras (1972)

Este parámetro es de importancia pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre y erosión sobre la cuenca.

Según Heras (1972), se entiende por pendiente media de una cuenca a la media ponderada de todas las pendientes correspondientes a áreas elementales en las que pudiéramos considerar constante la máxima pendiente.

El método más antiguo para obtener la pendiente media consiste en ponderar las pendientes medias de superficies o bandas de terreno en las que queda dividida la cuenca por las curvas de nivel. Resulta finalmente la expresión:

$$S = \frac{\Delta h L_{cn}}{A} \quad (28)$$

Donde S es la pendiente media de la cuenca, Δh la equidistancia entre curvas de nivel, L_{cn} la longitud de todas las curvas de nivel y A el área total de la cuenca.

También se puede obtener la pendiente media de una cuenca como el cociente entre la diferencia de elevación máxima medida entre el punto más alto del límite de la cuenca y la desembocadura del río principal, y la mitad del perímetro de la cuenca (Llamas, 1993).

$$S = \frac{2H}{P} \quad (29)$$

Donde H es la citada diferencia de cota y P el perímetro de la cuenca.

La pendiente media de una cuenca puede asimilarse a la pendiente de la recta trazada entre los puntos que se encuentran al 85 % y al 10 % de distancia a partir del punto más alejado del punto de desagüe siguiendo el curso principal.

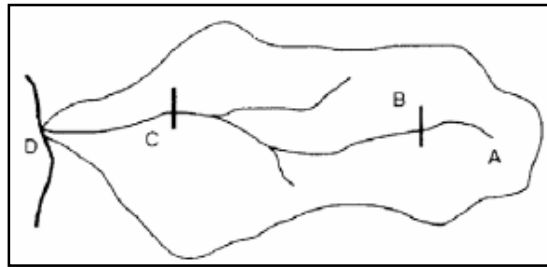


Figura 12. Esquema del cálculo de la pendiente media de una cuenca, Heras (1972)

Por consiguiente, la pendiente media de la cuenca es la pendiente entre los puntos B y C:

$$S = \frac{H_b - H_c}{BC} \quad (30)$$

Siendo:

$$AB = 0.10 AD; AC = 0.85 AD$$

2.2.2. TIEMPO DE RETARDO (TLAG)

Tiempo de concentración

Se puede definir como el tiempo que se demora en viajar una partícula de agua desde el punto más remoto hasta el punto de interés. Comprende

al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial.

Este parámetro naturalmente depende, entre otras variables, de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y la pendiente de la cuenca. Para el cálculo del tiempo de concentración se puede utilizar las siguientes ecuaciones:

$$Tc(kirpich) = \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0.385} * 0.06626 \quad (31)$$

$$Tc(Temez) = \left(\frac{L}{S^{0.35}}\right)^{0.75} * 0.126 \quad (32)$$

$$Tc(U.S.B.R.) = 0.066\left(\frac{L}{S^{1/2}}\right)^{0.77} \quad (33)$$

Donde:

L = Recorrido de las aguas para cada tramo de cuenca = Km.

S = Pendiente media de los ríos= m/m.

A = Área de la cuenca (km²).

Para cálculo hidrológico, se toma en cuenta el área de la cuenca estudiada, es decir, para el caso de cuencas pequeñas (menores a 10 km²) se tomarán en cuenta las ecuaciones de Kirpich, USBR y Temez.

Un parámetro importante en los análisis de estas reconstrucciones es el tiempo de retardo que varía en función de ciertos parámetros de cuencas que se pueden medir. El tiempo de retardo fue originalmente definido como “La diferencia de tiempo entre el centro de masa de la precipitación y el centro de masa de la escorrentía.”

$$Tr=0.6xTc \quad (34)$$

Tr= Tiempo de retardo

Tc= Tiempo de concentración

2.2.3. NÚMERO DE CURVA (CN)

Un parámetro necesario para el cálculo del Hidrograma de avenida por medio de la metodología del Soil Conservation Service (SCS) es determinar el valor del Número de Curva (CN). Este valor de CN es adimensional, tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN=100$; para superficies naturales $CN < 100$. El SCS ha tabulado valores de número de curva en base al tipo de suelo y uso de tierras. Todos los suelos son clasificados en 4 grupos de suelos hidrológicos de distintas propiedades (Tabla. 12).

Para el cálculo de CN debemos conocer la descripción del uso del suelo; cada uso de suelo representa un valor de CN (Tabla. 13). Finalmente, por ponderación se llega a un valor único de CN.

Tabla 12. Grupos de suelos hidrológicos, Chow (1998)

Grupo A:	Suelos de bajo potencial de escorrentía, teniendo altas tasas de infiltración aun cuando está completamente saturado. Arena profunda muy bien drenadas, con alta tasa de transmisión de agua.
Grupo B:	Suelos con moderadas tasas de infiltración. Suelos poco profundos, moderadamente drenadas, con texturas moderadamente finas a gruesas. Esto suelos tienen una moderada tasa de transmisión de agua.
Grupo C:	Suelos con baja tasa de infiltración cuando está completamente saturado, principalmente suelos que tienen una capa que impide el movimiento descendente del agua o suelos de textura moderadamente finas a finas. Suelos con altos contenidos de arcilla y baja tasa de transmisión de agua.
Grupo D:	Suelos de alto potencial de escorrentía, teniendo tasas muy bajas infiltración cuando está completamente saturado. Son suelos arcillosos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas. Suelos con muy baja tasa de transmisión de agua.

Tabla 13. Números de curva de escorrentía para usos de suelos, Chow (1998)

Descripción del uso de la tierra	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamientos de conservación con tratamientos de conservación.	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastizales: condiciones pobres condiciones óptimas.	68 39	79 61	86 74	89 90
Vegas de ríos: condiciones óptimas.	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena.	45 25	66 55	77 70	83 77
Áreas abiertas, césped, parques, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptable: cubierta de pasto en el 50 al 75%.	39 49	61 69	74 79	80 84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables).	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables).	81	88	91	93

Residencial:					
Tamaño prom. del lote	Porcentaje prom. impermeable				
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 y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89

2.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO FLO-2D

El movimiento de un fluido tan complejo como el que forma los aludes torrenciales no puede representarse por medio de los métodos que se aplican comúnmente para fluidos como el agua. Esto se debe a que la alta concentración de materia sólida en los aludes torrenciales hace que estos fluidos se comportan como fluidos no-newtonianos, en los que es necesario que actúe un esfuerzo superior a un esfuerzo crítico dado, para que el fluido se ponga en movimiento. Viceversa, si el esfuerzo actuante es inferior al esfuerzo crítico, el fluido se detiene, (Navarro, 2009)

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D 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, (O'Brien, 2003).

2.3.1. ECUACIONES BÁSICAS

Las ecuaciones que utiliza el modelo FLO-2D son las de continuidad y cantidad de movimiento, integradas en la vertical:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \quad (35)$$

$$S_{fx} = S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (36)$$

$$S_{fy} = S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (37)$$

Dónde:

h = profundidad del flujo

V_x y V_y = componentes de la velocidad media

t = tiempo

g = aceleración de la gravedad

S_f = pendiente de fricción

S_o = pendiente del lecho

i = intensidad de la precipitación

La condición de borde aguas arriba es el hidrograma de entrada (INFLOW) y la condición de borde aguas abajo es el flujo de salida (OUTFLOW).

2.3.2. SOLUCIÓN NUMÉRICA

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 Δx e 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 de 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:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{(v+c)} \quad (38)$$

Donde:

C = número de Courant ($0.3 < C < 1.0$)

Δx = ancho del elemento de la malla cuadrada

v = velocidad promedio de la sección transversal calculada

c = celeridad de la onda calculada

Para el tránsito de onda dinámica, otro criterio de estabilidad numérica aplicado en el modelo es el de Ponce & Theurer (2013). 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:

$$\Delta t < \zeta S_o \Delta X^2 / q_o \quad (39)$$

Donde

q_o = descarga unitaria

S_o = pendiente del lecho

ζ = coeficiente empírico

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.

2.3.3. LÓGICA DEL 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 (Oviedo, 2009).

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 de flujo, pendiente, 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.

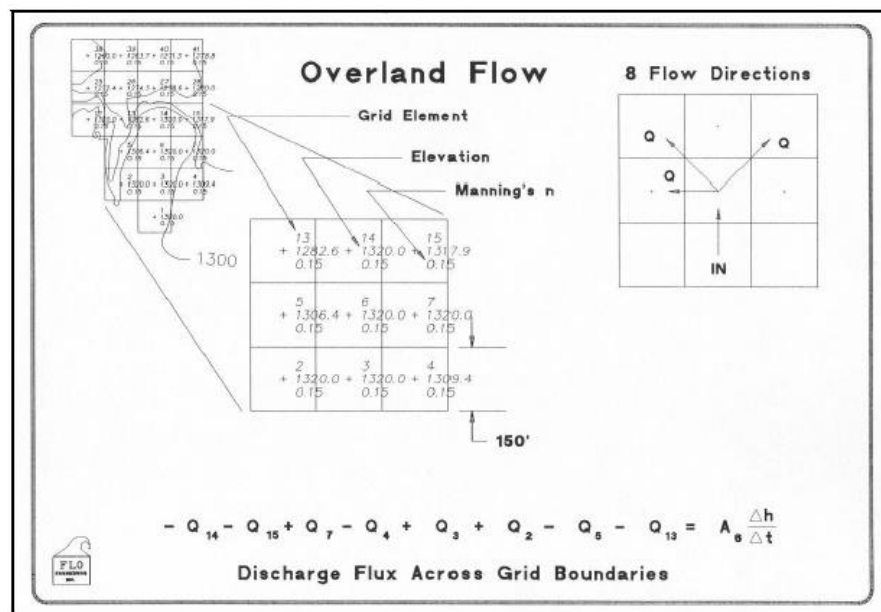


Figura 13. Descarga del flujo a través de los elementos de grilla en planta, O'Brien (2006)

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 (el promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos).

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad (40)$$

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 seleccionado 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. El incremento de descarga para el paso de tiempo a través de las 8 fronteras son sumados.

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad (41)$$

7. 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.

$$\Delta d_x^{i+1} = \Delta Q_x^{i+1} \Delta t / Area \quad (42)$$

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 excedida, 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 excedida.

2.3.4. MODELO REOLÓGICO

FLO-2D transita flujos de sedimentos hiperconcentrados (flujos de lodo y escombros) como un fluido continuo prediciendo el movimiento del fluido viscoso. Para flujos de lodo (mudflows), el movimiento de la matriz fluida es gobernado por la concentración de sedimentos. Un modelo cuadrático reológico prediciendo la viscosidad y el esfuerzo de

cedencia como una función de la concentración de sedimentos es empleado y los volúmenes del sedimento son monitoreados a través del sistema. Los flujos de lodo son dominados por esfuerzos viscosos y esfuerzos dispersivos, y constituye un fenómeno muy diferente que esos procesos de carga de sedimento suspendida y carga de lecho en un transporte de sedimento convencional. El transporte de sedimento y los componentes de flujos de lodo no pueden ser simulados a la vez con el programa FLO-2D. (Banda, 2014).

Takahashi & Tsujimoto (1985), propusieron un modelo de diferencia finitas bidimensional para flujos de escombros basados en el modelo de fluido dilatante acoplado con la resistencia del flujo de Coulomb. El modelo de fluido dilatante fue derivado de la teoría de los esfuerzos dispersivos que describe los esfuerzos resultantes de la colisión de partículas de sedimento, luego Takahashi & Nakagawa, (1989) modificaron el modelo de flujos de escombros para incluir turbulencia.

O'Brien & Julien (1988), 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 Bingham con bajas tasa 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 describe el régimen continuo del flujo viscoso a flujo turbulento/dispersivo.

Para transitar 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.

Los esfuerzos cortantes en flujos de sedimento hiperconcentrados, incluyendo los descritos como flujos de escombros, flujos de lodo e inundaciones de lodo, pueden ser calculados de la suma de cinco componentes de esfuerzos al corte.

$$t = t_c + t_{mc} + t_v + t_t + t_d \quad (43)$$

Donde el esfuerzo cortante total τ depende del esfuerzo límite cohesivo τ_c , el esfuerzo de Mohr-Coulomb τ_{mc} , el esfuerzo cortante viscoso τ_v , el esfuerzo cortante turbulento τ_t , y el esfuerzo cortante dispersivo τ_d . Cuando escribimos en términos de tasas de deformación (dv/dy) el siguiente modelo cuadrático reológico puede ser desarrollado (O'Brien, et al., 1993).

$$t = t_y + n \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (44)$$

Donde:

$$t_y = t_c + t_{mc} \quad (45)$$

$$C = p_m l^2 + a_i p_s \lambda^2 d_s^2 \quad (46)$$

En estas ecuaciones η es la viscosidad dinámica de la mezcla; τ_c es el esfuerzo de fluencia cohesivo; τ_m es el esfuerzo de corte de Mohr-Coulomb donde $\tau_{mc} = p \tan \Phi$ dependen de la presión intergranular p y del ángulo de reposo Φ del material; C denota el coeficiente de esfuerzos cortantes inerciales, el cual depende de la densidad de masa de la mezcla ρ_m , de la longitud de Prandtl l_m , del tamaño del sedimento d_s , de la concentración volumétrica de sedimentos C_v , y de la densidad de masa del sedimento ρ_s . La longitud l_m es usualmente dado como una función de la distancia desde el borde “y” y la constante de von Karman “k”. Como una primera aproximación ésta aproximación puede ser determinada por $l_m \approx kh$, donde h es la profundidad del flujo y $k=0.4$. El coeficiente a_i propuesto por Takahashi es de 0.01. Bagnold definió la concentración de sedimento lineal λ como:

$$\frac{1}{\lambda} = \left(\frac{C_m}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \quad (47)$$

En el cual la concentración máxima de partículas de sedimento C_m es aproximadamente 0.615.

Los primeros de los dos términos de esfuerzos en la ecuación de esfuerzos cortantes son referidos a los esfuerzos cortantes de Bingham y representa los esfuerzos de resistencia internos del fluido Bingham (Fig 14). La suma del esfuerzo de cedencia y los esfuerzos viscosos define los

esfuerzos cortantes de un fluido cohesivo, de sedimento hiperconcentrado en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de los esfuerzos cortantes dispersivos y turbulentos, el cual es una función del cuadrado de la gradiente de velocidad.

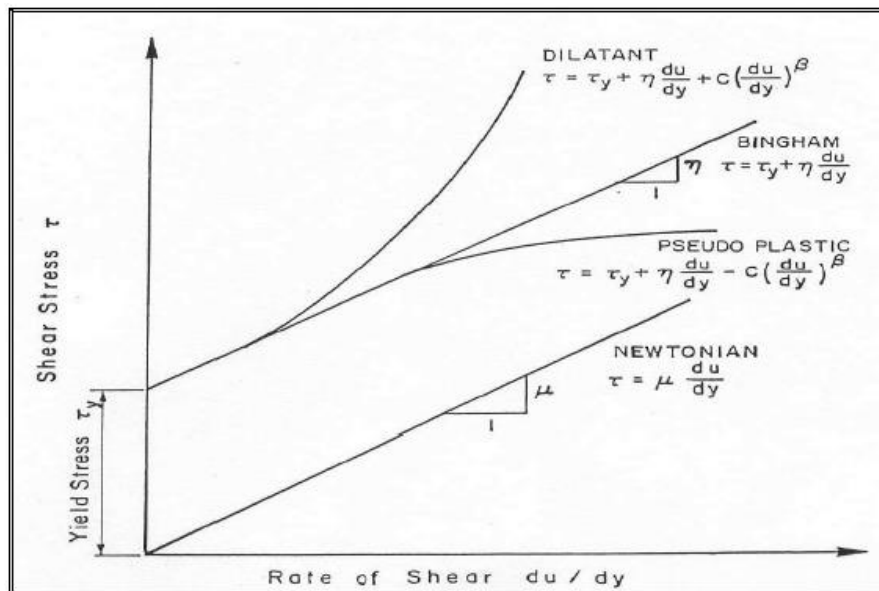


Figura 14. Modelos de deformación del fluido, O'Brien (1993)

Un modelo de flujos de lodo que incorpora solo los esfuerzos de Bingham e ignora los esfuerzos inerciales asume que la simulación de flujos de lodo es viscosa. Esta suposición no es generalmente aplicable porque todas las inundaciones de lodo (mud floods) y algunos flujos de lodo (mudflows), son turbulentos con velocidades tal como 8 m/s. Incluso flujos de lodo con concentraciones hasta 40% por volumen pueden ser turbulentos (O'Brien, 1986).

Dependiendo de las propiedades de la matriz fluida, la viscosidad y esfuerzos de cedencia en altas concentraciones de sedimento pueden todavía ser relativamente bajos comparados a esfuerzos turbulentos asociados a altas velocidades. Si el flujo es controlado principalmente por esfuerzos viscosos, resultarán velocidades inferiores. Inversamente, si la viscosidad y el esfuerzo de cedencia son pequeños, los esfuerzos turbulentos dominarán y las velocidades serán superiores.

De la ecuación 45, Julien & Lan (1991) propusieron una formulación adimensional del modelo reológico cuadrático como sigue:

$$t^* = 1 + (1 + T_d^*)a_i D_v^* \quad (48)$$

En donde los tres parámetros adimensionales τ^* , D_v^* y T^* son definidos como:

1. Esfuerzo cortante en exceso adimensional.

$$t^* = \frac{t - t_y}{n du/dy} \quad (49)$$

$$t^* = 1$$

La mezcla se comporta como un fluido del tipo Bingham

2. Tasa dispersivo-viscoso adimensional.

$$D_v^* = \frac{p_s \lambda^2 d_s^2}{n} \frac{du}{dy} \quad (50)$$

Si T_d^* es grande el flujo será turbulento; si T_d^* es pequeño será dispersivo.

3. Tasa turbulento-dispersivo.

$$T_d^* = \frac{p_m l_m^2}{a_i p_s \lambda^2 d_s^2} \quad (51)$$

Si T_d es grande el flujo será turbulento; si T_d^* es pequeño será dispersivo.

Para relacionar los parámetros adimensionales a la clasificación de flujos de sedimento hiperconcentrados, las siguientes líneas son sugeridas:

- 1) Las avenidas de lodo (Mud Flood), ocurren cuando los esfuerzos cortantes turbulentos son dominantes, dados para $D_v > 400$ y $T_d > 1$.
- 2) Los flujos de lodo (Mudflow), ocurren cuando los esfuerzos de cedencia y viscosos son dominantes, dados por $D_v^* < 30$.
- 3) Los flujos de escombros (Debris flow) o flujos granulares, ocurren cuando los esfuerzos dispersivos son dominantes, dados por $D^* > 400$ y $T^* < 1$.

Un régimen de transición existe en el rango de los parámetros $30 < D_* < 400$.

Por otro lado, los esfuerzos cortantes analizados en el modelo FLO-2D, pueden también escribirse de la siguiente manera:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (52)$$

Donde S_f (pendiente de fricción total), S_y (pendiente de cedencia), S_v (pendiente viscosa) y S_{td} (pendiente turbulenta- dispersiva). S_v escrito como:

$$S_v = \frac{Kn}{8S\gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad (53)$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimentos, K es el parámetro de resistencia para flujos laminares (tabla 14).

Tabla 14. Parámetros de Resistencia para flujo laminar, Julien & Lan (1991)

Parámetros de resistencia del flujo laminar¹	
Superficie	Rango de K
Concreto/asfalto	24 – 108
Arena escasa	30 – 120
Superficie gradual	90 – 400
Arcilla escasa – suelo de margas erosionadas	100 - 500
Poca vegetación	1,000 - 4,000
Hierba corta de pradera	3,000 - 10,000
Césped de hierba añil	7,000 - 50,000
¹ Woolhiser (1975)	

Un valor de $K=2285$ fue calibrado para el flujo de lodo de la quebrada Rudd en Utah (EEUU) para un área residencial y ha sido usado con buenos resultados en muchos estudios de flujos de escombros.

La pendiente del esfuerzo turbulento dispersivo, puede ser escrito como:

$$S_{td} = \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (54)$$

Donde la resistencia del flujo η_{td} de las componentes de esfuerzos cortantes turbulentos y dispersivos es una función exponencial de la concentración de sedimentos y el coeficiente de Manning.

Las componentes de las pendientes de fricción son entonces combinadas en la siguiente forma:

$$S_f = \frac{t_y}{\gamma \gamma_m h} + \frac{KnV}{8\gamma_m h^2} + \frac{n_{td}^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (55)$$

Una solución de la ecuación cuadrática para la combinación de pendientes de fricción ha sido formulada en el modelo FLO-2D para la estimación de velocidad en la ecuación de momentum.

2.3.5. MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS

La viscosidad y el esfuerzo de cedencia de mezclas agua-sedimento son parámetros reológicos necesarios para la aplicación de los modelos de

cálculo de los flujos con altas concentraciones de sedimentos. Una manera directa de calcular la viscosidad es empleando un “reómetro” que es similar a un viscosímetro que construye todo el diagrama de esfuerzo versus 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 y Julien (1988) 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, son dadas en la tabla 14. Las muestras con alto contenido de arcilla fueron ensayadas para determinar el límite líquido y el índice plástico. La matriz fluida compuesta de sedimentos finos (sólo 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):

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (56)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (57)$$

Donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio y C_v es la concentración volumétrica de sedimentos (Tabla 15, Fig. 16 y Fig. 17).

Tabla 15. Propiedades de las matrices de flujos de lodo (limo y arcilla), O'Brien y Julien (1988)

Sample	Arcilla	D16	D50	D84	Líquido	Plástico
	(%)	(mm)	(mm)	(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	25,2	0,001	0,018	0,061	-	-

Tabla 16. Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de C_v , O'Brien y Julien (1988)

Fuente	$\tau_v = \alpha e^{\beta C_v}$		$n = \alpha e^{\beta C_v}$	
	α	β	α	β
Correlaciones de mediciones en Campo				
Aspen Pit 1	0,181	25,7	0,0360	22,1
Aspen Pit 2	2,72	10,4	0,0538	14,5
Aspen Natural Soil	0,152	18,7	0,00136	28,4

Aspen Mine Fill	0,0473	21,1	0,128	12,0
Aspen Watershed	0,0383	19,6	0,000495	27,1
Aspen Mine Source Area	0,291	14,3	0,000201	33,1
Glenwood 1	0,0345	20,1	0,00283	23,0
Glenwood 2	0,0765	16,9	0,0648	6,20
Glenwood 3	0,000707	29,8	0,00632	19,9
Glenwood 4	0,00172	29,5	0,000602	33,1
Correlaciones disponibles de la literatura				
Iida (1938)	-	-	0,0000373	36,6
Dai et al. (1980)	2,60	17,48	0,00750	14,39
Kang and Zhang (1980)	1,75	7,82	0,0405	8,29
Qian et al. (1980)	0,00136	21,2	-	-
	0,050	15,48	-	-
Chien and Ma (1958)	0,0588	19,1-32,7	-	-
Fei (1981)	0,166	25,6	-	-
	0,00470	22,2	-	-

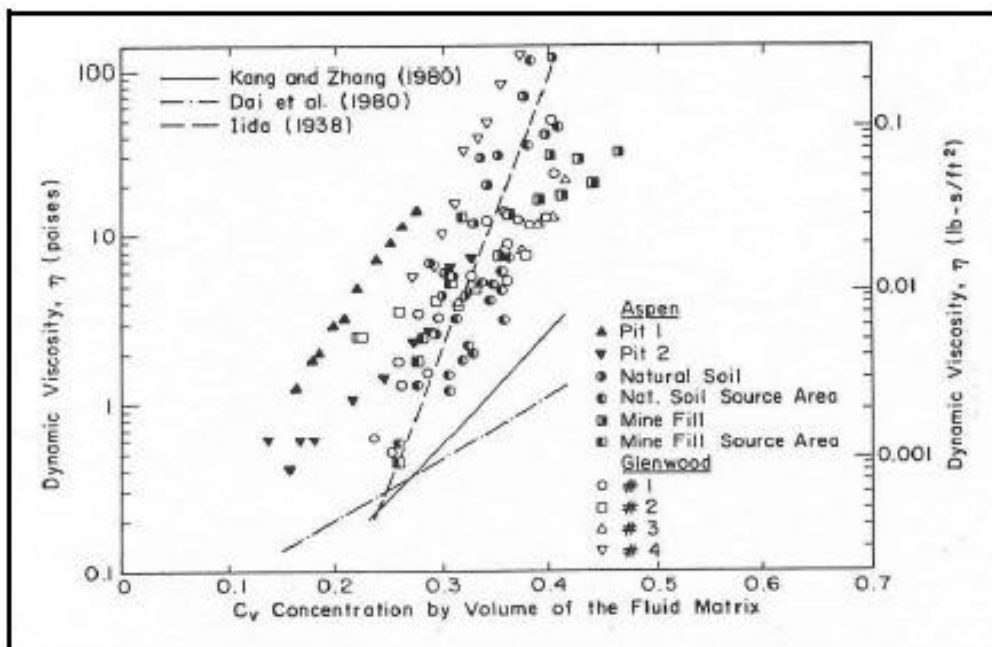


Figura 15. Viscosidad dinámica de muestras de flujos de lodo versus concentración de sedimentos, O'Brien y Julien (1988)

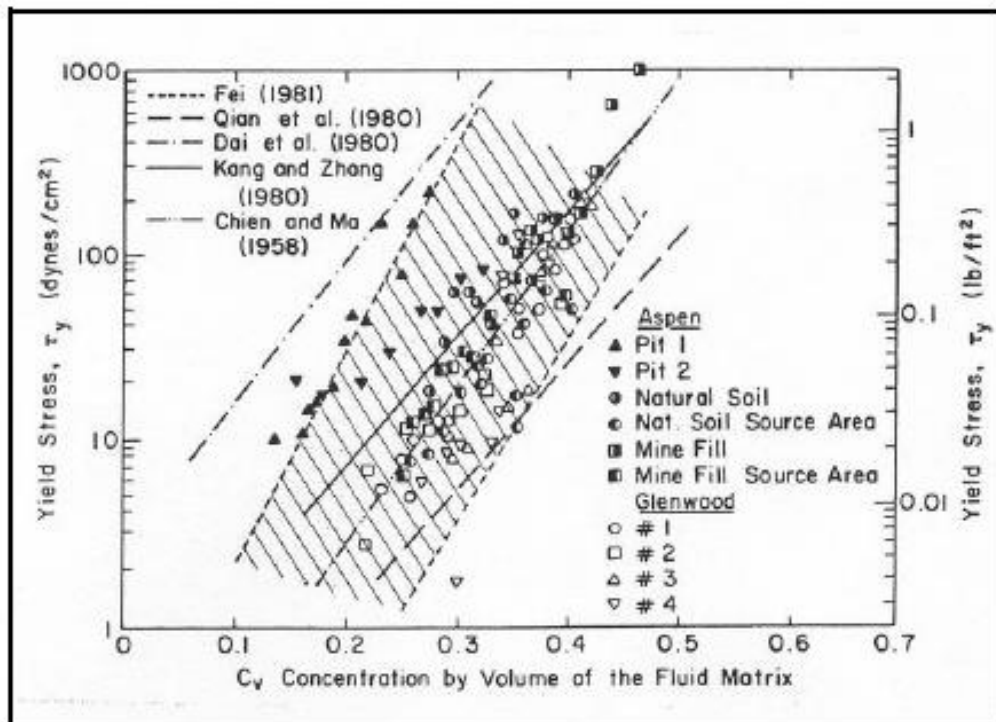


Figura 16. Esfuerzo de cedencia de muestras de flujos de lodo versus concentración de sedimentos, O'Brien y Julien (1988)

Muchos flujos de sedimento hiperconcentrado, viscosos son algunas veces referidos a flujos lodo. Los flujos de lodo son no homogéneos, no-Newtonianos cuyas propiedades del fluido varían significativamente si viajan a través de las vertientes o a través de los abanicos aluviales. El comportamiento de los flujos de lodo es una función de las propiedades de la matriz, geometría del canal, pendiente y rugosidad. La matriz fluida consiste de agua y sedimentos finos.

La viscosidad del flujo de sedimento hiperconcentrado es una función de las propiedades de la matriz fluida incluyendo la concentración de sedimentos, porcentaje y tipo de sedimentos-arcillas y temperatura del

fluido. Los flujos de lodo viscosos tienen altas concentraciones de sedimento y correspondientemente altos esfuerzos de cedencia. Los parámetros de muestra de flujo de lodo en la tabla 15 representan un rango completo de características de flujo potencial.

2.3.6. 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 ó 0.45 dependiendo del tipo de sedimento de la cuenca. Si la cuenca produce flujo de lodos y escombros, 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 16. 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 periodo 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.

Tabla 17. Comportamiento del flujo de lodo como una función de C_v , O'Brien (2000)

Descripción del Tipo de Flujo	Concentración de sedimentos		Características del Flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamientos	0,65 – 0,80	0,83 – 0,91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques
	0,55 – 0,65	0,76 – 0,83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar
Flujos de lodo (Mudflow)	0,48 – 0,55	0,72 – 0,76	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Avenida de lodo (Mud Flood)	0,40 – 0,45	0,65 – 0,69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas pero se disipan rápidamente
	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; 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	< 0,20	< 0,41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Cuando transitamos avenidas de lodo o flujos de lodo sobre un abanico aluvial o planicies de inundación, el modelo FLO-2D conserva la continuidad para el agua y el sedimento. Para cada elemento de grilla y paso de tiempo, el cambio en los volúmenes de agua y sedimento y el cambio correspondiente en la concentración de sedimentos son calculados. Al final de la simulación, el modelo reporta la cantidad de agua y sedimento fuera del área de estudio (flujo de salida) y la cantidad de agua y sedimento remanente sobre el abanico y en el canal (flujo almacenado).

2.4. EVALUACIÓN DE RIESGOS

El análisis de riesgo o peligro de inundación en una localización específica, que incluye la afectación de las obras estructurales, es una función de la intensidad y de la probabilidad del evento. La intensidad de la crecida está definida por la profundidad y la velocidad de flujo y su probabilidad de ocurrencia se relaciona inversamente a la magnitud del evento (Banda, 2014).

El riesgo de la crecida se define entonces, como una función combinada discreta de la intensidad del evento (severidad del acontecimiento) y de su período de retorno (frecuencia) y en general se acepta la categorización presentada en la tabla 18.

Tabla 18. Definición de riesgo de inundación, Users Manual (2009)

NIVEL DE RIESGO	DESCRIPCIÓN
Alto	Peligro para las personas tanto en el interior como en el exterior de sus viviendas. Las estructuras están en peligro de ser destruidas
Medio	Las personas están en peligro fuera de sus casas. Los edificios pueden sufrir daños y es posible la destrucción de estructuras dependiendo de las características de la construcción
Bajo	El peligro para las personas es bajo o no existe. Los edificios pueden sufrir pequeños daños, pero la inundación o la sedimentación pueden afectar interiores de las estructuras.

Para definir la intensidad del evento de crecida, algunos métodos utilizan una combinación de la profundidad y de la velocidad de flujo. Por ejemplo el método austríaco utiliza la energía total definida por $h + v^2/2g$.

El método suizo (OFEE) define la intensidad en términos de una combinación de la profundidad de flujo h y del producto de h y de v y permite asignar una intensidad alta a las grandes profundidades de flujo independientemente de las velocidades del flujo.

Si bien las condiciones específicas en una región pueden hacer necesario cambiar los umbrales de los niveles de peligro, frecuentemente se acepta la definición de intensidades de las crecidas de agua y de barro que se muestran en las tablas 19 y 20. Los flujos de barros y detritos son aún más destructivos que las crecidas de agua, por lo que el criterio de intensidad para estos flujos es más conservativo (O'Brien, 2009).

Tabla 19. Definición de intensidad de crecidas de aguas, Flo-2D Users Manual (2009)

INTENSIDAD (m)	MÁXIMA PROFUNDIDAD h (m)		PRODUCTO DE MÁXIMA PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD MÁXIMA(m ² /s)
Alto	$h > 1,5 \text{ m}$	O	$v h > 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0,5 \text{ m} < h < 1,5 \text{ m}$	O	$0,5 \text{ m}^2/\text{s} < v h < 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$h < 0,5 \text{ m}$	Y	$v h < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$

Tabla 20. Definición de intensidad de flujos o crecidas de barro, Flo-2D Users Manual (2009)

INTENSIDAD (m)	MÁXIMA PROFUNDIDAD H (m)		PRODUCTO DE MÁXIMA PROFUNDIDAD POR VELOCIDAD MÁXIMA(m ² /s)
Alto	$h > 1,0 \text{ m}$	O	$v h > 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$h < 1,0 \text{ m}$	Y	$v h < 1,0 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	No definida		No definido

CAPITULO III. MATERIALES Y METODOLOGÍA

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y FUENTE DE DATOS

La información hidrometeorológica, para la zona de estudio se obtuvo de entidades como: Autoridad Local del Agua (ALA), Proyecto Especial Tacna (PET) y del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (Senamhi).

Tabla 21. Cuadro 1 Estaciones hidrometeorológicas ámbito de la cuenca, SENAMHI (2011)

Variable Hidrológica	Estación	Norte	Este	Altitud	Periodo
1;2;3;4;5;6;7	Calana	8017500	375800	848	1964 - 2006
1;2;3;4;5	La Yarada	7984800	353000	58	1972 - 2006
1;2;3;4	Magollo	8002000	356000	288	1964 - 2002
1;2;3;4;8	Calientes	8022950	381850	1300	1964 - 2006
1	Palca	8034800	398400	3142	1965 - 2006
1	Toquela	8048500	402000	3650	1964 - 2009
1	Lluta	8226850	391300	1950	1964 - 1966
1;3	Corpac	8003906	364758	875	1950 - 1972
1;2;3;4;5;6;7	Jorge Basadre	8006400	367400	560	1993 - 2006
1	Paucarani	8063609	418115	4600	1926 - 2003

1: Precipitación, 2: Evaporación, 3: Temperatura, 4: Humedad Relativa
5: Vientos, 6: Presión Atmosférica, 7: Heliofanía, 8: Descargas/Caudales

3.2. TRABAJO DE CAMPO

Consistió en la evaluación de la geomorfología, la geología y la identificación de posibles marcas de antiguos flujos de escombros de la zona de estudio, verificando la información recopilada.

Se realizó una calicata, la muestra fue llevada a laboratorio para realizar los diferentes ensayos necesarios para identificar el tipo de suelo, (Anexo 01).

3.3. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DEL ÁREA

3.3.1. GEOLOGÍA LOCAL

La información geológica de la zona de estudio se obtuvo de diferentes autores, las cuales sirvieron como base para este trabajo, como son el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET, 2011) y Proyecto Especial Tacna (PET); posteriormente, esta información geológica fue verificada en la etapa de campo (Anexo 04).

a. Formación Hualhuani (Berriasiano)

Se hallan en los cerros Llaullacane y Chachacumane, presencia de sedimentos arenosos cuarcíticos al tope de la sucesión estratigráfica. Se observa que el contacto basal con la Formación Gramadal es discontinuo litológicamente. La parte superior está limitada por una marcada discordancia angular y erosional con las rocas vulcano-sedimentarias de

la Formación Chulluncane considerado como miembro inferior del Grupo Toquepala. (Acosta, Mamani, Alván, Oviedo, & Rodríguez, 2011).



Figura 17. Formación Hualhuan en el cerro Llaullacane y Chachacumane.

b. Unidad Intrusiva Yarabamba (KP-ya/gd/gd-mzd)

Se ubica en la unidad geomorfológica Flanco Disectado de los Andes y aflora en la parte baja de la cuenca Caplina (bocatoma Challata), su geología está comprendida por rocas volcánicas y sedimentarias con edades que van desde el Jurásico inferior al Paleoceno. Esta franja se caracteriza por la presencia de rocas intrusivas. Todo este basamento es cubierto por rocas sedimentarias y piroclásticas de edad Terciaria, compuesto esencialmente por granodioritas, monzodioritas y dioritas, que intruyen a las formaciones Pelado y San Francisco, silificando contactos mayormente sedimentarios.



Figura 18. Vista panorámica donde se observa la unidad Yarabamba.

c. Depósitos del cuaternario

En los cuaternarios podemos considerar a todos los depósitos morrénicos y fluvio-glaciares que ocupan grandes extensiones. Estas se han depositado cubriendo los flancos de las altas cumbres asociadas, principalmente aparatos volcánicos recientes, en cambio las cubiertas fluvio-glaciares ocupan los sectores bajos y de relieve moderado. Litológicamente se componen de cantos, bloques y gravas de rocas volcánicas que se intercalan con arenas y arcillas, presentando una estratificación en bancos gruesos. (Wilson & García, 1962)

También se puede considerar a los depósitos aluviales y coluvio deluviales, se presentan en terrazas que se compone de cantos gruesos, gravas, arenas y arcillas, estratificadas en capas lenticulares y con inclusiones suaves en el sentido de la corriente. El área de las terrazas es generalmente utilizada como terrenos de cultivo.

-Depósitos aluviales: Depósitos de gravas y arenas que se encuentran en proceso de transporte y deposición de los ríos. Por lo general, estos depósitos se forman por el transporte de material a través de las quebradas, depositándose temporalmente en las márgenes de los ríos a la espera de un evento fluvial importante para ser nuevamente transportados a zonas más distales. Estos depósitos están constituidos por conglomerados, arenas y arcillas inconsolidadas que se intercalan entre ellas irregularmente. (Wilson & Garcia, 1962).



Figura 19. Vista del depósito cuaternario.

-Deposito proluviales: Depósitos de flujos de detritos canalizados, en forma de abanico, ubicados en la parte terminal o desembocadura de una quebrada o curso fluvial (régimen estacional o torrentoso) a un río principal. Estos pueden generar el represamiento de valles o desviaciones de cursos fluviales, controlando la morfología actual del valle. Están

compuestos por depósitos de detritos clásticos de variados tamaños, que vistos en planta presentan formas característicamente cónica.

3.3.2. GEOMORFOLOGÍA LOCAL

Los agentes principales en dar forma a la morfología actual que se observa en esta zona de la región de Tacna fueron los procesos geodinámicos internos y externos (Anexo 04).

La zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la unidad morfoestructural denominada montañas, lomada, escarpe, colinas y depósitos de piedemonte, planicies y depresiones, y una posterior subdivisión considerando su origen y la geometría del relieve (pendiente del terreno), carácter estructural y asociación morfogenética (fluvial, aluvial, glacial y gravitacional), permitió establecer las unidades geomorfológicas descritas a continuación:

a. Montañas

Se considera dentro de este unidad a las formas que alcanzan alturas mayores a los 300 m respecto al nivel de base local, se reconocen como cumbres y estribaciones producto de las deformaciones sufridas por la erosión y la influencia de otros eventos de diferente naturaleza,

constituidos por rocas de tipo metamórficas y sedimentarias con un moderado estado de meteorización superficial y de erosión.

Se caracterizan por presentar cimas crestadas como resultado de la interestratificación de litologías variadas; en algunos casos son cimas amplias y/o subredondeadas, las que constituyen divisorias de aguas, muchas de ellas se encuentran conformadas por roca descubierta, es decir no existe cobertura de suelos alguna, produciéndose procesos de meteorización y erosión superficial de la roca expuesta.

b. Escarpes

Superficie plana inclinada, con pendiente superior a los 40°. Se encuentran limitando las montañas de laderas estructurales con estratificación horizontal. Estos son el resultado de los procesos erosivos, debido a la precipitación pluvial, deslizamientos y derrumbes, así como por la incisión de los cursos de ríos en las secuencias sedimentarias del Mesozoico.

c. Colinas y Lomas

Están representadas por colinas de relieve simple, son resultado de procesos denudativos, de menor altura que una montaña y con

inclinación de laderas promedio superior a 16 %. Se asocian litológicamente a rocas de tipo sedimentarias del Cretácico y Neógeno.

d. Piedemontes

Para delimitar los piedemontes, se reconocieron aquellas características que los conforman, como el depósito y acumulación de material, y las rupturas de pendiente característicos.

3.3.3. PRINCIPALES ESTRUCTURAS

a. Falla Challaviento

Están ubicadas entre la quebrada Chero y cerro Chari al noreste del cuadrante I del cuadrángulo de Pachía. Esta falla se entrelaza con la falla Incapuquio en el sector de Huacano Chico, configurando estructuras con dirección promedio E-O. En cambio, en Palca, la falla Challaviento recorre sectores comprendidos desde cerro Ticana al oeste de Ancoma hasta el río Caplina al este del poblado de Caplina.

En la quebrada Chero y Huacano Chico, la falla tiene dirección promedio E-O y se manifiesta con movimientos de rumbo sinistral en el trazo principal. Este trazo posee un buzamiento vertical a subvertical con vergencias hacia el suroeste y noreste. El movimiento sinistral del trazo principal de la falla Challaviento produce una serie de fallas inversas

acesorias de buzamientos de ángulos variados entre 30° y 70° tanto hacia el NE y SO, formando una serie de «lentejones» imbricados.

b. Falla Calientes

Recorre la parte sureste y suroeste del cuadrángulo de Pachía y la parte suroeste del cuadrángulo de Palca. Su dirección promedio en lo extenso de su recorrido es NO-SE. Es de tipo inverso con componente sinistral, con buzamiento de 65° a 68° al este. Esta falla se considera activa por estar relacionada a movimientos sísmicos además de afectar sedimentos aluviales del Holoceno.

Afecta rocas pertenecientes a la Formación Moquegua Superior, Formación Huaylillas (Mioceno inferior), depósitos correspondientes a las ignímbritas.

Su movimiento produce en los sedimentos una serie de pliegues, flexuras y desniveles con escarpes de falla.

Hacia el sector sur del poblado de Calientes, entre la quebrada Caplina y la quebrada Cobani se hallan afloramientos de la Formación Chocolate inferior, Formación Socosani, Grupo Yura, Grupo Toquepala y rocas intrusivas de la Super Unidad Yarabamba. Estas rocas están afectadas por un tectonismo intenso y muestran fallas inversas, cabalgamientos, pliegues e intrusiones.

3.3.4. GEODINÁMICA

a. Geodinámica Externa

En la zona de trabajo los fenómenos de geodinámica externa han participado y participan en el modelado de la superficie terrestre como resultado de la interacción de agentes geodinámicos como el agua, el sol, la gravedad, el viento y los organismos vivos, que ocurren bajo diferentes modalidades o mecanismos dependiendo también de los factores geodinámicos como factor litológico, estratigráfico, tectónico, topográfico, climatológico, hidrológico y antrópicos, son los siguientes (Valdivia, 2013):

Procesos de erosión: Los factores naturales que inciden en la ocurrencia del fenómeno de erosión de ladera en la zona de trabajo son pendiente natural de las laderas, gravedad, factores geológicos (litológicos o estructurales), etc.

El viento juega un papel preponderante en el modelado de la superficie terrestre y contribuyen en forma directa a la formación del relieve actual.

Procesos de deposición: Los procesos de deposición datan del Cretáceo Superior y Terciario el vulcanismo los procesos sedimentarios provocaron la deposición de materiales sobre la superficie terrestre. Las quebradas depositan materiales en bancos.

B. Geodinámica Interna

El Perú está ubicado en una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la Tierra; por lo tanto se encuentra expuesta a constantes fenómenos sísmicos de gran magnitud, que ocasionan pérdidas humanas y materiales. El Sur del Perú, por su ubicación en el borde Occidental de Sudamérica se encuentra en el área de influencia del proceso de convergencia de las placas de Nazca y Sudamericana, caracterizada por su alta sismicidad y la ocurrencia eventual de sismos destructivos.

La sismicidad en el Perú puede ser dividida en dos grupos:

El primero y más importante, está asociado al proceso de subducción de la placa de Nazca por debajo de la Continental; esta libera el 90% de la energía sísmica anual, siendo generalmente el más frecuente y el de grandes magnitudes.

El segundo grupo, considera la sismicidad producida por deformación y está asociada a los fallamientos tectónicos activos existentes en el Perú; esta actividad sísmica es de menor frecuencia y de magnitudes moderadas.

Las características de la sismicidad del Perú, han sido descritas por diversos autores (Stauder, 1975; Bevis e Isacks, 1984; Tavera y Bufom, 1998) y entre las principales esta la relacionada con la distribución de los focos en superficie y en profundidad, la misma que ha sido clasificada en

sismos con foco superficial ($h < 60$ Km.) intermedios ($60 < h \leq 350$ Km.) y profundos ($h > 350$ Km.).

Los sismos en el Perú se distribuyen de manera irregular pudiendo definirse tres zonas:

La primera zona se distribuye paralela a la línea de costa por debajo de 9° S.

La segunda zona donde los sismos se localizan en el interior del continente (zona Norte y Centro) a lo largo de la Cordillera Oriental y zona Subandina.

La tercera zona se localiza en la región Sur del Perú, siendo esta región la de mayor índice de sismicidad, en este tercer grupo se encuentra nuestra zona de estudio donde la profundidad máxima del foco llegó a los 300 Km.

3.3.5. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

a. Clima

Tacna se ubica en la cabecera del desierto de Atacama, por lo que la cuenca Caplina presenta un clima desértico; es por esta razón que las precipitaciones anuales son escasas, hasta nulas. Las mayores intensidades medias en las estaciones de Palca y Toquela alcanzaron hasta 129.mm, según las Isoyetas generadas con la información

hidrológica (precipitación anual). La precipitación anual media en la zona de bocatoma de Challata 70 mm, 150 mm en la zona de Ataspaca, 160 mm por la zona de Ancoma y en la unidad geomorfológica Cordillera Occidental, presenta mayores valores de precipitación 220 mm hasta 350 mm en la cabecera de la cuenca Caplina. Lo que indica que la precipitación que genera escorrentía se da en esta unidad geomorfológica Cordillera.

Según INRENA (2002), las variables climáticas son: la temperatura, humedad relativa, horas de sol, velocidad del viento y la evaporación. La temperatura de la cuenca obedece a un gradiente inverso, es decir que a mayor altitud menor es la temperatura y a menor altitud mayor es la temperatura. La información de temperatura ostenta poca variabilidad interanual. La temperatura media anual que se da en la zona de estudio disminuye en relación con la altitud, siendo de 12° a una cota de 3 000 msnm, presentando máximas temperaturas de 22°C en verano y mínimas desde 4°C en invierno; mientras que para altitudes mayores a 4 000 msnm la temperatura media alcanza los 3°C y con unas máximas de 20°C en verano y las mínimas -15°C en invierno.

b. Parámetros Geomorfológicos

En la tabla 22 se observan los parámetros geomorfológicos estimados para la quebrada Lluta-concesión minera Karla de Tacna. Además, se presentan los gráficos de la curva hipsométrica y del histograma de frecuencias.

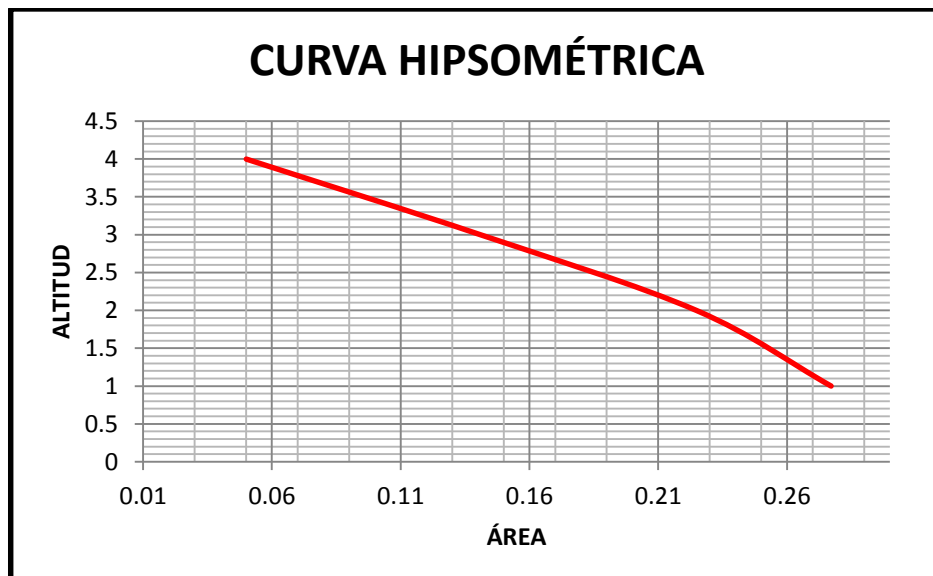


Figura 20. Curva hipsométrica e histograma de la quebrada

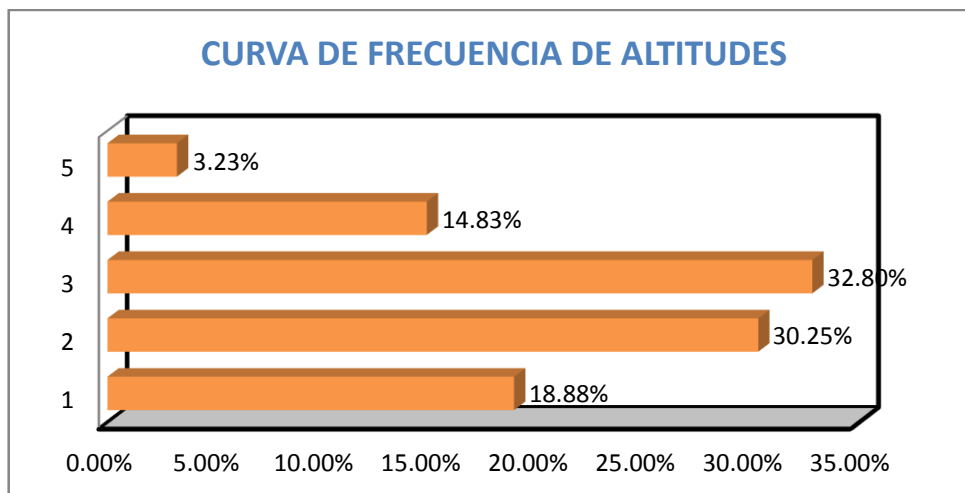


Figura 21. Histograma de frecuencias altimétricas de la quebrada

Tabla 22. Cuadro resumen de las características morfológicas

PARAMETROS GEOMORFOLÓGICOS		SIMBOLOGÍA	UNIDADES	CUENCA CAPLINA
1. CÓDIGO PFAFSTETTER		-	-	-
2. SUPERFICIE O ÁREA		A	km ²	0.28
3. PERÍMETRO		P	km	2.16
4. FORMA DE LA CUENCA	4.1. COEFICIENTE DE COMPACIDAD	Kc	-	1.14
	Interpretación	-	-	Oval redonda o Oval Ablonga
	4.2. RELACIÓN DE ELONGACIÓN	Re	-	0.84
	Interpretación	-	-	Relieves fuertes, con pendientes pronunciadas.
	4.3. FACTOR DE FORMA	Kf	-	0.55
	Interpretación	-	-	forma rectangular o alargada
	5.2. CURVA HIPSOMÉTRICA	-	-	JOVEN
	5.3. ELEVACIÓN MEDIA	Em	m.s.n.m	1825.27
	5.4. PENDIENTE MEDIA	Sc	%	31.06

	5.5. PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL	Sm	%	1.52
6. CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE DRENAJE	6.1. ORDEN DE CORRIENTES	Oc	-	5
	6.3. DENSIDAD DE DRENAJE	Dd	Km/Km2	45.78



Figura 22. Imagen satelital de la concesión minera Karla de Tacna.

c. Precipitación máxima de 24 horas (P24)

Debemos tener presente que para una mejor labor al momento de la simulación de hidrogramas, se ha considerado la estación de precipitación más cercana con más datos y una estación pluviográfica representativa, para este trabajo se tomó datos de la estación Palca, (Anexo 02). Las precipitaciones máximas en 24 horas para tiempo de retorno de 50 y 100 años correspondientes a la zona de estudio.

Precipitaciones para diferentes periodos de retorno

Tr (años)	P24 (mm)
50	103.63
100	118.65

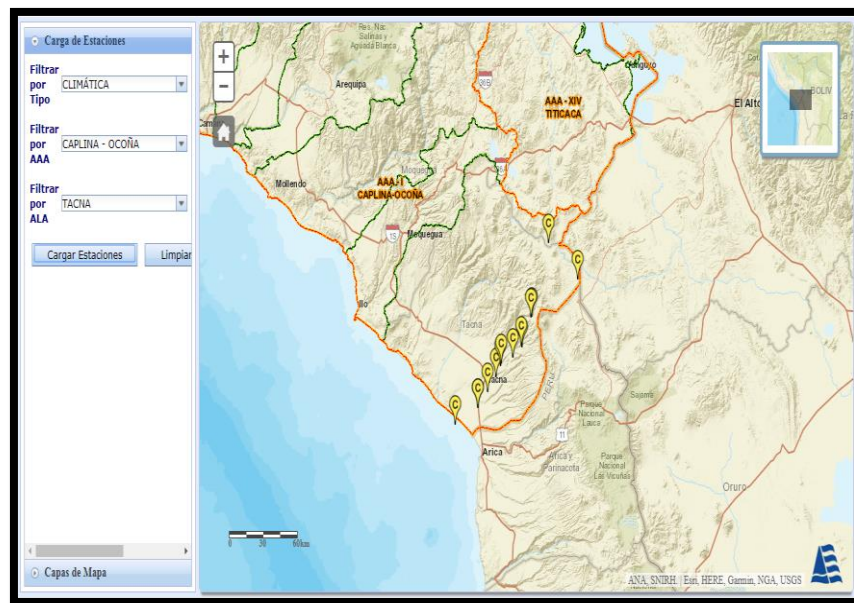


Figura 23. Mapa de ubicación de estaciones de precipitación

Celdas de Precipitación concentrada

Son aquellas lluvias puntuales que caen localmente sobre una zona específica y producen huaycos. Esta lluvia no es registrada por las estaciones meteorológicas debido a que se trata de un fenómeno local e instantáneo.

Para la modelación del flujo de escombros se tiene que estimar la celda de precipitación concentrada para el cual se produciría el huayco en la quebrada Lluta. Esta precipitación se va a estimar por medio de las

precipitaciones máximas de los registros históricos en la cuenca del río Caplina.

Para el cálculo del hidrograma de avenida, tomaremos como precipitación máxima de 24 horas (P24) la de 103.63 mm y 118.65 mm para tiempo de retorno de 50 y 100 años.

d. Tiempo de retardo

Tabla 23. Cálculo del Tiempo de retardo (Tr)

MÉTODO DE KIRPICH - TIEMPO DE CONCENTRACIÓN			
$t_c = 0.066 * L^{0.77} * S^{-0.385}$ [horas]			
L (Km) =longitud	1.004	$t_{conc} =$	0.33 horas
S (m/m) =Pendiente del cauce	0.015	$t_{conc} =$	19.91 min
A (km ²) =Área de la cuenca	0.278	$tr =$	11.95 min

e. Número de curva (CN).

El factor CN depende del tipo de suelo, de la naturaleza y cobertura del suelo y las condiciones previas de humedad. El Soil Conservation Service ha publicado extensas y amplias investigaciones sobre este factor y presenta tablas para seleccionar el valor más representativo de cada situación, (Tabla 12).

La infiltración del terreno varía bastante en función de la permeabilidad del suelo y las condiciones de la superficie. El método distingue 4 tipos de suelos (A,B,C y D). El suelo de tipo A corresponde a suelos arenosos o limo-arenosos con bajo potencial de escurrimiento, son suelos con buen drenaje y conductividades hidráulicas del orden de 7 mm/hr. Los suelos tipo B tienen tasas de infiltración moderadas y son de tipo limoso, sus conductividades hidráulicas son del orden de 3 a 6 mm/hr. Los suelos C tienen baja capacidad de infiltración cuando están saturados y son limos arcillosos con algo de arena. Finalmente los suelos tipo D tienen un alto potencial de escurrimiento y pequeña infiltración. Están formados por suelos finos arcillosos o limosos, con conductividades hidráulicas del orden de 1 mm/hr.

Asignando un tipo de suelo hidrológico “A” (característico para la quebrada), y de uso de suelos se obtiene un valor de CN igual a 65.

En el cálculo del hidrograma líquido se empleará el valor del número de curva (CN) igual a 65, y la denominamos “curva calculada”.

e. Hidrograma de avenida líquido (INFLOW)

Para la estimación del hidrograma de avenida, utilizaremos el modelo hidrológico HEC-HMS. La razón por la cual hemos elegido este software es debido a que se trata de un programa de uso libre y reconocido en otras

partes del mundo. Para el cálculo del hidrograma de avenida se empleará la metodología del Soil Conservation Service (SCS) debido a que es uno de los métodos más sencillos para el cálculo de un Hidrograma de avenida.

Para el inicio del modelamiento con el software mencionado se requiere la especificación de 3 conjuntos de datos:

- Modelo de Cuenca
- Modelo Meteorológico
- Especificaciones de Control

Modelo de Cuenca: Contiene los parámetros de los elementos hidrológicos como por ejemplo: subcuencas, tramo de cauce, convergencias, reservorios, fuentes y sumideros.

El primer paso es dibujar el esquema hidrográfico a simular. Los elementos utilizados para definir nuestra microcuenca son: sub-cuenca (sub basin), cauce (reach) y la confluencia (junction), (Fig. 24).

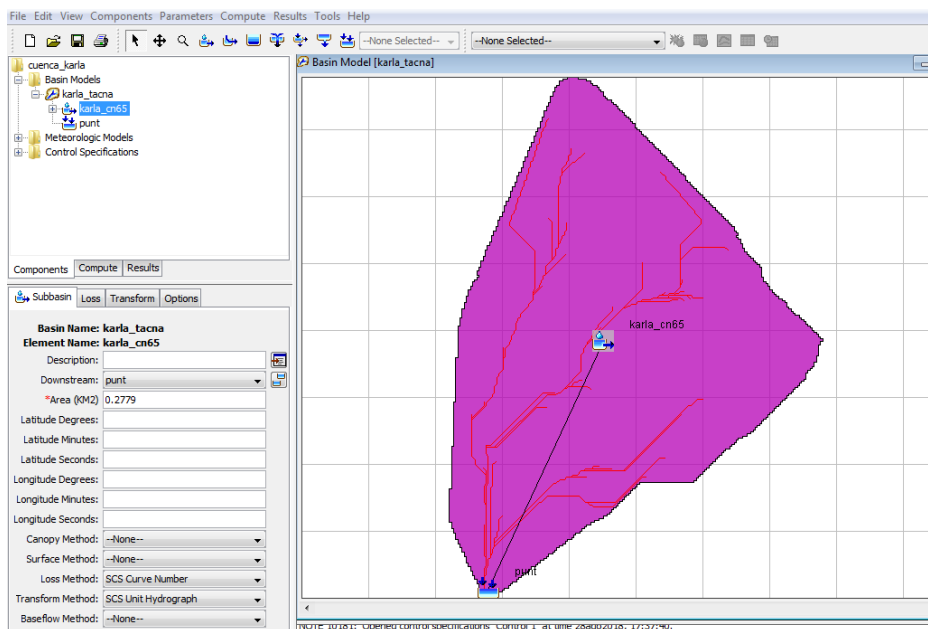


Figura 24. Modelo de Cuenca.

Como datos adicionales debemos completar las características de la subcuenca y la metodología de análisis para el cálculo del hidrograma.

Se utilizará el método SCS para abstracciones, para estimar la pérdida inicial, debido a que depende solo de una variable conocida CN. La pérdida inicial (mm) es igual a $0.20x (25400-254CN)/CN$ (Fig. 25). El valor de pérdida inicial en el HEC-HMS se calcula por defecto para el método de SCS.

Adicionalmente emplearemos el hidrograma unitario adimensional de SCS, para el cálculo del hidrograma sintético cuyo dato de entrada

depende del tiempo de retardo (T_r) calculado (Tabla 23). Además, no se considerará flujo base.

La precipitación máxima en 24 horas se ha considerado de estudios y cuencas vecinas y podemos establecer que los siguientes valores son representativos para la zona de estudio, (Fig. 25).

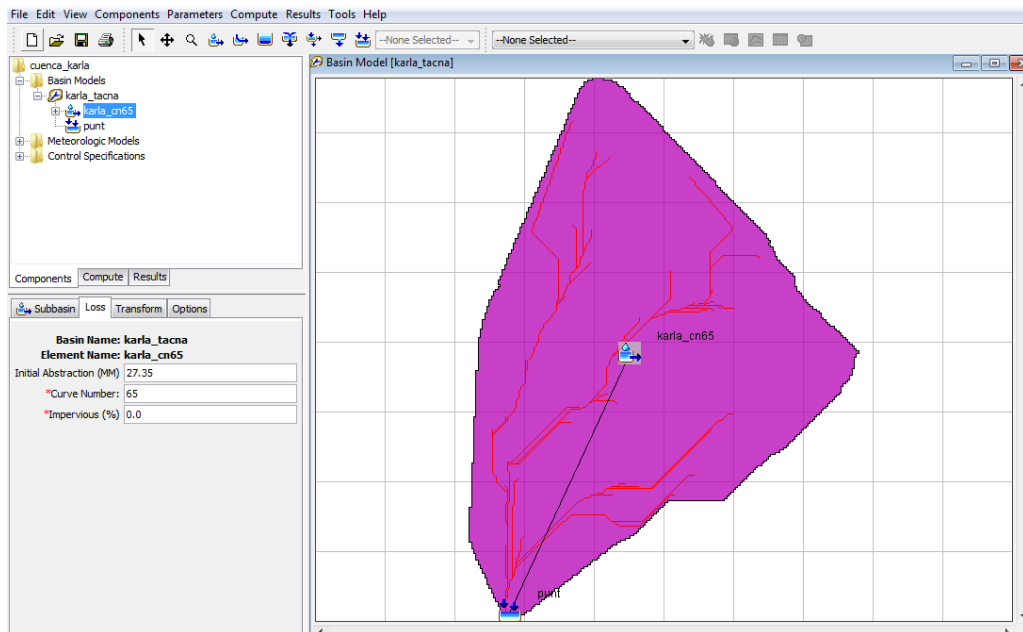


Figura 25. Método SCS

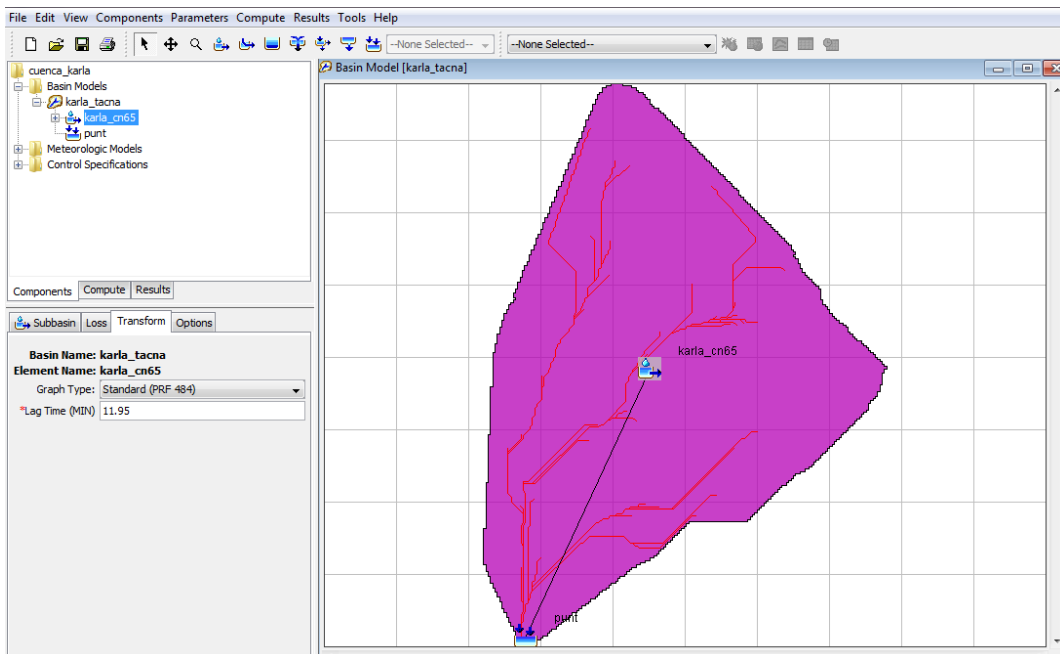


Figura 26. Método SCS - Tiempo de retardo

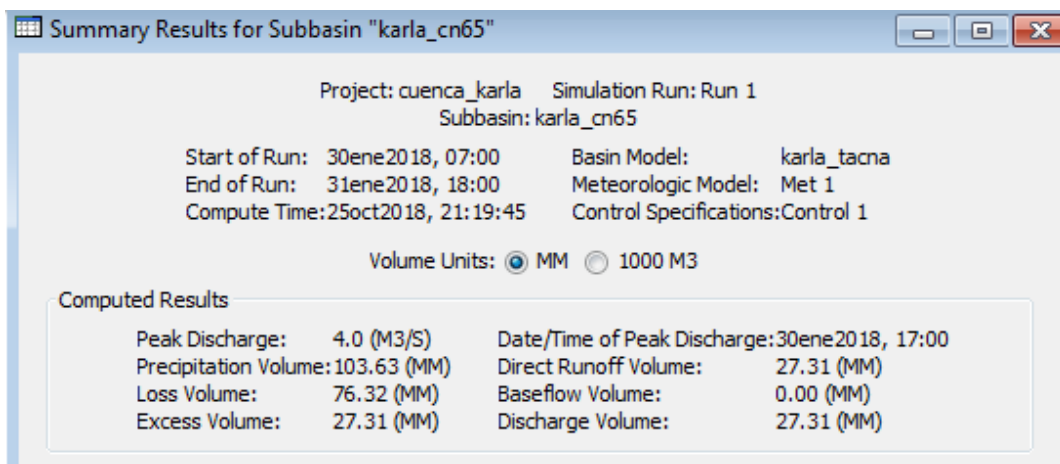


Figura 27. Cálculo del hidrograma líquido para CN=65, TR= 50 años ($Q_{pico}=4 \text{ m}^3/\text{s}$)

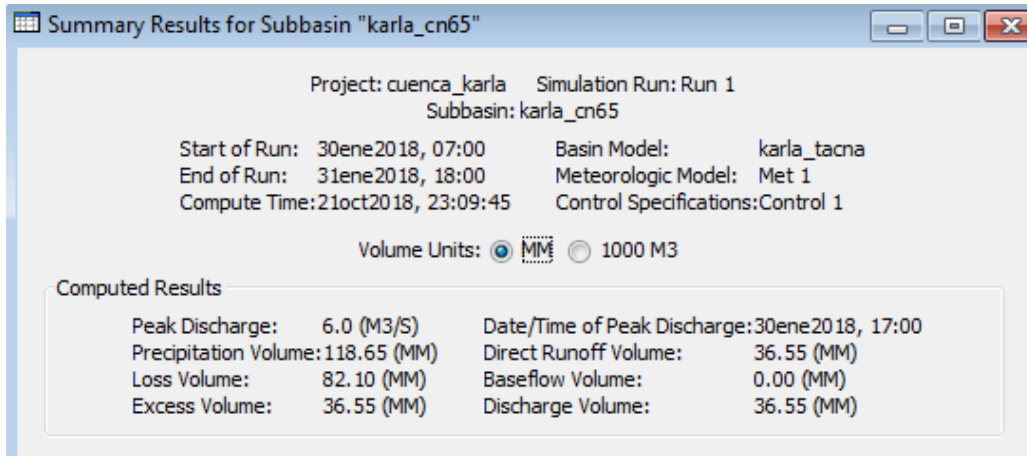


Figura 28. Cálculo del hidrograma líquido para CN=65, TR= 100 años, ($Q_{pico}=6 \text{ m}^3/\text{s}$)

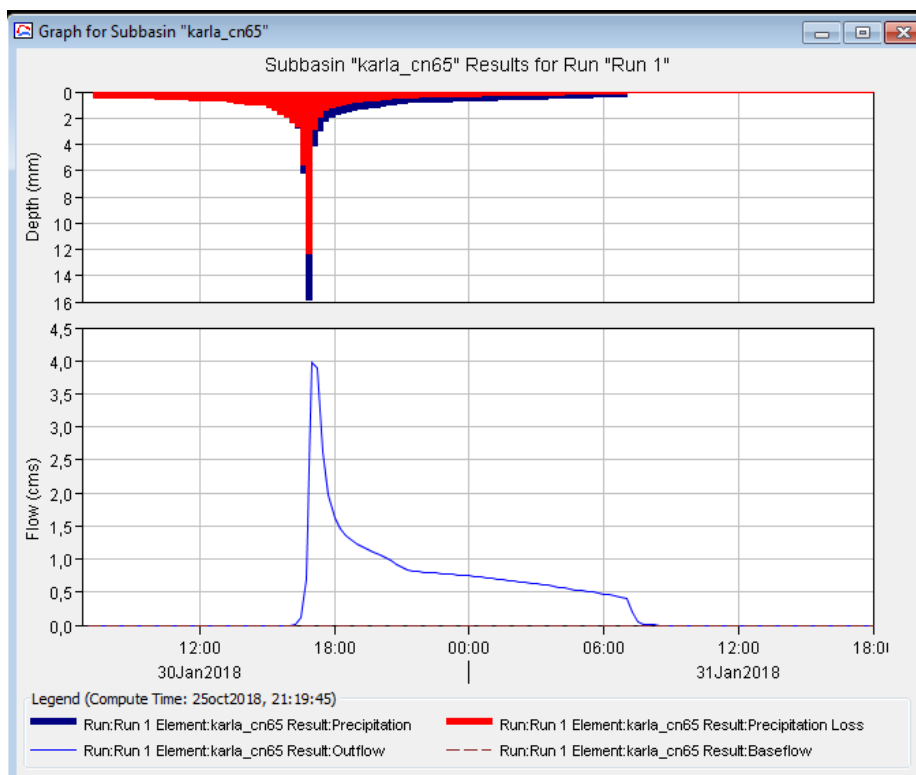


Figura 29. Hietograma e Hidrograma líquido Obtenido Con El Hec-Hms para $tr=50$ años

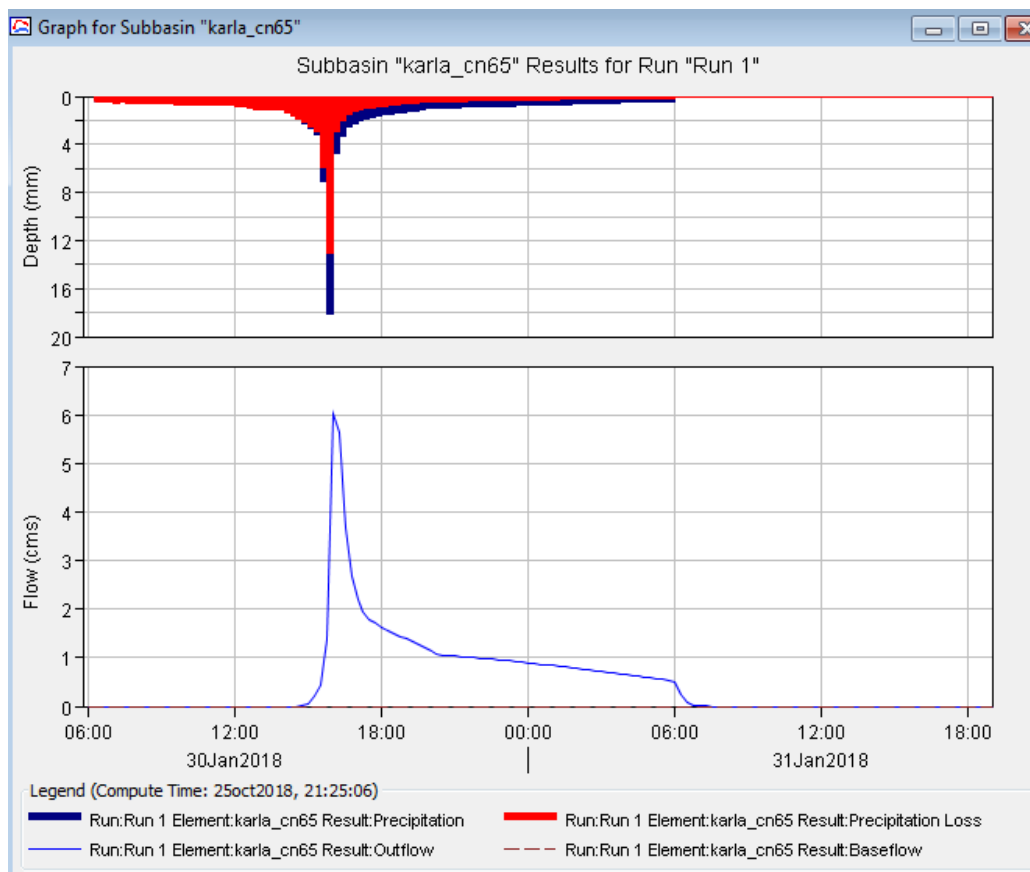


Figura 30. Hietograma e Hidrograma liquido Obtenido Con El Hec-Hms para $tr=100$ años

f. Coeficiente de rugosidad de Manning

Los valores de rugosidad que se utilizaron en la zona de estudio se pueden apreciar en el siguiente cuadro elaborado.

Tabla 24. Valores de rugosidad del suelo, Flo-2D Users Manual (2009)

Valores de rugosidad n Manning para Flujos Densos	
Superficie	n-valor
Césped denso	0.17 - 0.80
Hierba densa, vegetación densa	0.17 - 0.48
Arbustos y basura forestal, pasto	0.30 - 0.40
Suelo cubierto de hierba media	0.20 - 0.40
Suelo cubierto de hierba pobre en superficie áspera	0.20 - 0.30
Hierba de pradera corta	0.10 - 0.20
Vegetación escasa	0.05 - 0.13
Tierra de variedad escasa con escombros	0.09 - 0.34
Campos arados o cultivados sin residuo de hierbas	0.008 - 0.012
Arado de Cincel de cultivo convencional	0.06 - 0.22
Tierra abierta con escombros	0.10 - 0.20
Flujo Playo en asfalto o hormigón	0.10 - 0.15
Tierra abierta, ningunos escombros	0.04 - 0.10
Asfalto o hormigón	0.02 - 0.05

3.3.6. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

a. Análisis Granulométrico completo y Límites de Consistencia

Para el estudio de flujos hiperconcentrados en la zona se tomó muestras de la matriz de flujo de escombros en el cauce principal (CI-01). Con estas muestras se han realizado análisis granulométrico y determinación de los límites de Atterberg. El análisis de la excavación indica que el suelo existente es de tipo GM (Grava Limosas).

La fracción fina no presenta plasticidad pero presenta cohesión baja por tratarse de suelos arenosos. (Anexo 01).

b. Contenido de Humedad, Gravedad Específica

También se han realizado pruebas de contenido de humedad y gravedad específica del sedimento. Estas pruebas fueron realizadas en el laboratorio de mecánica de suelos en la facultad de ingeniería. (Anexo 01).

CAPITULO IV. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Una vez conocido las características principales de la quebrada y el tipo de flujo que discurre por ella, procedemos al ingreso de datos al modelo FLO 2D (O'Brien, 2006.10).

4.1. SIMULACIÓN CON EL MODELO NUMÉRICO HIDRÁULICO

4.1.1. INFORMACIÓN BÁSICA

Se recopilaron fotografías satelitales Landsat 8, topografía digital, planos topográficos, hidrogramas de caudal líquido y estudios previos, posteriormente, se procesaron para la obtención de la información básica para el desarrollo del estudio.

a. Fotografía Satelital

Para el estudio de la micro-cuenca se obtuvieron las fotos satelitales Landsat7 gratuitas de la página web <http://reverb.echo.nasa.gov> con una resolución espacial de 12.50m x 12.50m Georeferenciadas en el sistema de proyección UTM 19S y Datum WGS1984.

b. Planos Topográficos

Sobre la base topográfica se delimitó la zona de estudio, mediante SIG (Sistema de Información Geográfica) se determinó los parámetros morfológicos del área de estudio y se obtuvo la longitud y perfil longitudinal del cauce principal. Para algunos análisis restantes se procedió a conceptos básicos de teledetección y procesamiento de imágenes satelitales con resolución de 12.5m x 12.5m. Para la representación espacial de datos se obtuvieron modelos digitales de elevación (DEM) gratuitas de la página web <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/> (ASTER GDEM) de resolución por pixel de 12.5m x 3m y procesadas con Arcgis y georeferenciadas en el sistema de proyección UTM 19S y Datum WGS1984.

c. Hidrología

Del ítem 3.3.5 de la presente tesis, se obtuvieron los hidrogramas de caudal líquido para la precipitación. Además, se analizarán 2 escenarios para un TR=50 años y para un TR=100 años. En la tabla 25. Se indican los caudales máximos para ambos escenarios.

Tabla 25. Caudales Máximos

Caudales Máximos (m^3/seg)	
TR=50 años	TR=100 años
4	6

d. Fotografías de campo

Se han obtenido diversas fotografías de campo, para validación y calibración de modelo hidráulicos FLO 2D.

4.1.2. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN CON EL FLO-2D

En la Figura 31 se muestra el diagrama de flujo a seguir para el caso de simulaciones de flujos escombros aplicando el FLO-2D. Como primer paso para la simulación es procesar lo topografía existente.

Una vez obtenido el Modelo de Elevación de Terreno (DEM), se exporta la topografía al preprocesador GDS (System Developer Grid) que nos ayuda a definir las grillas utilizadas para la simulación. Dentro del preprocesador (GDS) una vez obtenido las grillas y la delimitación de la zona, se procede a asignar los coeficientes de Manning y la ubicación del hidrograma de entrada (INFLOW) en la grilla correspondiente. Finalmente se crea una malla de grillas cuadradas, donde cada celda posee una cota y un coeficiente de Manning asignado. Además en la parte baja de la quebrada, se definen las grillas que son salidas de flujo (OUTFLOW).

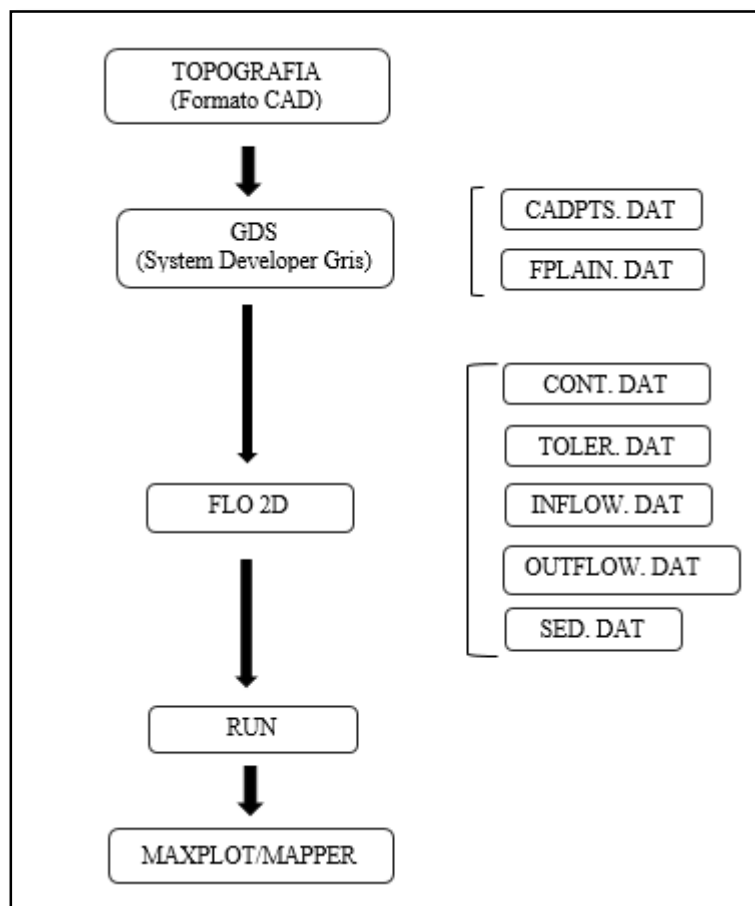


Figura 31. Diagrama de flujo utilizado en el programa FLO-2D.

Para la modelación de un flujo de escombros con el programa FLO 2D se requiere como mínimo 7 archivos cuya extensión es *.DAT. las cuales son:

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:

- CONT.DAT: Archivo principal del programa, aquí se define el tiempo de simulación y el proceso físico a analizar. Para nuestro caso el proceso a ser simulado es *Mud/Debris* ó flujo de lodo y escombros.
- TOLER.DAT: Donde se indican las variables de control del sistema y se define la ecuación de momentum, *Full Dynamic Wave* y los coeficientes de estabilidad para la onda dinámica. También se indica el paso de tiempo utilizado (*Timestep*).
- INFLOW.DAT: Donde 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.
- OUTFLOW.DAT: 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 éste completa aguas abajo.
- SED.DAT: Donde se indican las propiedades reológicas del flujo de escombros. Las propiedades reológicas dependen del tipo de

material existente en la quebrada y si se trata de un flujo muy viscoso o granular. Dentro de este archivo, debemos definir los coeficientes de viscosidad 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 escombros para la quebrada respectiva.

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

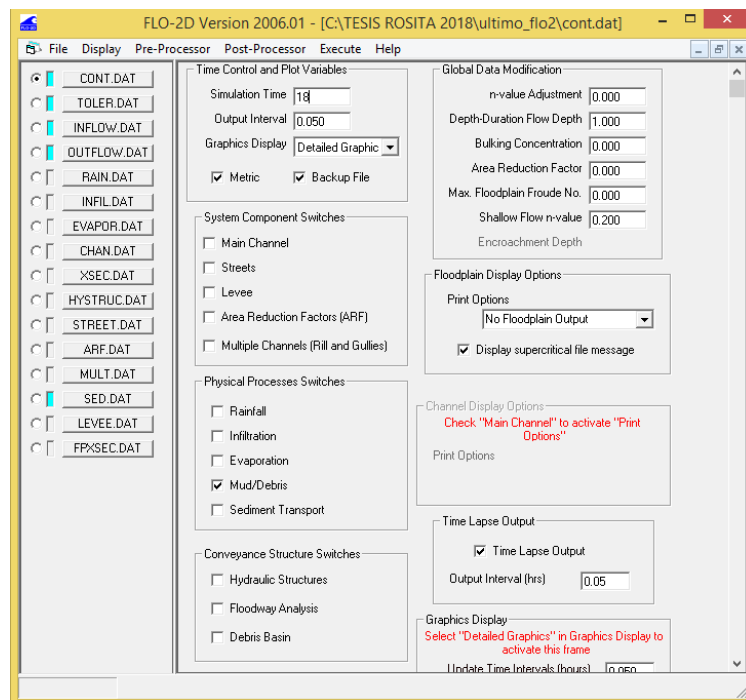


Figura 32. Ventana principal del FLO 2D

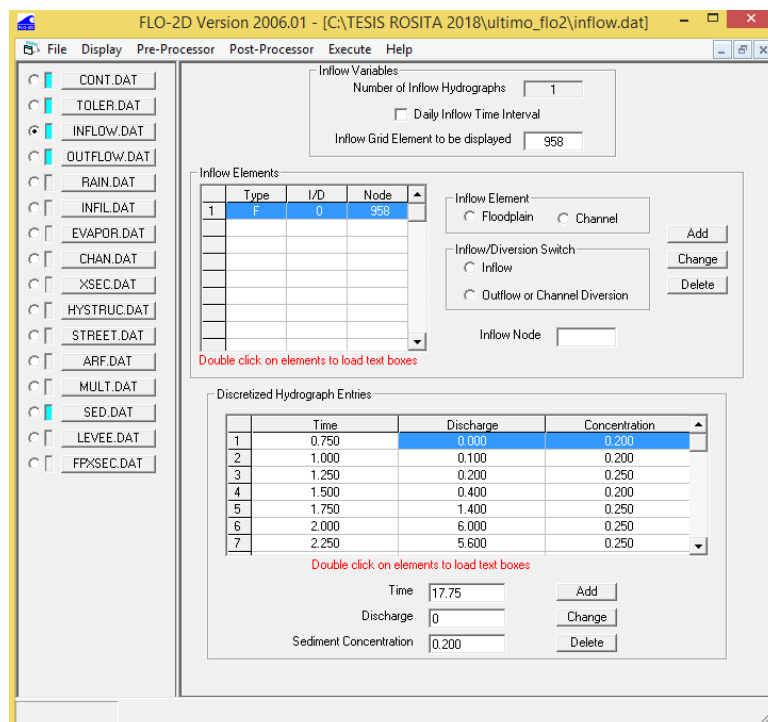


Figura 33. Archivo INFLOW.DAT en la ventana principal del FLO 2D

4.1.3. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

El plano base topográfico para la simulación cuenta con curvas cada 10 metros para la zona correspondiente a la mina Karla de Tacna. Para la simulación se generó una malla de 2239 celdas de 10m x 10m cada uno, cubriendo el área de inundación.

Como elemento principal para la simulación se introdujeron el hidrograma de caudal líquido proveniente con su respectiva distribución de concentración de sedimentos, propiedades del sedimento y parámetros geológicos.

Los parámetros característicos del sedimento y reológicos, se fijaron de acuerdo a la experiencia en otros países, donde se han calibrado con cuencas experimentales (O'Brien, 2003).

Las siguientes características (parámetros de entrada) para la simulación, son similares para los demás escenarios, variando la introducción de los hidrogramas líquidos que varían de acuerdo al tiempo de retorno (50 y 100 años).

- Se aplicó el modelo bidimensional FLO-2D para la simulación del flujo hiperconcentrado de barro y escombros, utilizando las ecuaciones que gobiernan el movimiento en su expresión más completa (onda dinámica), (O'Brien et al., 2000).

- Para la simulación se consideraron concentraciones de sedimentos que varían entre 20% y 25%.
- El hidrograma de caudal líquido con la respectiva concentración volumétrica de sedimento, se coloca como condición de borde en la celda 958 donde la quebrada alcanza la cota 1861.19 msnm.
- Para el parámetro de rugosidad “n” de Manning, se asignó un valor de 0.025.
- Los parámetros reológicos del fluido se fijaron en función de la similitud encontrada entre las muestras recolectadas de campo y las muestras tipo de la literatura. La muestra analizada no presenta límite líquido ni límite plástico (ver Anexo), entonces, la muestra utilizada para la modelación se asemeja a un material de la muestra de Glenwood sample 2, cuyo resultado es conservador, debido a que éste tipo de muestra no presenta límite líquido, ni índice de plasticidad.
- Las muestras tipo, provenientes de la literatura, fueron recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs, USA. La característica principal de las muestras tipo Glenwood sample 2, poseen poca cantidad de arcilla; por ejemplo la Glenwood sample 2 no tienen índice Plástico (IP).

- La Gravedad específica (Gs) del sedimento es igual a 2.65
- Se analiza un tiempo de simulación de 18 hrs para un hidrograma líquido con tiempo de retorno de 100 años.

4.1.4. SIMULACIÓN DEL FLO-2D EN LA MINA KARLA DE TACNA

Una vez conocido los parámetros reológicos característicos de la quebrada provenientes de la calibración del modelo, se procede a simular bajo éstas condiciones. Para ello se empleará la topografía digitalizada a escalas detallada (curvas cada 10 m), las cuales se procesaron en un programa de Sistema de Información Geográfica (ARCGIS), para generar puntos de elevación por cada celda empleada, vale decir, que las líneas de las curvas de nivel se convirtieron a puntos.

Una vez obtenida dicha información se procedió a introducirla al modelo FLO-2D mediante la opción GDS, para posteriormente generar las celdas para la simulación.

Se creó una grilla con celdas de 10 x 10 metros, teniendo un total 2239 celdas. Una vez creadas las celdas, se procede a interpolar las alturas de las celdas de la grilla, ya que no siempre dentro de una celda va a haber un punto de elevación, entonces al interpolar las alturas, las celdas que no tienen puntos de elevación, toman un promedio de sus cuatro celdas vecinas, creando un margen de error, el cual deberá de ser corregido

manualmente priorizando las zonas más importantes del área a simular (Fig. 34).

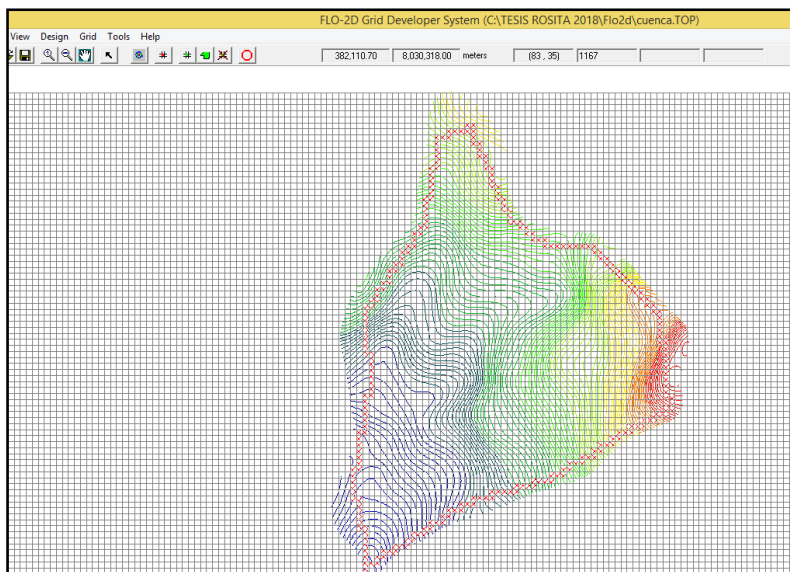


Figura 34. Creación de grilla e interpolación de alturas en la simulación

Para que el flujo no se estanque donde las curvas topográficas bordeen el límite de la zona de simulación o por criterio se delimite la zona final de la simulación, se pone elementos de salida (Outflow), así el programa interpretara que no existe un impedimento para que el flujo se acumule y continúe fluyendo.

Una vez preparado todo el escenario para la simulación de flujos, se procede a rellenar los datos más importantes en la ventana previa a la simulación (Fig. 35), donde se indica el tiempo de duración del hidrograma líquido, el tipo de flujo, el modo de visualización de la

simulación ya sea gráfico o texto, intervalos de actualización del tiempo en la simulación, entre otros; todos estos datos se encuentran propuestas por O'Brien en el manual del FLO 2D.

Figura 35. Introducción de parámetros correspondientes al escenario a simular

Una vez comprobados los datos mediante verificación manual, procedemos a correr el FLO-2D, donde aparecen dos ventanas, la primera que nos muestra como el flujo se está desplazando por el cauce de la quebrada y la segunda es una representación gráfica del hidrograma

propriadamente dicho (Fig. 36). 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. Las simulaciones realizadas para cada escenario presentaron un tiempo de duración hasta 18 horas.

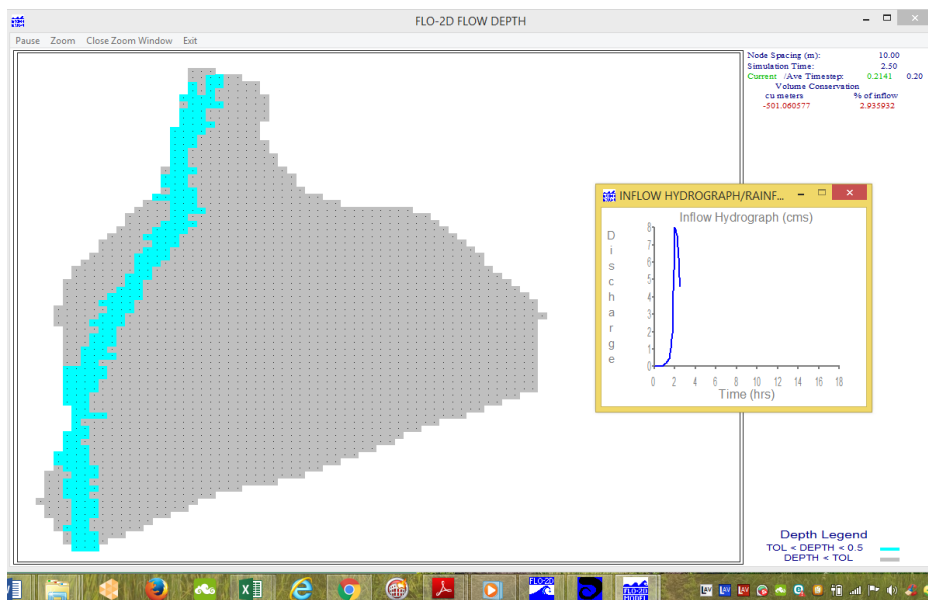


Figura 36. Ventana de FLO 2D, se aprecia en color celeste la simulación del flujo, mientras que en la ventana pequeña cómo se desarrolla el hidrograma.

4.1.5. UTILIZACIÓN DEL POST PROCESOR (MAPPER) EN EL FLO 2D

El Post Procesador es la parte del FLO-2D que se usa para el tratamiento de los datos generados, los cuales se explicaron en el ítem anterior.

Con este programa, uno puede acceder a los datos de velocidad del flujo, altura máxima de los flujos (picos), dirección preferencial que tomaron

los flujos, generar mapas de peligros digitales según los parámetros del escenario simulado.

a. Partes del mapper

a. *Mapa de elevación de la superficie del terreno*

Identificado con el primer botón en la barra de aplicaciones, que muestra como es la elevación digital de la superficie del terreno. Estas diferencias de elevaciones están representadas en la escala de colores ubicada al extremo derecho de la figura 37 indicando las variaciones de altitudes mediante una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una cota más baja, hasta el rojo para los elementos de grilla con una cota más alta, mientras que en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.

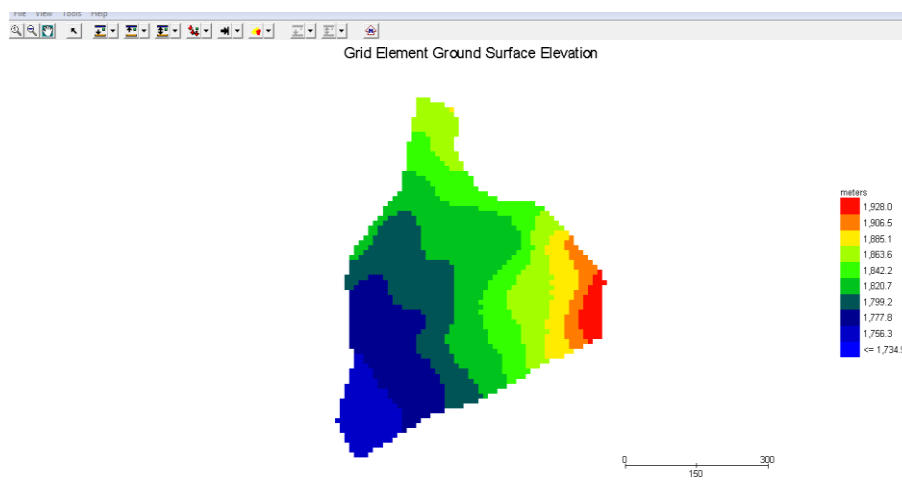


Figura 37. Elevación de la superficie del terreno, según sus elementos de grilla

b. Mapa de máximas elevaciones del agua en la superficie del terreno



Identificado con el segundo botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 38).

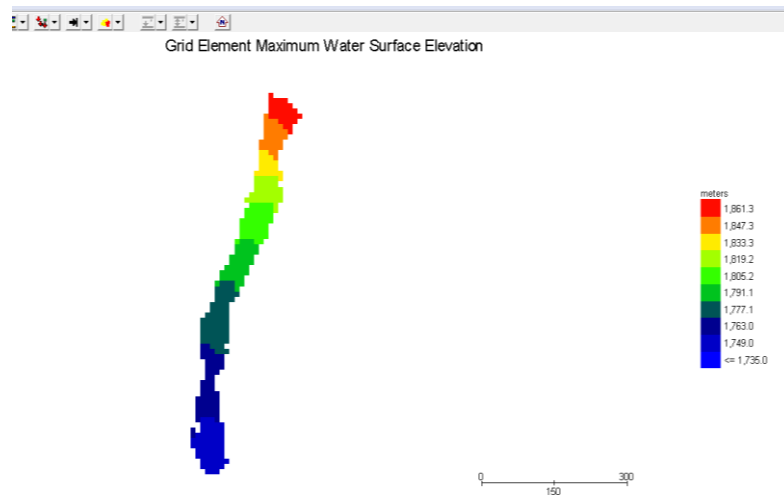


Figura 38. Máxima elevación de la superficie de agua en el terreno, según sus elementos de grilla

Estas diferencias de elevaciones están representadas por una gradación de colores variando desde el azul para los elementos de grilla con una elevación de agua menor, hasta el rojo, para los elementos de grilla con una elevación de agua mayor. En el extremo derecho nos muestra una escala de colores que nos indica las variaciones de altitudes del agua, mientras que en el extremo inferior

derecho nos muestra una escala grafica que nos indica las dimensiones del terreno.

c. Mapa de máximas profundidades del flujo en el terreno 

Identificado con el tercer botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 39).

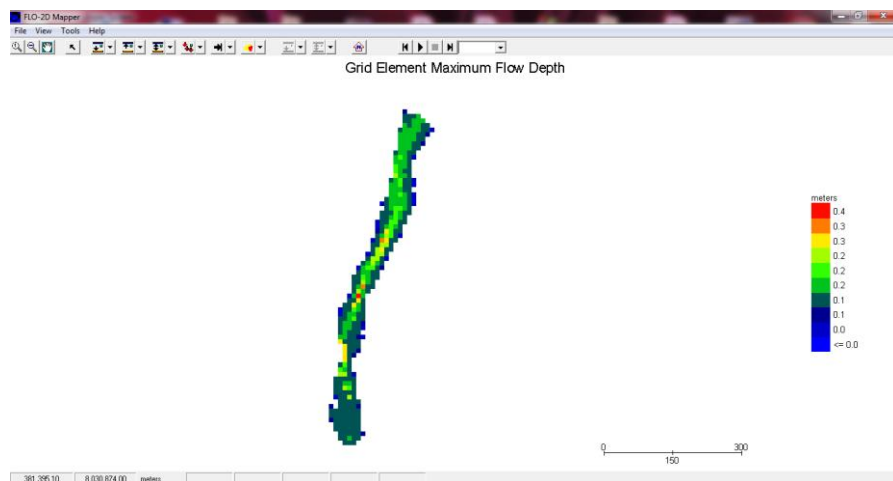


Figura 39. Profundidad de flujo máxima en el terreno, según sus elementos de grilla

Estas diferencias de elevaciones están representadas en la escala de colores ubicada en el extremo derecho de la Figura 40, indicando las variaciones que van desde el azul para los elementos de grilla con una profundidad de flujo menor, hasta el rojo, para los elementos de grilla con una profundidad de flujo mayor, mientras que en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno, gradación de colores.

d. Mapa de máximas velocidades del flujo en el terreno



Identificado con el cuarto botón en la barra de aplicaciones, aquí nos muestra como es la máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla (Fig. 40).

Estas diferencias de velocidades están representadas en la escala de colores ubicada en el extremo derecho de la Figura 38, indicando las variaciones de velocidad del flujo mediante una gradación de colores variando desde el color azul para los elementos de grilla con una velocidad de flujo menor, hasta el rojo para los elementos de grilla con una velocidad de flujo mayor, mientras que en el extremo inferior derecho nos muestra una escala gráfica que nos indica las dimensiones del terreno.

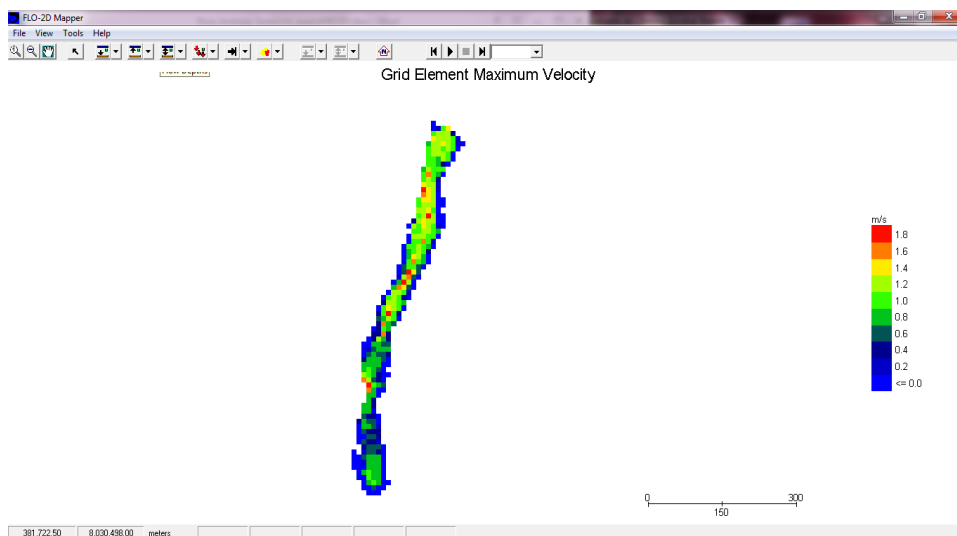


Figura 40. Máxima velocidad del flujo en el terreno, según sus elementos de grilla

d.1. Mapa de máximas velocidades del flujo en el terreno expresado en vectores.

Este mapa muestra las direcciones preferenciales de los flujos con su velocidad mediante vectores de movimiento. Nos da una flecha principal que muestra un resumen del movimiento y dirección del flujo en un punto determinado, también muestra flechas de diferentes dimensiones, lo cual nos indica en qué zonas, el flujo, toma mayores velocidades y direcciones preferentes (Fig. 41).

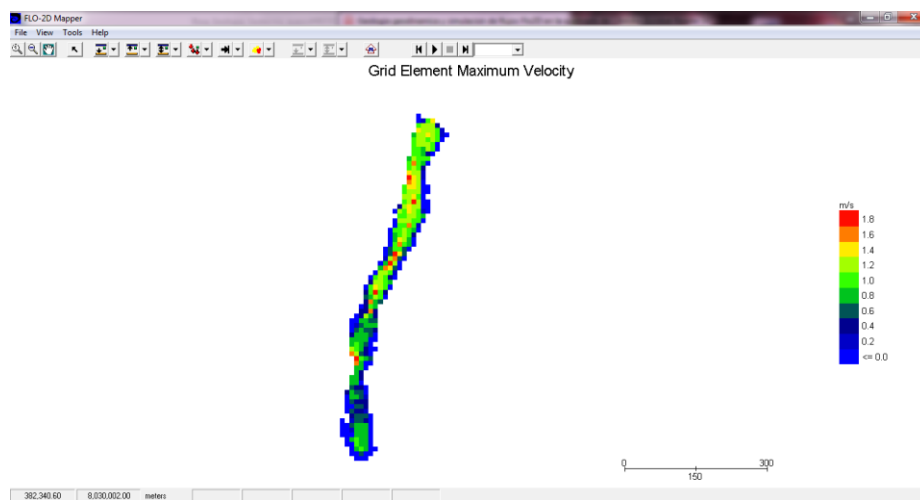


Figura 41. Máxima velocidad del flujo en el terreno expresado en vectores

e. Mapa de peligros digital 

Esta es una de las opciones más importantes de la modelación FLO 2D, mediante la ejecución de la ventana MAPPER, en la cual de acuerdo a los datos simulados y cálculos previos realizados por el

software, se genera un Mapa de Peligros Digital, para los cual toma en cuenta los parámetros de altura, velocidad, profundidad que el flujo presento en todo su recorrido, para finalmente asignar una coloración a cada celda, indicando un determinado grado de peligro que representa cada zona de área simulada (Fig. 42). Las zonas con diferentes amenazas se diferencian entre sí mediante lo colores rojo, anaranjado y amarillo según la amenaza sea alta, media o baja.

Intensidad (m)	Máxima profundidad (m)	Máxima profundidad por velocidad máxima(m ² /s)
Alto	$h > 1,0$ m	$v h > 1,0$ m ² /s
Media	$h < 1,0$ m	$v h < 1,0$ m ² /s
Baja	No existe para este fenómeno (mud/deris flow)	

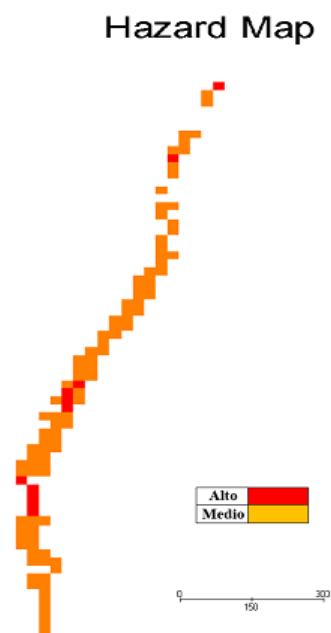


Figura 42. Mapa de Peligros digital, generado con el software FLO-2D, expresado en polígonos

CAPÍTULO V. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL FLO-2D Y CALIBRACIÓN CON EVIDENCIAS DE CAMPO

En este capítulo se presentaran los resultados gráficos y numéricos de la simulación de los diferentes escenarios como: volúmenes finales simulados, mapa de elevaciones, velocidades y profundidades máximas y el mapa de peligros correspondiente para cada escenario.

Una vez terminada la simulación, el FLO-2D crea un archivo llamado SUMMARY.DAT, el cual muestra los resultados finales, donde se observa un resumen de los tiempos simulados, caudales, etc.

5.1. ESCENARIOS SIMULADOS

Se realizaron dos simulaciones para escenarios que presenten hidrogramas líquidos con tiempos de retorno (TR) de 50 y 100 años, cuyos resultados serán presentados y descritos a continuación.

5.1.1. TIEMPO DE RETORNO (TR = 50 años)

Este primer escenario se realizó con un hidrograma líquido con un caudal pico de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, para un tiempo de retorno de 50 años, y una concentración de sedimentos 35 %, cuyos resultados se presentan a continuación (Tabla 26).

Tabla 26. Salidas del programa FLO-2D ($Qlp=4 \text{ m}^3/s$)

Flujo	Agua (m³)	Agua con sedimentos(m³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	46802.62	72004.03
Almacenamiento dentro del área de análisis	2388.18	3674.10
Flujo fuera del área de simulación	44458.35	68397.39

El volumen total de la crecida simulada es de 0.12 Hm^3 , de los cuales 0.04 Hm^3 son agua y 0.07 Hm^3 corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 25300 m^2 .

a. Elevación del terreno por grilla

Nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 43).

Grid Element Ground Surface Elevation

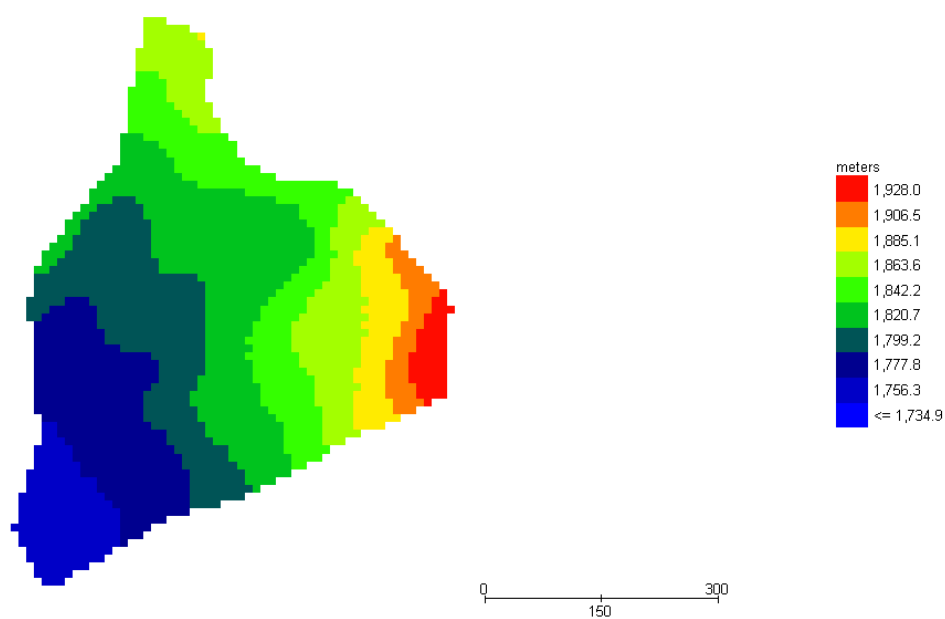


Figura 43. Elevación del terreno

b. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se observan las cotas o alturas del terreno que fueron invadidas por el fluido (agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 44).

Grid Element Maximum Water Surface Elevation

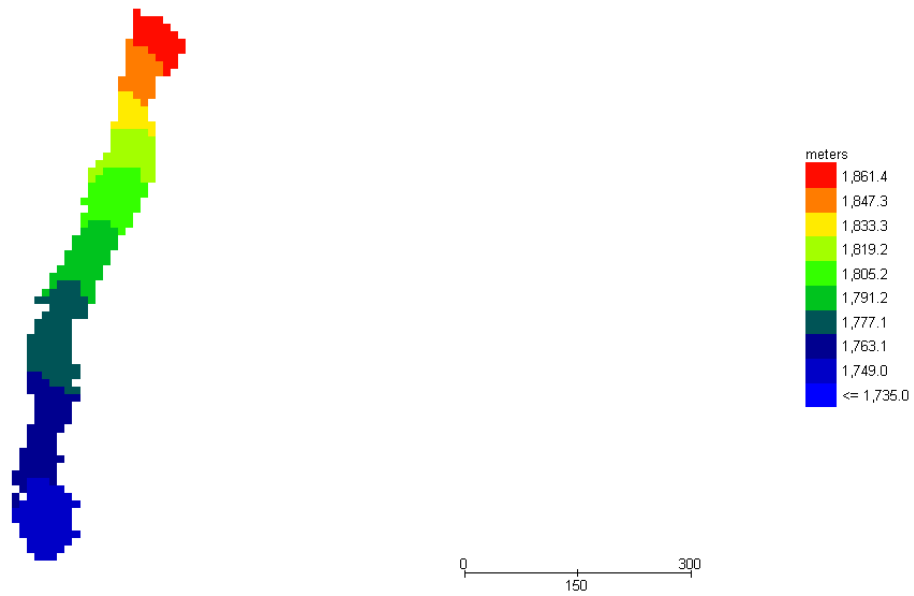


Figura 44. Máxima elevación del agua en el terreno

c. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno. La altura varía de 0.1 a 0.5 m. (Fig. 45).

Grid Element Maximum Flow Depth

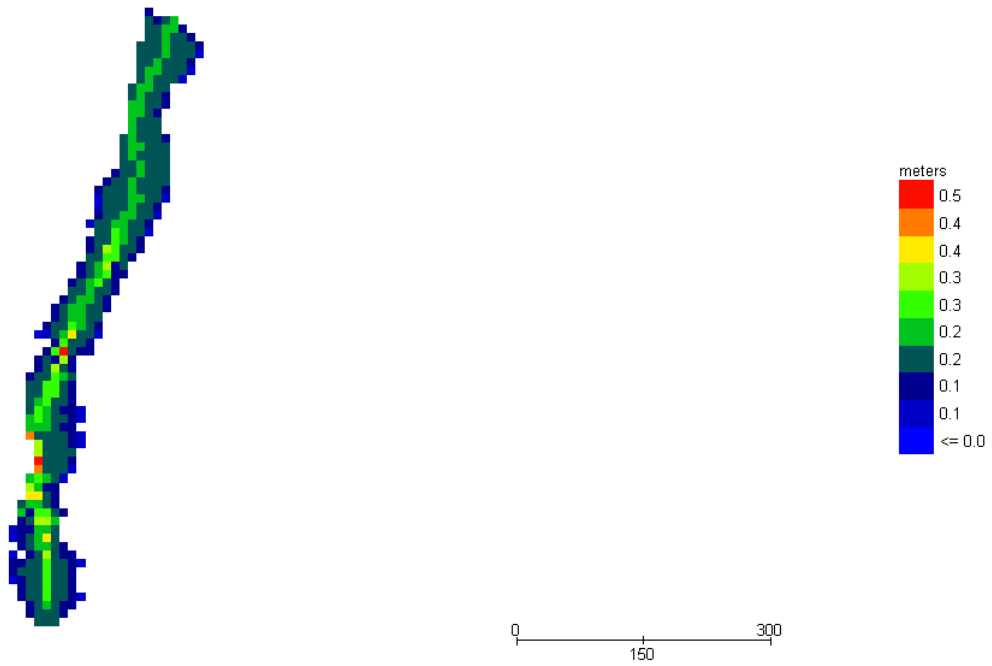


Figura 45. Profundidad máxima de flujo

d. Máxima velocidad del flujo

Se muestra el mapa para las velocidades máximas del flujo en el terreno, con velocidades de 0.5 a 4.9 m/s (Fig. 46).

Grid Element Maximum Velocity

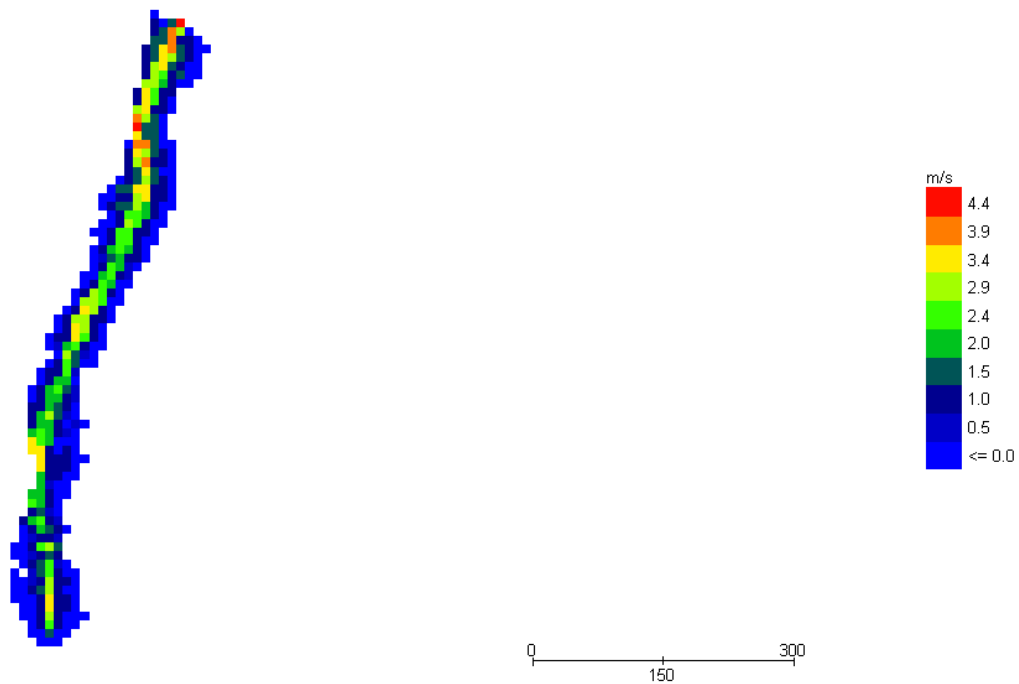


Figura 46. Máxima velocidad del flujo

e. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

Esta imagen muestra los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 47).

Grid Element Maximum Velocity

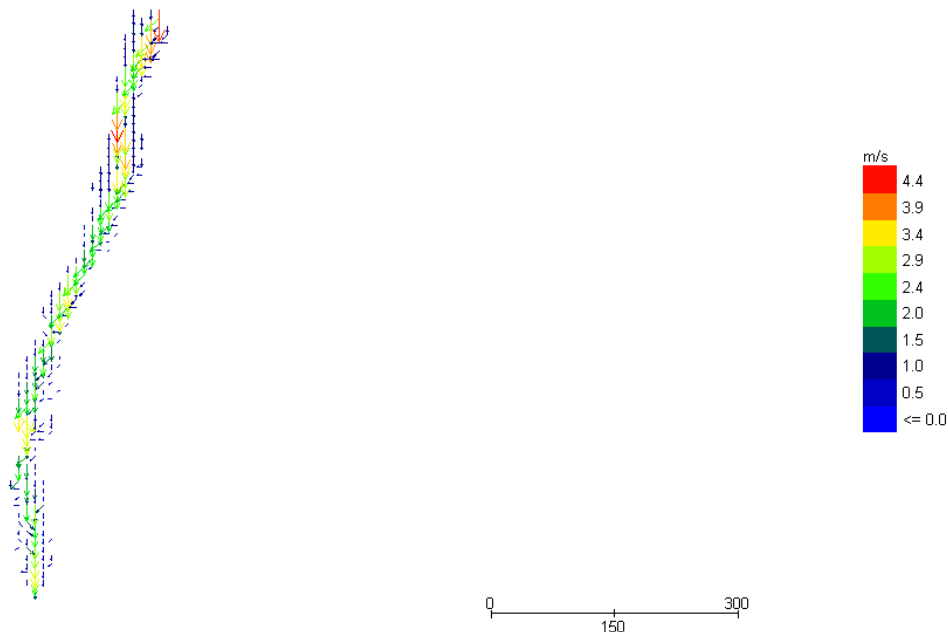


Figura 47. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

f. Mapa de peligros por flujo de detritos

Aquí la coloración por cada elemento de grilla tiene una mejor visión de cómo se comportara un flujo en el terreno (Fig. 48).

Este mapa es el resultado final de las simulaciones con el FLO-2D, con un hidrograma líquido con tiempo de retorno de 50 años con un caudal pico de $4 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se colorea cada grilla tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, como puede ser su velocidad, altura, fuerza de impacto, zonas de acumulación, entre otros.

Hazard Map

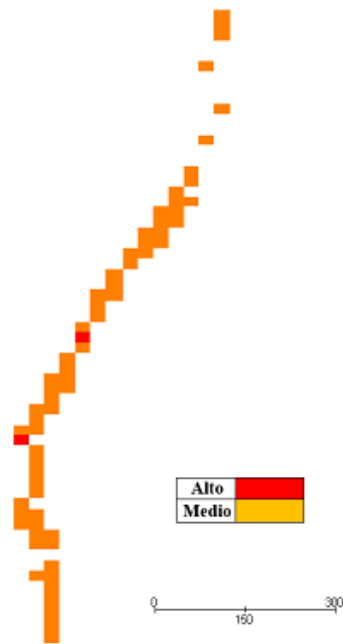


Figura 48. Mapa de Peligros Digital expresado en grillas

g. Mapa de peligros por flujo de detritos (expresado en polígonos)

Se toma como base mapa anterior, y se expresa en polígonos, esta es una representación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 49).

Hazard Map

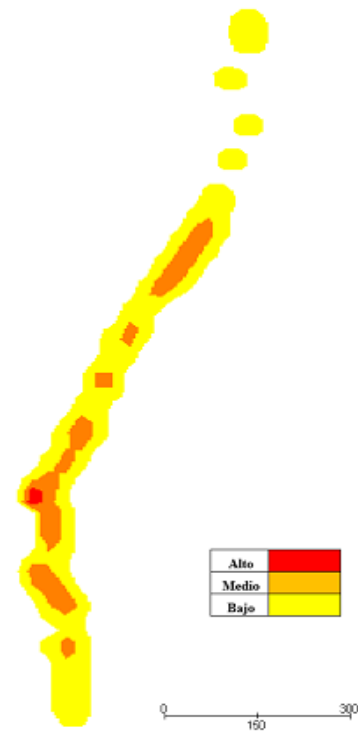


Figura 49. Mapa de Peligros Digital expresado en polígonos

5.1.2. TIEMPO DE RETORNO (TR = 100 años)

Este escenario se realizó con un hidrograma líquido con un caudal pico de $6\text{m}^3/\text{S}$, para un tiempo de retorno de 100 años, y una concentración de sedimentos 35 %, cuyos resultados se presentan a continuación (Tabla 27).

Tabla 27. Salidas del programa FLO-2D ($Q_{lp}=6\text{ m}^3/\text{s}$).

Flujo	Agua (m ³)	Agua con sedimentos(m ³)
Hidrograma de entrada (INFLOW)	68450.31	124455.10
Almacenamiento dentro del área de análisis	1979.73	3599.26
Flujo fuera del área de simulación	66871.58	121584.66

El volumen total de la crecienta simulada es de 0.19 Hm^3 , de los cuales 0.06 Hm^3 son agua y 0.12 Hm^3 corresponden a sedimento (volumen almacenado + volumen fuera del área de simulación). El área de inundación reportado por el modelo es de 29300 m^2 .

a. Elevación del terreno por grilla

Este mapa nos muestra como es el cambio de elevación del terreno, coloreado por tonos; coincidiendo con las cotas de las curvas topográficas (Fig. 50)

Grid Element Ground Surface Elevation

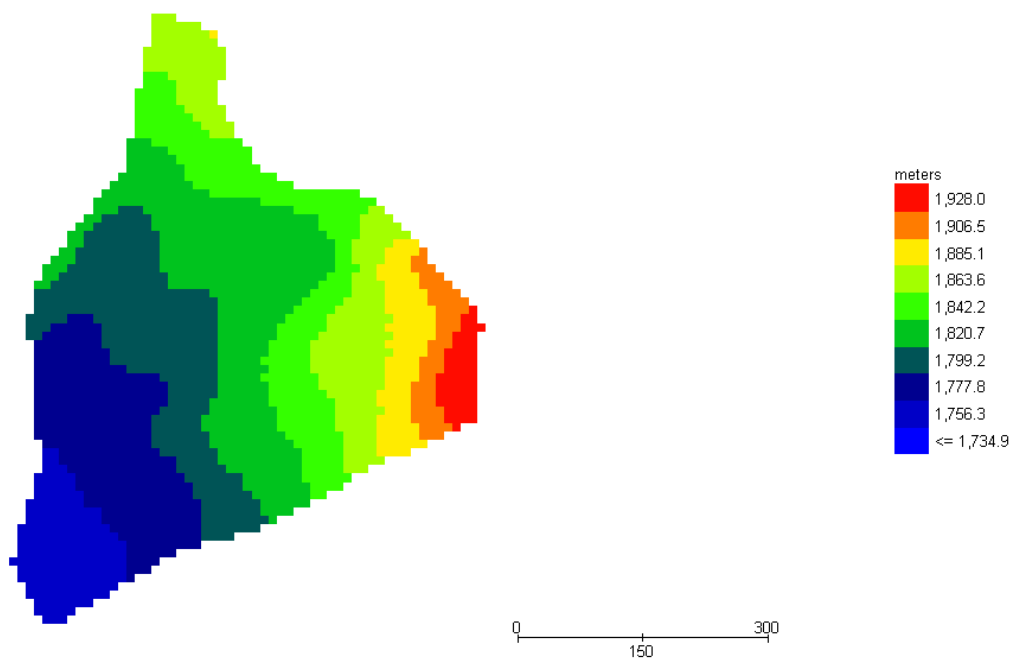


Figura 50. Elevación del terreno por grilla

b. Máxima elevación del agua en el terreno

Mapa donde se ve que cotas o alturas del terreno fueron invadidas por el fluido agua) y cuales no fueron afectadas (Fig. 51).

Grid Element Maximum Water Surface Elevation

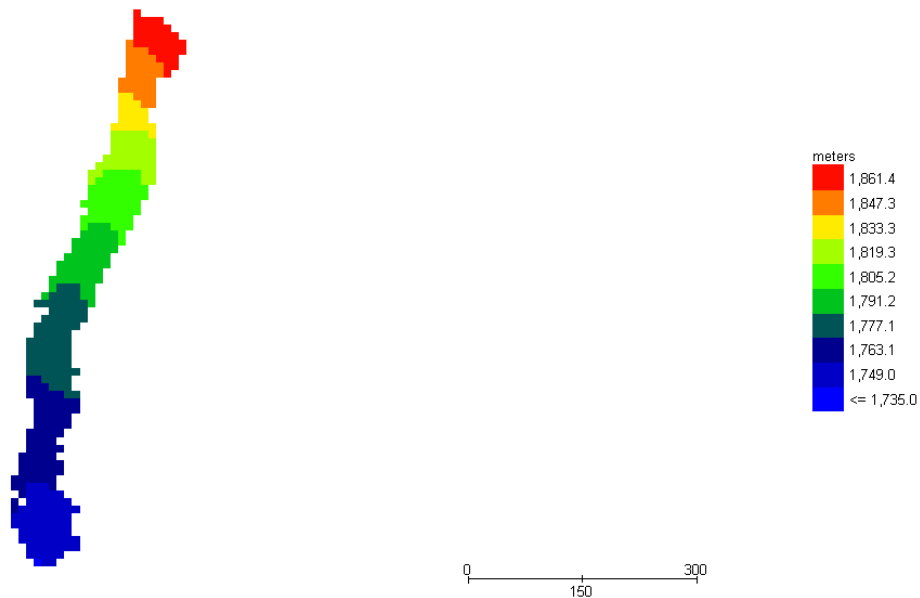


Figura 51. Máxima elevación del agua en el terreno

c. Profundidad máxima de flujo

Mediante escala de colores se muestra la altura tomada por el flujo en el terreno. La altura varía de 0.1 a 0.6m (Fig. 52)

Grid Element Maximum Flow Depth

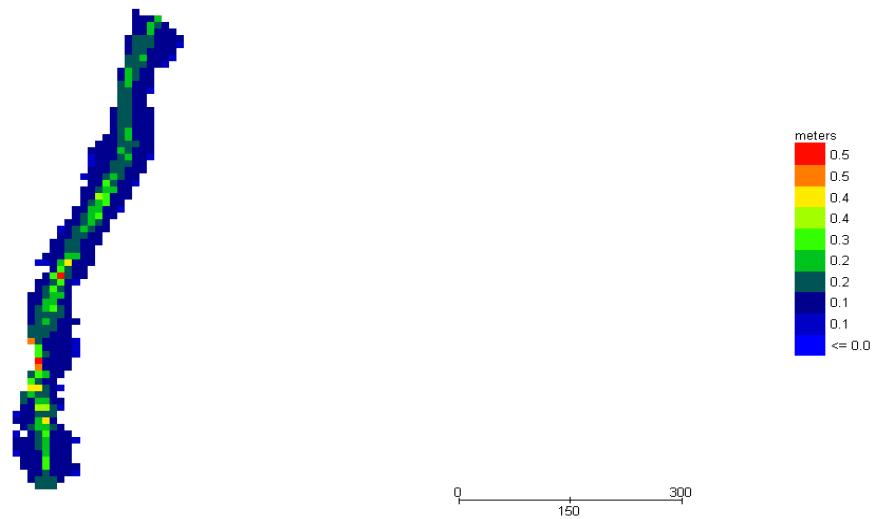


Figura 52. Profundidad máxima del flujo

d. Máxima velocidad del flujo

Se muestra el mapa para las velocidades máximas del flujo en el terreno, con velocidades de 0.5 a 4.7m/s (Fig. 53).

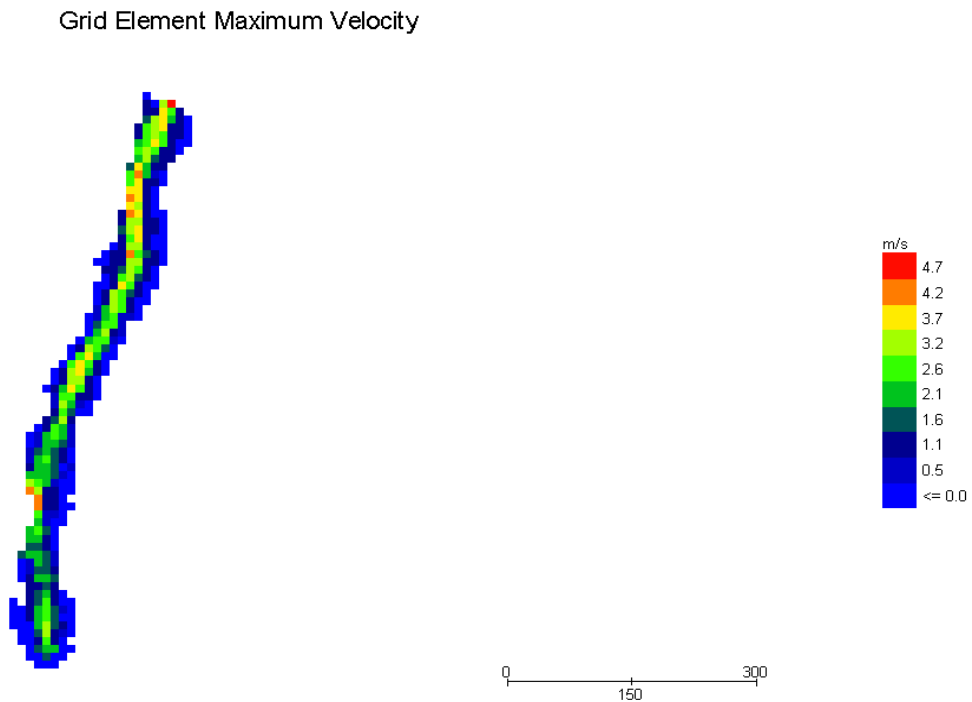


Figura 53. Máxima velocidad del flujo

e. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

Esta imagen muestra los vectores preferenciales de movimiento del flujo, estos varían por muchos factores, uno de los más importantes son las calles y paredes que “canalizan” el flujo. En este caso, no existen grandes obras de contención o construcciones, por lo que el flujo toma una dirección y velocidad de acuerdo a la topografía (Fig. 54).

Grid Element Maximum Velocity

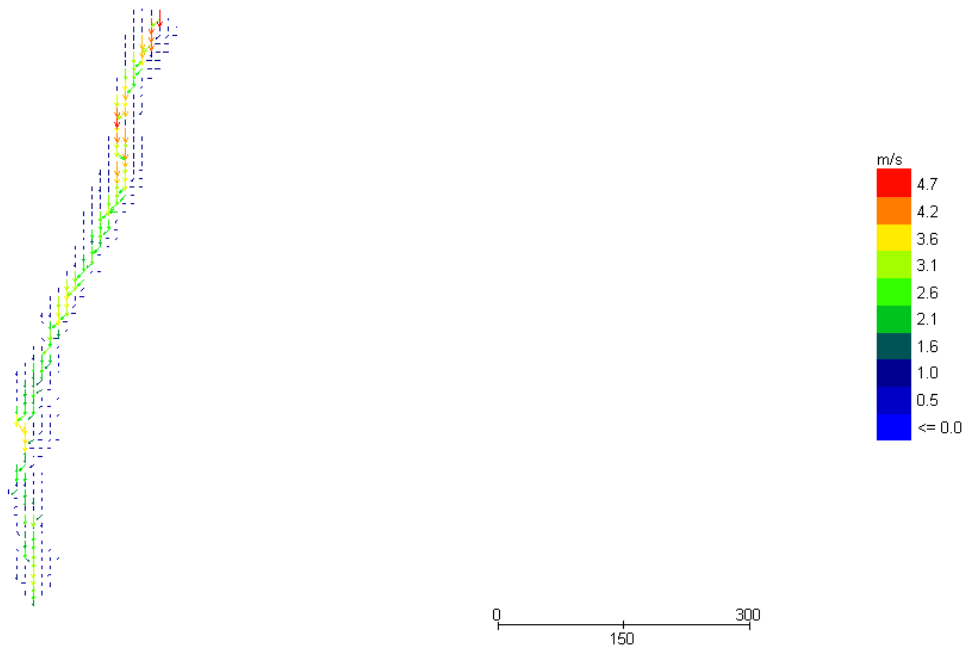


Figura 54. Velocidad máxima del flujo expresada en vectores

f. Mapa de peligros por flujo de detritos

Este mapa digital de peligros, es resultado de la simulación con el modelo FLO-2D para un hidrograma líquido con un caudal pico de 6 m^3 para un tiempo de retorno de 100 años, el cual es expresado mediante la coloración de grillas, lo que nos da una mejor visión de los diferentes comportamientos que ha tenido el flujo sobre el terreno simulado (Fig. 55), tomando en cuenta el comportamiento del fluido en cada elemento, tales como son velocidad, alturas, profundidades alcanzadas, etc.

Hazard Map

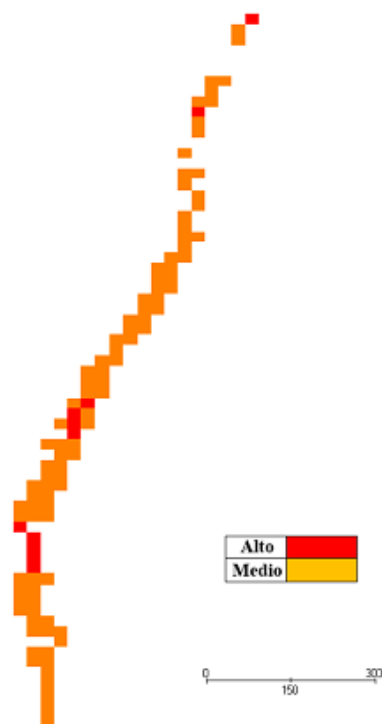


Figura 55. Mapa de Peligros Digital, expresado en grillas

g. Mapa de peligros por flujo de detritos (expresado en polígonos)

Tomando con base el mapa anterior, se generan polígonos, esta es una representación más fina, en la cual las grillas con las mismas características se encierran en un polígono (Fig. 56).

Hazard Map

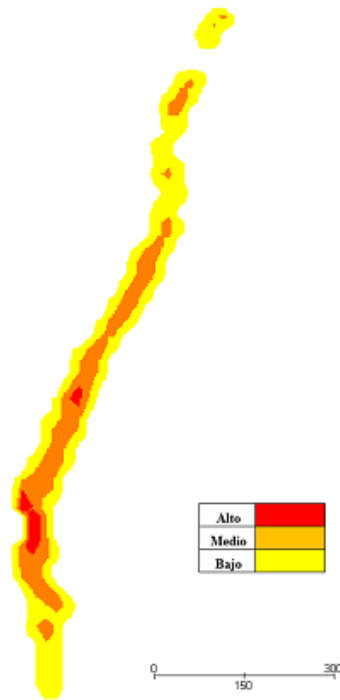


Figura 56. Mapa de Peligros Digital, expresado en polígonos

5.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO CON EVIDENCIAS DEL CAMPO

Un parámetro de comparación son las evidencias vistas en campo de eventos extraordinarios, en los cuales se puede estimar el tirante por rasgos en las paredes de la quebrada dejada por dicho suceso, (Gamión, 2013).

La calibración se ha ajustado a las observaciones de campo en la mina Karla de Tacna debido a que es un parámetro posible de medir y observar in-situ.

Para calibrar el modelo con evidencias dejadas en campo se puede realizar de dos formas: La primera es realizando un análisis de comparación con el

volumen de sedimentos dejado por este tipo de eventos y la segunda consiste en tratar de coincidir los tirantes del modelo con las marcas de flujo dejadas por el paso del río (Banda, 2014).

El método de calibración que utilizaremos en nuestro caso es la segunda forma que consiste en hacer coincidir los tirantes estimados a partir de las marcas dejadas por el paso del río con los resultados del modelo. Para ello vamos a definir puntos de control, como primer punto de control vamos a tomar las evidencias que se encuentran en tramo curvo, donde se asume que el tirante máximo dejado por el flujo alcanza una altura de los 0.31 m. como se observa en la Fig. 57.

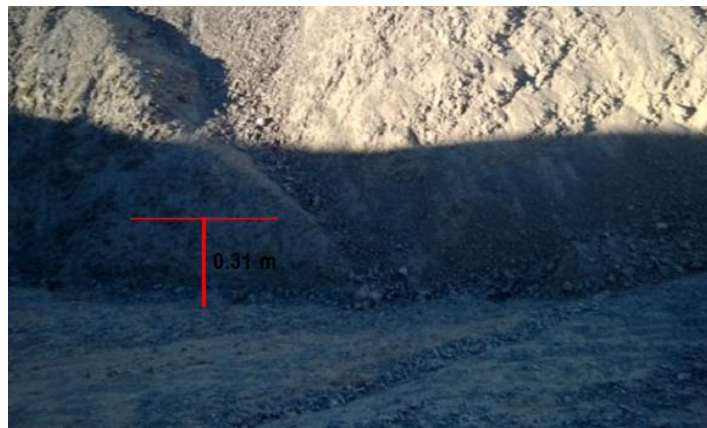


Figura 57. Marca de agua registrada en la quebrada. Altura aproximada de 0.31 m.

Como segundo punto de control lo vamos a ubicar cerca al campamento donde la altura calculada es de 0.46 m ver figura 58.



Figura 58. Vista del campamento. Altura aproximada de 0.46 m.

La calibración ajustada de las alturas estimadas dejadas por las marcas vistas en campo, se pueden ver en la figura N° 18. Estos resultados son contrastados con el primer escenario el cual presenta un mejor ajuste. Donde se aplicó el hidrograma de 50 años de periodo de retorno con caudal máximo de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ con concentraciones volumétricas de sedimentos de 35%.

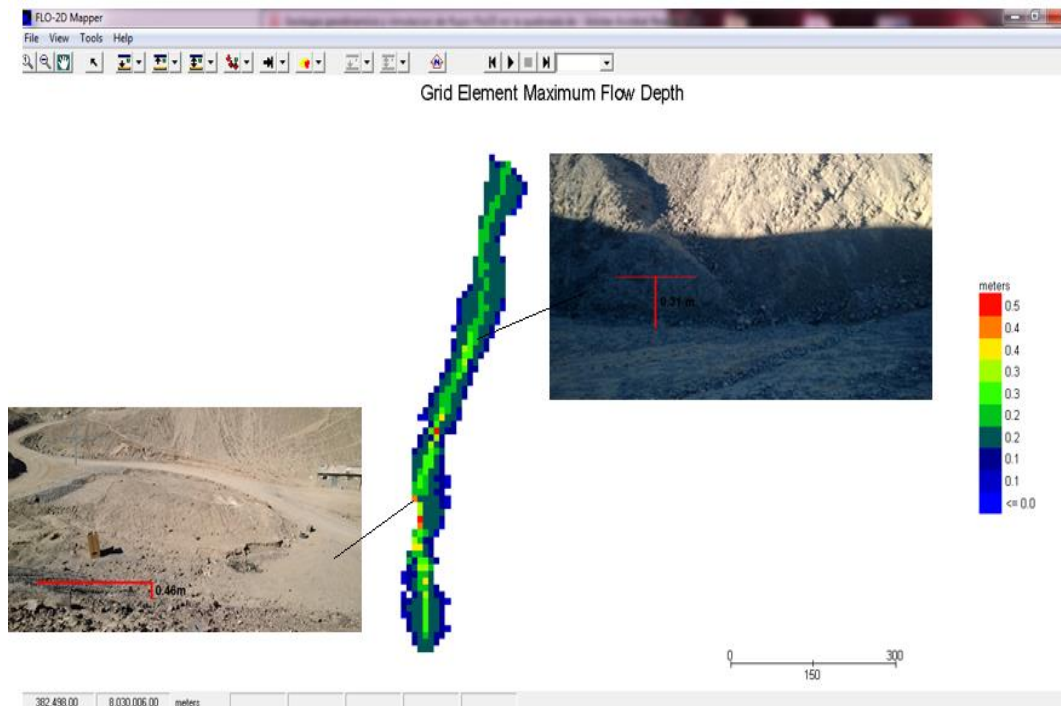


Figura 59. Comparación de resultados con evidencias de campo

Por lo tanto cabe resaltar que el flujo de barros y escombros es muy complejo y este modelo matemático es una aproximación a este tipo de acontecimientos donde podemos aproximar más a los resultados de un evento real.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se realizó un mapa de peligros con el modelo FLO-2D, el cual analiza los resultados de las simulaciones en función de los resultados de los tirantes máximos y la velocidad del flujo. El mapa resultante permite representar la amenaza potencial que existe en cada punto de la zona, estas se diferencian entre sí mediante los colores rojo, anaranjado y amarillo según la amenaza sea alta, media o baja. Cada tipo de amenaza corresponde a una serie de daños a personas y edificaciones.
- Se realizó la zonificación por peligro de desborde o inundación para la mina Karla de Tacna, para esto se generaron dos escenarios, los cuales fueron simulados con hidrogramas líquidos con tiempos de retorno de 50 años y 100 años, con caudales de 4 y 6 m³/s respectivamente.
- Para un tiempo de retorno de 50 años, los daños en estas zonas no serían considerables, esta zonificación se ubica generalmente bordeando a las zonas de color anaranjado (Peligro medio), donde el flujo no alcanzo más que unos centímetros de altura, los daños materiales serian mínimos.
- Para un tiempo de retorno de 100 años, los daños en estas zonas no serían considerables, esta zonificación se ubica generalmente bordeando a las zonas de color anaranjado (Peligro medio), en la cual el flujo no tuvo

características tan complejas, 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. También se observan zonas pequeñas de color rojo (Peligro alto) donde los daños serían considerables, en la cual el flujo presenta mayor altura, mayor velocidad de desplazamiento, entre otras características.

- Como parte de los resultados finales arrojados por el software FLO-2D, se observó que para un tiempo de retorno (TR) de 50 años, la inundación tendría un volumen de superior a los 0.12 Hm^3 de agua y sedimentos. Para un TR de 100 años la inundación tendría un volumen mayor a los 0.19 Hm^3 .
- El modelo Bidimensional FLO-2D es útil y necesario para trabajar con movimientos de masas complejos como son los flujos de detritos, se puede generar una infinidad de escenarios, solo cambiando los parámetros de acuerdo a las características que se puedan observar en el área a intervenir, dado que puede simular un flujo en presencia de lluvia por ejemplo, o con mayor cantidad de agua en la composición del flujo y otras combinaciones más. En este caso el software fue utilizado para generar mapas de peligros digitales, los cuales son muy útiles para tomar medidas preventivas en caso de presentarse una emergencia real. En efecto, estos mapas nos dan información rápida de las principales zonas de evacuación y qué sectores pueden ser utilizados por zonas de evacuación.

6.2. RECOMENDACIONES

- Con los resultados del modelo FLO-2D para un periodo de retorno de 100 años, se observa que el área del campamento está en la zona de alto riesgo (color rojo) y para poder disminuir o minimizar los daños, como una alternativa de solución sería la regulación del cauce, es decir la corrección hidráulica, protección de las orillas con muros o gaviones, estabilización de deslizamientos mediante movimientos de tierras o la reubicación del campamento, como condición de salvaguardar el área afectada que está frente al impacto directo de flujo de escombros.
- Para lograr un mejor conocimiento de los procesos reales de transporte de sedimentos en los ríos es indispensable incrementar los programas de aforos líquidos y sólidos. A excepción de las cuencas de algunos ríos importantes que cuentan con abundantes registros de lluvias, caudales y sedimentos, en la mayoría de los casos los registros son escasos o nulos.
- La realización de estudios de factibilidad debe partir de modelos hidráulicos que consideren los siguientes aspectos: la regulación del cauce, es decir la corrección hidráulica, protección de las orillas con muros o gaviones; estabilización de deslizamientos mediante movimiento de tierras, terracería o andenes, más muros de contención, corrección de las cárcavas con diques y la reforestación de la cuenca eligiendo las especies más adaptadas a los tipos de terreno. Esto con la finalidad de estabilizar los movimientos en

masa, y mitigar los eventos de geodinámica y/o ocurrencia de flujos de detritos que afecten la seguridad.

- Realizar simulaciones para todas las quebradas afluentes al río Caplina, ya que ésta cuenca presenta problemas de geodinámica.
- Se debería tener un registro histórico de las cuencas y sus efectos frente al posible huayco para un estudio más detallado y regionalizado del asunto, además de contar con mayor número de datos para calibrar y verificar la aplicabilidad de los modelos de flujos hiperconcentrados.
- Dada la facilidad y rapidez con la que el FLO-2D puede generar simulación de flujos en quebradas y zonas habitadas, se recomienda el uso del FLO-2D para el manejo de situaciones de emergencia, como son el delimitar zonas de evacuación, zonas de almacenamiento de material de reserva, etc.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, H., Mamani, M., Alvan, A., & Oviedo, M. (2011). Geología de los cuadrángulos de Pachía y Palca Hoja 36-v y 36-x. Boletín 139, Serie A, Carta Geológica Nacional, 101.
- ANA (2011). Informe técnico 003-Calidad de agua, cuenca Caplina-Tacna. Tacna, Perú: Dirección de Gestión de Calidad de los Recursos Hídricos.
- Bagnold, R. (1954). "Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear". S. A.-2. of the Royal Society of London.
- Banda, M. (2014). Análisis comparativo de un modelo hidrodinámico unidimensional para flujo Newtonianos y no Newtonianos del rios Seco zona urbana Tacna (70 pp.). Tesis. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Castillo, L. (2006). Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodos en una quebrada en el Perú (193 pp.) Tesis. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Castillo, L. (2009). Aplicación del modelo numérico FLO-2D en la Quebrada Cansas, Ica-Perú. Prevención de Huaycos. Lima. Conferencia: Prevención de huaycos.

- Cervantes, C. E. (2013). Generación de mapas de riesgo de inundación mediante modelacion en 2D (108 pp.). Tesis. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chow, V. T. (1998). Hidráulica de los canales abiertos. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Costa, J. E., Wieczorek, G. F., Geological Society of America, & Geological Society of America (Eds.). (1987). Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. Boulder, Colo: Geological Society of America.
- Coussot, P. (1997). Mudflow Rheology and Dynamics. A.A Balkema-Rotterdam. Journal of Hydrological Engineering(124 pp.).
- Díez-Herrero, A., Laín- Huerta, L., & Llorente- Isidro, M. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: guía metodológica para su elaboración. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Gamion, J. F. (2014). Modelo de flujo de escombros y lodos aplicando FLO 2D, caso sub cuenca del Río Shullcas (176 pp.). Tesis. Huancayo: Universidad Nacional del centro del Perú.
- Heras, R. (1972). Manual de Hidrología: Hidrología de las crecidas (tomo 4). España. Servicio de Edición del centro de estudio hidrográfico y Direccion General de obras hidráulicas. Obras Hidráulicas y Centro Estudios Hidrográficos. Madrid.

- INGEMMET. (2011). Geología de los cuadrángulo de Pachía y Palca hoja 36v, 36x. Boletín N° 139 Serie A. Carta Geológica Nacional (101 pp.).
- INRENA. (2002). Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los ríos Caplina y Uchusuma.
- Jacay, J., Sempere, J., Hugson, L., & Pino, A. (2002). Características estructurales del sistema de falla incapuquio en el sur del Perú (pp. 310-321). En: Resumen ampliado. 5° Simposio Internacional sobre Geodinámica Andina, Toulouse, Francia.
- Jakob, M., & Hungr, O. (2005). Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin ; New York: Springer.
- Johnson, A. (1970). Bingham and Pseudoplastic fluid models. Maryland: University of Maryland. (112 pp.) . Canadá.
- Julien, P., & León, C. (2000). Mud floods, mudflows and debris flows. Classification. Rheology and structural design". Jornadas de Investigación JIFI 2000: the debris flow disaster of december 1999 in Venezuela.
- Llamas. (1993). Development of Upstream Data-Input Models to Estimate Downstream Peak Flow in Two Mediterranean River Basins of Chile. Journal of Modern Hydrology.
- Monge, R., & Cervantes, J. (2000). Mapa geológico actualizado de los cuadrángulos Pachia y Palca (p. 37). Lima: INGEMMET.

- Noya M. (2002). Análisis de la amenaza por aludes torrenciales en la cuenca del río San José de Galipán (176 pp.). Tesis. Caracas: Universidad Central de Venezuela.
- O'Brien & Julien. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties (877-887 pp.). Journal of hydrology. ASCE. Arizona.
- O'Brien, J. (2006.01). Flo 2D Users Manual. Versión 2006.01 (102 pp.). Nutrioso Arizona.
- Oviedo M. (2009). Geología, Geodinámica y simulación de Flujos FLO 2D en la quebrada de Saphy - Cusco (120 pp.). Tesis. Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
- Palza H. P. (2014). Analisis espacial y temporal de sequías en la cuencas hidrográficas de la región Tacna.
- PET (2002). Plan de gestión de la oferta de agua en las cuencas del ámbito del proyecto Tacna-cuenca Caplina (255 pp.). Tacna, Perú: Asesores Técnicos Asociados, S.A.
- Pierson, T.C. (1986), "Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helen's, Washington, en Abrahams, A.D., ed., Hillslope processes" (269-296 pp.). Boston, Allen and Unwin.
- Pino C.A. (2013). Caracterización hidrogeomorfológica de la cuenca del río Caplina - Tacna (126 pp.). Tesis. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.

- Sarocchi, D. (2007a). Estudio sedimentológico del depósito de flujo de bloques y ceniza del 17 de julio de 1999 en el Volcán de Colima. México, D.F.: UNAM, Instituto de Geofísica.
- Savage, S.B.(1979). Gravity flow of cohesionless granular materials in chutes and channels. *Journal of fluid mechanics*, (92 pp. Part 1).
- SENAMHI (2012). Condiciones hídricas del año 2012-2013. Regiones Puno, Arequipa y Tacna. *Boletín Climático Nacional*, 2-8. Steimmüller, K., & Zabala, C. (1997). Hidrotermalismo en el sur del Perú. *Boletín 18-Serie D: Estudios Especiales INGEMMET*, 51-102.
- Suarez J.(2013). Zonificación de Susceptibilidad Amenaza y Riesgo. Bucaramanga. Tomo 1: Análisis Geotécnico (527pp.).
- Takahashi, & Tsujimoto. (1985). Delineation of the debris flow hazardous zone by a numerical simulation method. *Proc. of the intl. Symp. on erosion, Debris flow and disaster prevention*, Tsukuba, Japan (547 -462p).
- Takahashi T. (1980). “Debris flow”. *International Association for Hydraulic Research*. AA. Balkema. Rotterdam (165pp.).
- Valderrama P., Castillo L., Cardenas J., Carlotto V., & Fidel L. (2014). Mapa de peligros y simulación del flujo FLO-2D en la quebrada Runtumayo (cusco): alud y flujo de detritos del 12 de octubre del 2005. Lima. XIII Congreso Peruano de Geología. Sociedad Geológica del Perú.

- Valdivia, J. T. (2013). Modelamiento hidrodinámico para determinar zonas vulnerables en el cauce del río seco zona urbana - Tacna (110 pp.) Tesis. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Vivas, M. I. (2008). Aplicación del modelo Flo 2d para medidas de mitigación ante la ocurrencia de Huaycos (109 pp.). Caracas. Conferencia: Prevención de huacos.
- Wilson, J., & García, W. (1962). Geología de los cuadrángulos de Pachia y Palca Hoja 36v y 36x. INGEMMET-Comisión de la Carta Nacional, 13-66.

ANEXOS

ANEXO N° 01
ESTUDIO DE MECANICA DE SUELOS



CHRISTIAN TISNADO VALDEVIA

RUC. 10412708174


REG. CIP 156983

ESPECIALISTA EN GEOTECNIA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS


PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA C-01

ESTUDIO : MINA KARLA DE TACNA

UBICACIÓN : COORDENADAS (PSAD-56) E382103 N8030641

PROF. (m)	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
0.0 0.1		R <i>Suelos conformados por arenas superficiales y limos de color beige claro.</i>
0.5 1.0 1.5		GM <i>Gravas limosas (GM) de colores beige.</i> <i>La fracción fina no tiene plasticidad. Presenta bajo contenido de humedad 0.49 %.</i> <i>Su compactad es relativamente baja. El tamaño máximo de gravas es 2".</i>

ESCALA 1:20


EDGAR CHRISTIAN TISNADO VALDEVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993



CHRISTIAN OSWALDO VALDIVIA
 REG. CP 156893
 INGENIERIA MECANICA
 DIVISION DE INGENIERIA CIVIL DE SUCRE

ANALISIS MECANICO POR TAMIZADO
Nº 01 ASTM U- 422 / NTP 338.127

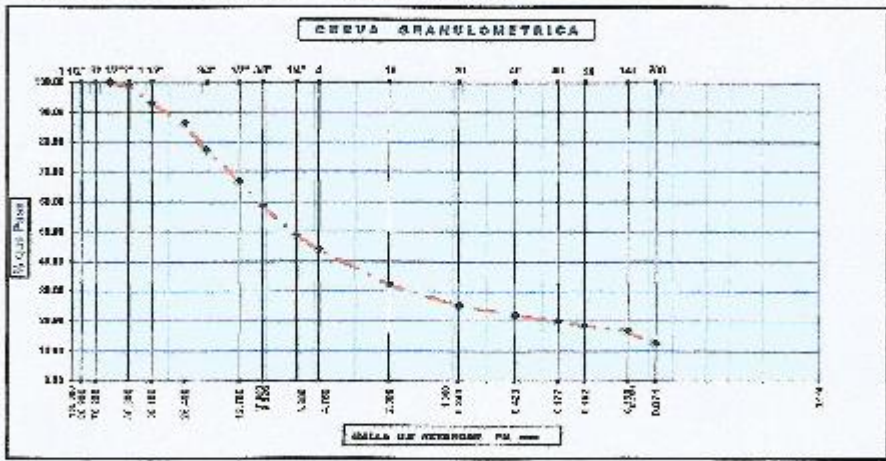
PROYECTO : MIRA KARLA DE TACRA
 SECTOR : TACRA
 CUESTA : C-01
 FECHA : ABR. 2019

UNIDAD DE EXCAV. : 1.00 m
 COORD. ESTE VCE (E) : 30100
 COORD. NORTE WCE (N) : 100004

MALLA	MALLA (mm)	PFSD RELATIVO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA BRUTA
3 1/2"	90.000				
3"	75.000				
2 1/2"	63.000		0.00	0.00	100.00
2"	50.000	293.00	0.06	0.06	99.94
1 1/2"	37.500	1977.00	6.13	6.75	93.25
1"	25.000	2170.00	6.74	13.52	86.48
3/4"	19.000	2500.00	8.00	22.52	77.48
1/2"	12.500	3417.00	10.01	33.13	66.87
3/8"	9.500	2658.00	8.25	41.38	58.62
1/4"	6.200	3160.00	9.81	51.18	48.82
Nº 4	4.750	1638.00	4.75	55.93	44.07
Nº 8	2.350				
Nº 10	2.000	1091.00	11.81	67.74	32.26
Nº 15	1.180				
Nº 20	0.850	79.00	0.80	74.70	25.30
Nº 30	0.550				
Nº 40	0.425	38.00	3.35	78.05	21.95
Nº 50	0.297				
Nº 60	0.250	77.00	1.94	79.99	20.01
Nº 80	0.180	18.00	1.58	81.58	18.42
Nº 140	0.106	10.00	1.07	83.25	16.75
Nº 200	0.075	47.00	4.14	87.40	12.60
< 200	0.075	143.00	12.50	100.00	0.00

OBSERVACIONES	
Peso muestra seca (gr.)	3221.50
Peso tel. Malla Nº 4 (gr.)	18019.00
Peso tela Malla Nº 4 (gr.)	14498.00
Peso final del ensayo (gr.)	500.00
Res. Malla de Nº 4 (%)	85.93
Pasante malla de Nº 4 (%)	14.07
Capacidad máxima (gr/cm³)	1.881
Humedad optima (%)	11.884
Límite líquido (%)	N.P.
Límite plástico (%)	N.P.
Índice de plasticidad (%)	N.P.
Coeficiente de uniformidad (%)	0.49
P.A. Retenido malla Nº 4	2.454
P.A. Pasante malla Nº 4	

SUCS : GM
 Clasificación



CHRISTIAN OSWALDO VALDIVIA
 INGENIERO MECANICO
 REG. CP 156893



CRISTIANOPADO VALDIVIA
 B.O. Nº 13822
 OFICINA DE OBTENCIÓN
 LABORATORIO DE MATERIALES

DENSIDAD IN SITU
 ASTM D 1556

PROYECTO : MHA KINLA DE TAGUA
 SECTOR : TACHA
 MUESTRA : C-01
 FECHA DE EJECUCIÓN : 4911 - 2019

DENSIDAD Nº	UNIDAD	C-01			
CALCULA	Nº	C-01			
COORDENADAS	E	301619			
PROFUNDIDAD SUPERFICIE	N	8058458			
PROFUNDIDAD	m	0.15			

A.- DENSIDAD DE CAMPO

1	FLUXO ARENA - FRASCO	gr.	8605		
2	FLUXO ARENA QUE QUEDA EN EL FRASCO	gr.	3275		
3	FLUXO DE LA ARENA EN EL CONO	gr.	1580		
4	PESO DE LA ARENA EN LA GAMBADA (1-2-3)	gr.	3770		
5	DENSIDAD DE LA ARENA	gr/cm ³	1.458		
6	WETTING DE LA TARA (4)	cm ³	2584		
7	FLUXO MUESTRA HUMEDA + TARA	gr.	1745		
8	PESO DE LA TARA	gr.	185		
9	PESO MUESTRA HUMEDA (7-8)	gr.	4360		
10	PESO SUELO HUMEDO RELATIVO Nº 20	gr.	850		
11	PESO SUELO SECO + TARA Nº 20	gr.	3700		
12	VOLUMEN DE LA TARA (4)	cm ³	345		
13	VOLUMEN DE LOS FRASCOS (1-2)	cm ³	2298		
14	PESO HUMEDAD DE LA TARA	gr/cm ³	2.780		

B.- HUMEDAD ASTM D 7216 - 97

15	Nº DE TARA		T		
16	PESO DE LA TARA	gr.	60.8		
17	PESO SUELO HUMEDO + TARA	gr.	183.8		
18	PESO SUELO SECO + TARA	gr.	183.3		
19	PESO DEL AGUA (17-18)	gr.	0.5		
20	PESO DEL SUELO SECO (16-18)	gr.	102.7		
21	CONTENIDO DE HUMEDAD (19/20)	%	0.49		

C.- GRADO DE COMPACTACION

22	DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO (11)	gr/cm ³	1.653		
23	DENSIDAD SECA DE CAMPO (10/20/19-21)	gr/cm ³	1.645		
24	MAX. Nº DENSIDAD	gr/cm ³	1.981		
25	HUMEDAD OPTIMA	%	10.88		
26	% DE DENSIDAD	%	83		

00000001 00000001 00000001 00000001


 CRISTIANOPADO VALDIVIA
 TALLERES OFICINA DE OBTENCIÓN
 Reg. CIP 156899



CHRISTIAN TESTADO VALDIVIA
REG. CIP 156983
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA
ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM D-2216-92

PROYECTO : MINA KARLA DE TACNA
SECTOR : PACHIA
MUESTRA : C-01

FECHA
ABRIL 2016

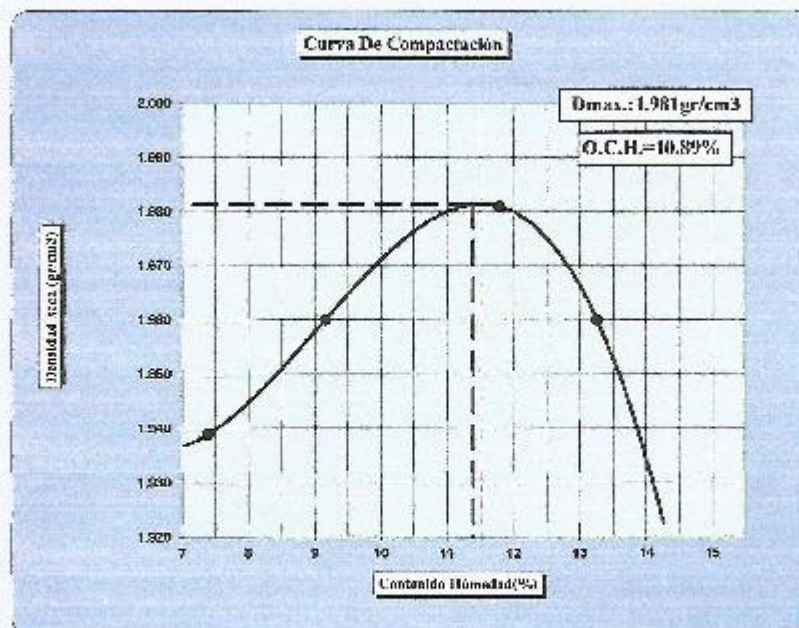
	DESCRIPCION	UNIDAD	CALICATAS	
			C-1- M1	
HUMEDAD ASTM D 2216 - 92				
1	TARA Nº			T
2	PESO DE LA TARA	gr.	80.60	
3	PESO SUELO HUMEDO + TARA	gr.	183.80	
4	PESO SUELO SECO + TARA	gr.	183.30	
5	PESO DEL AGUA (3-4)	gr.	0.50	
6	PESO DEL SUELO SECO (4-2)	gr.	102.70	
7	CONTENIDO DE HUMEDAD (100*5/8)	%	0.49	

CHRISTIAN TESTADO VALDIVIA
ING. GEODISA GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156983



CHRISTIAN TISNADO VAI DIVIA
REG. CIP 156983
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA
 ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPACTACION					
PROYECTO: MINA KARLA DE TACNA				Calicata : C-1	
				Fecha: Abril 2016	
Tipo de Material					
Molde No: 1					
Volumen Molde(cm³): 2118.79					
Método de Compactación: ASTM - D893			Método: "C"		
Peso(Suelo+Molde)(gr)	10822.00	10943.00	11099.00	11112.00	
Peso Molde(gr)	6429.00	6429.00	6429.00	6429.00	
P ₂₀ Compactado(gr)	4393.00	4513.00	4670.00	4683.00	
Densidad Húmeda(g/cm ³)	2.073	2.130	2.204	2.210	
Tara No	T-4	T-2	T-1	T-1	
Peso(S _{humeda} +Tara)(gr)	196.17	215.34	198.79	193.23	
Peso(S _{seca} +Tara)(gr)	191.35	204.29	186.80	180.26	
Peso Tara(gr)	77.84	76.65	80.46	78.65	
Peso Agua(gr)	7.27	11.05	11.96	12.97	
Peso S _{seca} (g)	113.51	127.64	106.34	101.61	
C.H.(%)	8.89	8.66	11.28	12.78	
Densidad Seca(g/cm ³)	1.938	1.960	1.981	1.960	




EDGAR CRISTIAN TISNADO VALDIVIA
 Ing. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156983



CHRISTIAN TISMADO VALDIVIAO
REG. CIP 156683
CALLE ALBAHUMARA 1000 QUILA
FRACCIÓN A Y 3° ETIENDE, MUNICIPALIDAD DE SUAZO

PESO ESPECIFICO DE FRACCION GRUESA

PROYECTO : MINA KARLA DE TACHA
SECTOR : PACHIA
MUESTRA : C-01
FECHA : ABRIL 2016

DESCRIPCION	UNIDAD	MUESTRA	
		C-01	N° 4
Fracción retenida en tamiz de	Pulg.		
Peso muestra seca	gr	449.33	
Peso muestra humedecida 24 horas con superficie seca (SSS; (AIREA)	gr.	459.33	
Peso muestra SSS sumergida en el agua	gr	278.33	
PESO ESPECIFICO APARENTE SSS	gr/cm ³	2.641	
PESO ESPECIFICO DE MASA SSS	gr/cm ³	2.560	
PESO ESPECIFICO DE MASA	gr/cm ³	2.494	

CHRISTIAN TISMADO VALDIVIAO
REG. CIP 156683
CALLE ALBAHUMARA 1000 QUILA
FRACCIÓN A Y 3° ETIENDE, MUNICIPALIDAD DE SUAZO



CHRISTIAN TRINADO VALDIVIA
REG. CIP 156983
Especialista en Control de Calidad
CALLE 15 N° 12100003 DE TACNA DE PERU

PESO ESPECIFICO DE FRACCION GRUESA

PROYECTO : MINA KARLA DE TACNA
SECTOR : PACHIA
MUESTRA : C-01
FECHA : ABRIL 2016

DESCRIPCION	UNIDAD	MUESTRA
		Pulg.
Fracción retenida en tamiz de		N° 4
Peso muestra seca	gr	449.00
Peso muestra humedecida 24 horas con superficie seca (SSS; (A)REA)	gr.	469.00
Peso muestra SSS sumergida en el agua	gr	278.00
PESO ESPECIFICO APARENTE \$\$\$	gr/cm ³	2.641
PESO ESPECIFICO DE MASA \$\$\$	gr/cm ³	2.660
PESO ESPECIFICO DE MASA	gr/cm ³	2.494

DISEÑO, ELABORACIÓN Y CONTROL DE CALIDAD
ING. GEOLOGO GEOFISICO
REG. CIP 156983



CHRISTIAN TISNADO VALDIVIA
 REG. CIP 156983
 ESPECIALISTA EN GEOTECNIA
 REABRILACION DE PUERTOS DE MECANICA DE SUELOS

ENSAJO DE CORTE DIRECTO

(451M - 11100)


PROYECTO : OBRAS DE RECONSTRUCCION DE LA CARRETERA
 LOCALIDAD : CALA HUELA
 PLAN : 1:2000

ENCUENTRO 61

CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA			DATOS DE CORTE		
Diametro	(mm)	6.00	Sobre carga	(grs)	508.00
Altura	(mm)	2.00	Peso de Muestra	(grs)	100.80
Densidad Humida	(gr/cm ³)	1.40	Carga Adicionada	(grs)	54.00
Area	(mm ²)	28.00	Relacion de Carga		1.20
Volumen	(mm ³)	28.00	Carga Normal Total	(grs)	54.50
Peso	(grs)	100.80	Velocidad de Carga	(cm/min)	0.11
Densidad Seca	(gr/cm ³)	1.36	Esfuerzo Normal	(kg/cm ²)	1.94

CONTENIDO DE HUMEDAD		TIPO DE MUESTRA	
P. Humedad + Tena	(grs)	Natural	
P. Suelo Seco + Tena	(grs)	Compacted	N
P. de Tena	(grs)	Humedad Natural	0.11
Contenido de Humedad	(%)	Clasificación	GM

DEFORMACION LONGITUDINAL		DEFORMACION VERTICAL		FUERZA CONSTANTE	ESFUERZO CORRESPONDIENTE
DIAC.	mm	DIAC.	mm	kg	(kg/cm ²)
0.00	0.00	0.00	0.0000	0.00	0.00
5.00	0.10	-16.00	-0.0016	39.00	0.11
10.00	0.10	-16.00	-0.0016	38.00	0.11
15.00	0.15	-16.00	-0.0016	75.00	0.21
20.00	0.20	-15.00	-0.0015	110.00	0.28
30.00	0.30	-17.00	-0.0017	125.00	0.36
40.00	0.40	-17.00	-0.0017	141.00	0.50
50.00	0.50	-16.00	-0.0016	168.00	0.48
65.00	0.65	-16.00	-0.0016	185.00	0.61
80.00	0.80	-16.00	-0.0016	201.00	0.72
100.00	1.00	-8.00	-0.0008	223.00	0.80
120.00	1.20	6.00	0.0006	245.00	0.75
130.00	1.40	-4.00	-0.0004	269.00	0.68
160.00	1.60	5.00	0.0005	291.00	0.72
180.00	1.80	9.00	0.0009	320.00	0.79
200.00	2.00	12.00	0.0012	305.00	0.77
220.00	2.20	15.00	0.0015	281.00	0.79
240.00	2.40	15.00	0.0015	375.00	0.80
260.00	2.60	20.00	0.0020	391.00	0.80
280.00	2.80	27.00	0.0027	391.00	0.81
300.00	3.00	31.00	0.0031	330.00	0.81
320.00	3.20	32.00	0.0032	387.00	0.80
340.00	3.40	32.00	0.0032	397.00	0.79
360.00	3.60	35.00	0.0035	387.00	0.78
380.00	3.80	35.00	0.0035	357.00	0.77
400.00	4.00	34.00	0.0034	337.00	0.76
420.00	4.20	35.00	0.0035	337.00	0.76
440.00	4.40	35.00	0.0035	337.00	0.74
460.00	4.60	35.00	0.0035	387.00	0.75
480.00	4.80	35.00	0.0035	397.00	0.75
500.00	5.00	35.00	0.0035	397.00	0.72


 INGENIERO GEOTECNICO
 ING. CHRISTIAN TISNADO VALDIVIA
 REG. CIP 156983

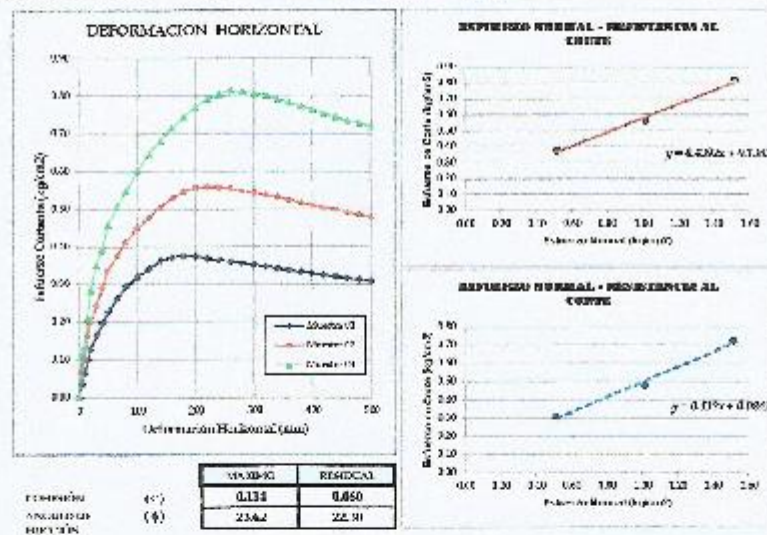


CHRISTIAN TISNADO VALDIVIA
REG. CIP 156793
ESPECIALISTA EN GEOTECNIA
ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE CORTE DIRECTO
(ASTM D3099)

INDUSTRIA : MINA KARLA DE TACNA
MUESTRA : CALICATA C-41
FECHA : ABRIL 2014

GRÁFICO DE CORTE DIRECTO



ING. CRISTIAN TISNADO VALDIVIA
ING. GEOTECNICO REGISTRADO
Reg. CIP 156793



CHRISTIAN TISNADO VALDIVIA
 REG. CIP 156983
 ESPECIALISTA EN MECÁNICA DE SUELOS
 ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

ENSAYO DE COMPRESIÓN DIRECTA
 (ASTM - D3098)

PROYECTO : MIRACUELLA DE LA CIMA
 NUMERO : CALAFALCÁN
 FECHA : ABRIL 2016

MUESTRA : 41

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA		DATOS DE CORTE			
Diámetro	(mm)	50.0	Substr. carga	(kg)	503.90
Altura	(cm)	2.30	Peso de muestra	(kg)	10.80
Densidad Natural	(kg/m^3)	1.40	Carga Adicional	(kg)	18.00
Área	(cm^2)	76.00	Relación de Carga		0.50
Volumen	(cm^3)	22.00	Carga Normal Total	(kg)	18.90
Peso	(gr)	10.80	Velocidad de Carga	(mm/min)	0.008
Densidad Seca	(kg/cm^3)	1.37	Esfuerzo Normal	(kg/cm^2)	0.514

CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL		TIPO DE MUESTRA	
P. Suelo Húmedo + Tarz	(gr)	150.30	Natural
P. Suelo Seco + Tarz	(gr)	138.00	Compactado
P. de Tarz	(gr)	26.10	Humedad Natural
Contenido de Humedad		2.51%	Clasificación
			(SUCS)
			GM

DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL		DEFORMACIÓN VERTICAL		FUERZA CORTANTE (N)	FRICCIÓN CORTANTE (kg/cm^2)
DEAL	mm	DEAL	mm		
0.00	0.02	0.00	0.0001	0.00	0.02
5.00	0.02	-14.00	-0.0014	13.00	0.04
10.00	0.10	-18.00	-0.0018	25.00	0.08
15.00	0.15	-16.00	-0.0016	35.00	0.10
20.00	0.20	-20.00	-0.0020	45.00	0.15
25.00	0.30	-20.00	-0.0020	55.00	0.18
30.00	0.40	-20.00	-0.0020	71.00	0.20
35.00	0.50	-19.00	-0.0019	85.00	0.25
40.00	0.65	-17.00	-0.0017	96.00	0.26
45.00	0.80	-16.00	-0.0016	108.00	0.29
100.00	1.00	-12.00	-0.0012	115.00	0.30
120.00	1.20	-10.00	-0.0010	125.00	0.30
140.00	1.30	-8.00	-0.0008	135.00	0.26
160.00	1.60	-7.00	-0.0007	142.00	0.27
180.00	1.80	-5.00	-0.0005	146.00	0.28
200.00	2.00	-3.00	-0.0003	147.00	0.27
220.00	2.20	-2.00	-0.0002	146.00	0.27
240.00	2.40	-2.00	-0.0002	146.00	0.25
260.00	2.60	-2.00	-0.0002	145.00	0.26
280.00	2.80	-1.00	-0.0001	146.00	0.26
300.00	3.00	-1.00	-0.0001	146.00	0.25
320.00	3.20	-1.00	-0.0001	146.00	0.25
340.00	3.00	-1.00	-0.0001	145.00	0.24
360.00	3.60	-1.00	-0.0001	145.00	0.24
380.00	3.80	-1.00	-0.0001	145.00	0.23
400.00	4.00	-1.00	-0.0001	145.00	0.23
420.00	4.20	-1.00	-0.0001	145.00	0.22
440.00	4.40	-1.00	-0.0001	145.00	0.22
460.00	4.60	-1.00	-0.0001	145.00	0.20
480.00	4.70	-1.00	-0.0001	145.00	0.20
500.00	5.00	-1.00	-0.0001	145.00	0.21


 INGENIERO GEOTÉCNICO
 REG. CIP 156983

ANEXO N° 02
ESTUDIO HIDROLOGICO

DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DE 24 HORAS

N	AÑO	P24(mm)
1	1965	25.9
2	1966	5.9
3	1967	13.5
4	1968	0
5	1969	0
6	1970	0
7	1971	15.5
8	1972	122.3
9	1973	0
10	1974	3.9
11	1975	45.2
12	1976	25.2
13	1977	64.5
14	1978	26.3
15	1979	32.9
16	1980	10.2
17	1981	53.6
18	1982	20.7
19	1983	9.6
20	1984	46.5
21	1985	56.5
22	1986	38.7
23	1987	20.8
24	1988	34.6
25	1989	44.8
26	1990	44
27	1991	25.5
28	1992	3.6
29	1993	75
30	1994	43.2
31	1995	29.4
32	1996	14
33	1997	71.7
34	1998	29.3
35	1999	98.6
36	2000	50.4
37	2001	81
38	2002	41.4
39	2003	30.1
40	2004	35
41	2005	23.8
42	2006	48.3
43	2007	0
44	2008	0
45	2009	0
46	2010	14.4
	suma	1475.8

Pprom 32.1

Pp	32.1 m3/seg	Precipitación promedio
s=	27.5991892	desviacion estandar

$$K = - \frac{(\text{raiz } 6)}{\pi(0.5772 + \ln(\ln T/T-1))}$$

T1	50 años
T2	100 años
K50=	2.59243797
K100	3.13682925

CALCULO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DE 24 HORAS A PERIODO DE RETORNO CORRESPONDIENTE

$$P = Pp + (S \cdot k)$$

P50	103.631795	m3/seg
P100	118.656553	m3/seg

ANEXO N° 03
PANEL FOTOGRAFICO



FOTO 01: Vista panorámica de la Mina Karla de Tacna.



FOTO 02: Vista general de los estratos Mina Karla de Tacna.



FOTO 03: Vista general de la ubicación de la Calicata.



FOTO 04: Ensayo de densidad In situ

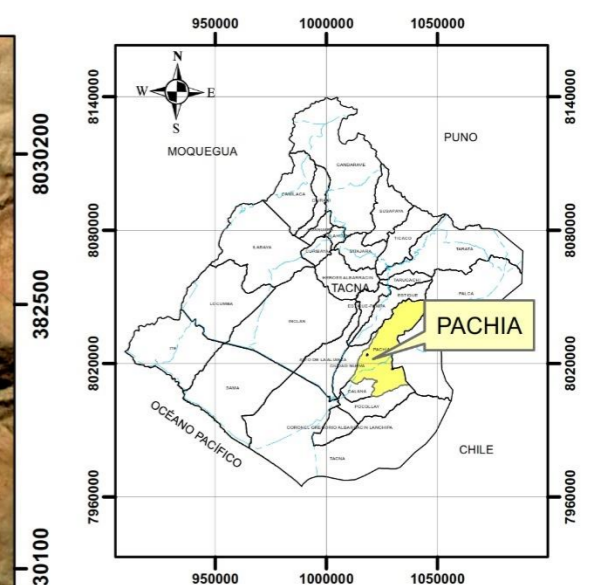
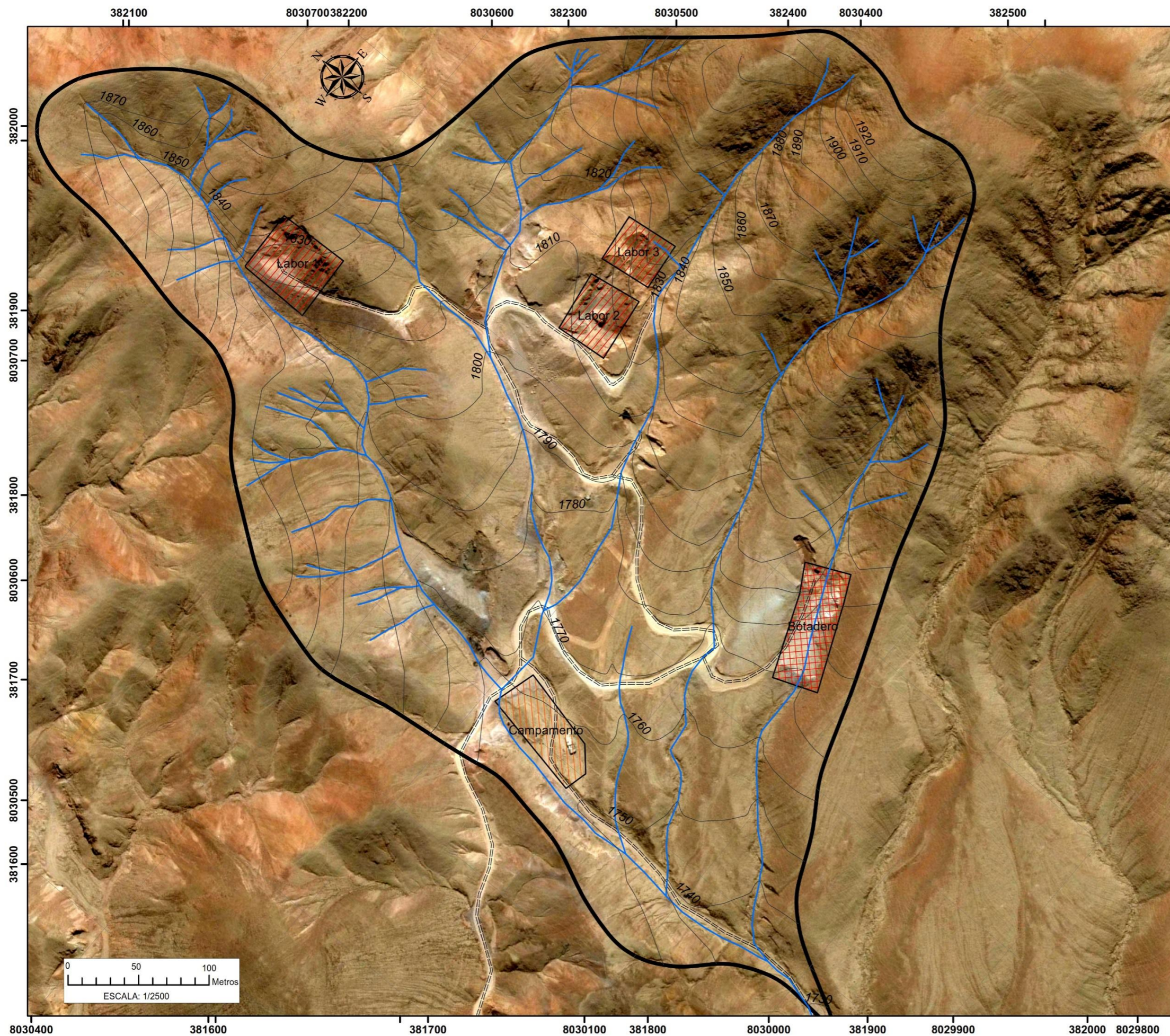


FOTO 05: Ensayo de contenido de humedad



FOTO 06: Ensayo de granulometría.

ANEXO N° 04
MAPAS TEMATICOS



SIMBOLOGÍA

	Curvas 10m
	Drenaje
	Acceso
	Botadero
	Campamento
	Labor 1
	Labor 2
	Labor 3

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

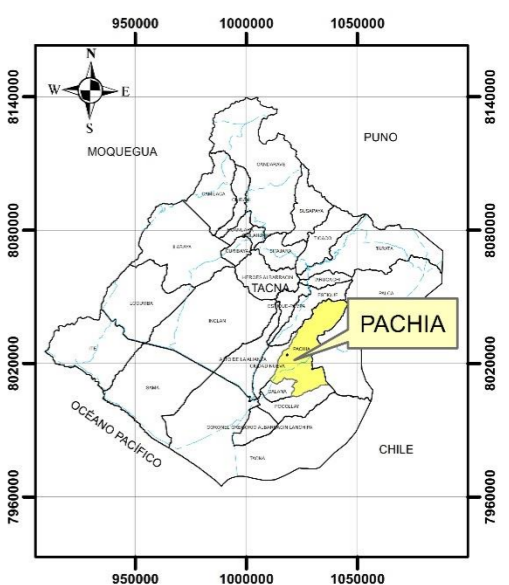
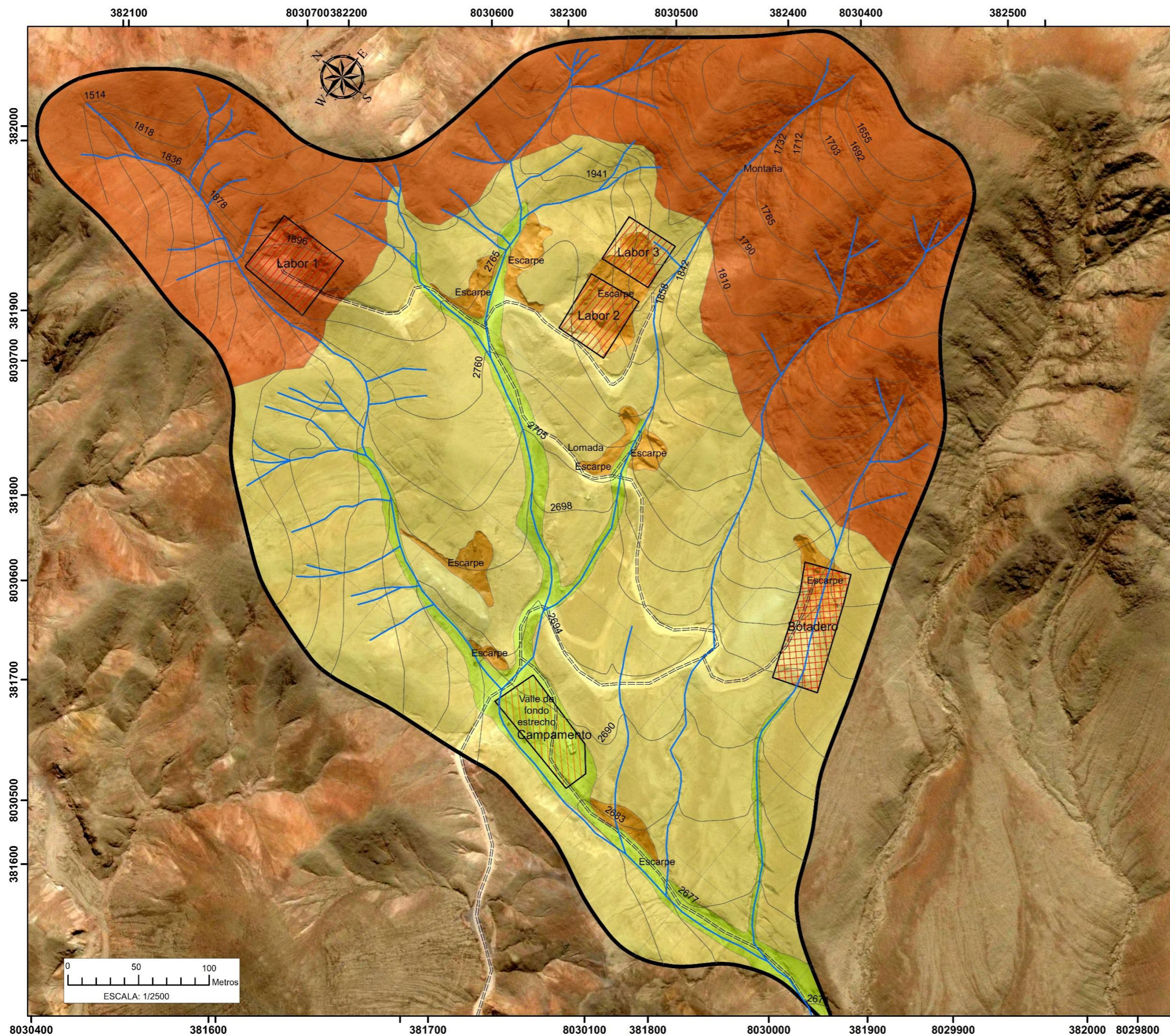
TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA DE TACNA" - TACNA"

MAPA DE UBICACIÓN

UBICACIÓN: REGION : TACNA
 PROVINCIA : TACNA
 DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
 ASESOR: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS MU-01
 ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K





SIMBOLOGÍA

- Curvas 10m
- Drenaje
- Acceso
- Botadero
- Campamento
- Labor 1
- Labor 2
- Labor 3

GEOMORFOLOGÍA

- Montaña
- Escarpe
- Lomada
- Piedemontes

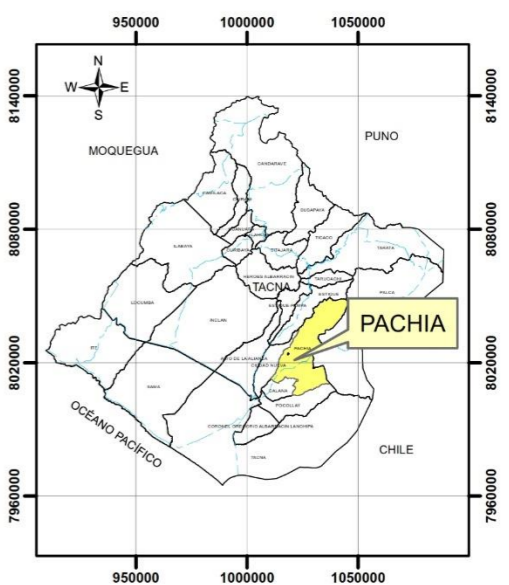
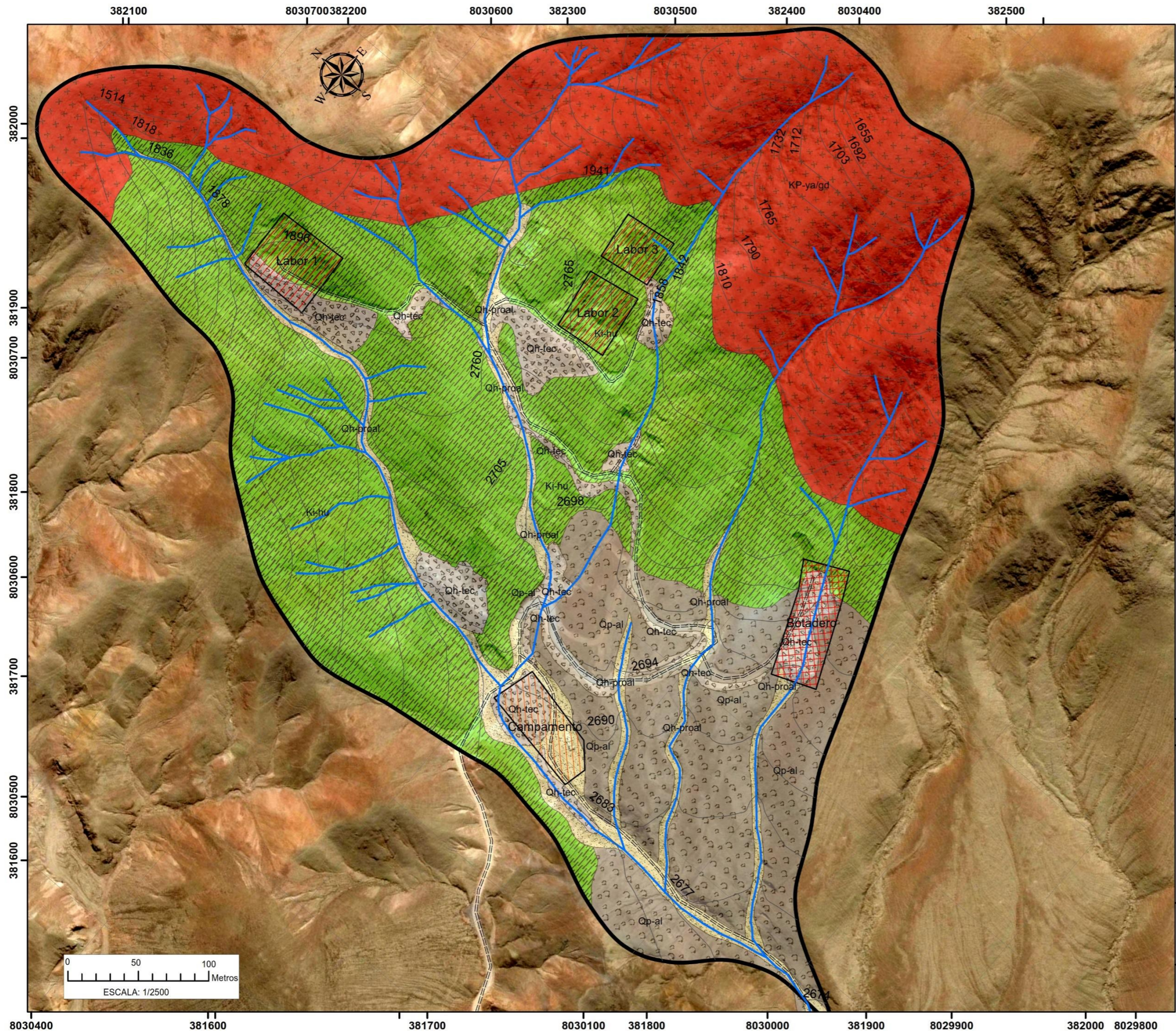
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA DE TACNA" - TACNA"

MAPA GEOMORFOLOGICO

UBICACION: REGION : TACNA
 PROVINCIA : TACNA
 DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
 ASesor: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS MG-02
 ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K



SIMBOLOGÍA

- Curvas 10m
- Drenaje
- Acceso
- Botadero
- Campamento
- Labor 1
- Labor 2
- Labor 3

LITOESTRATIGRAFÍA

- Ki-hu : Formación Hualhuni
- KP-ya/gd : Intrusivo Yarabamba
- Qp-al : Depósito Aluvial
- Qh-proal : Depósito Proaluvial
- Qh-tec : Depósito Tecnógeno

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA DE TACNA" - TACNA"

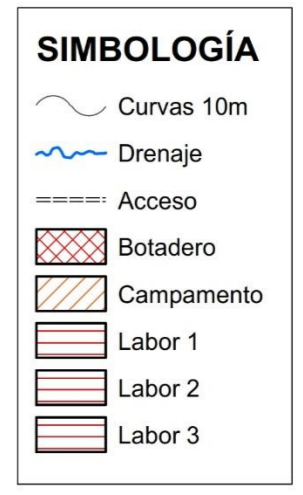
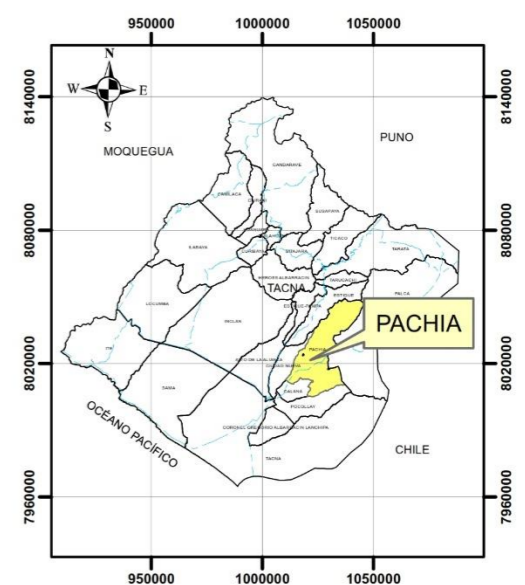
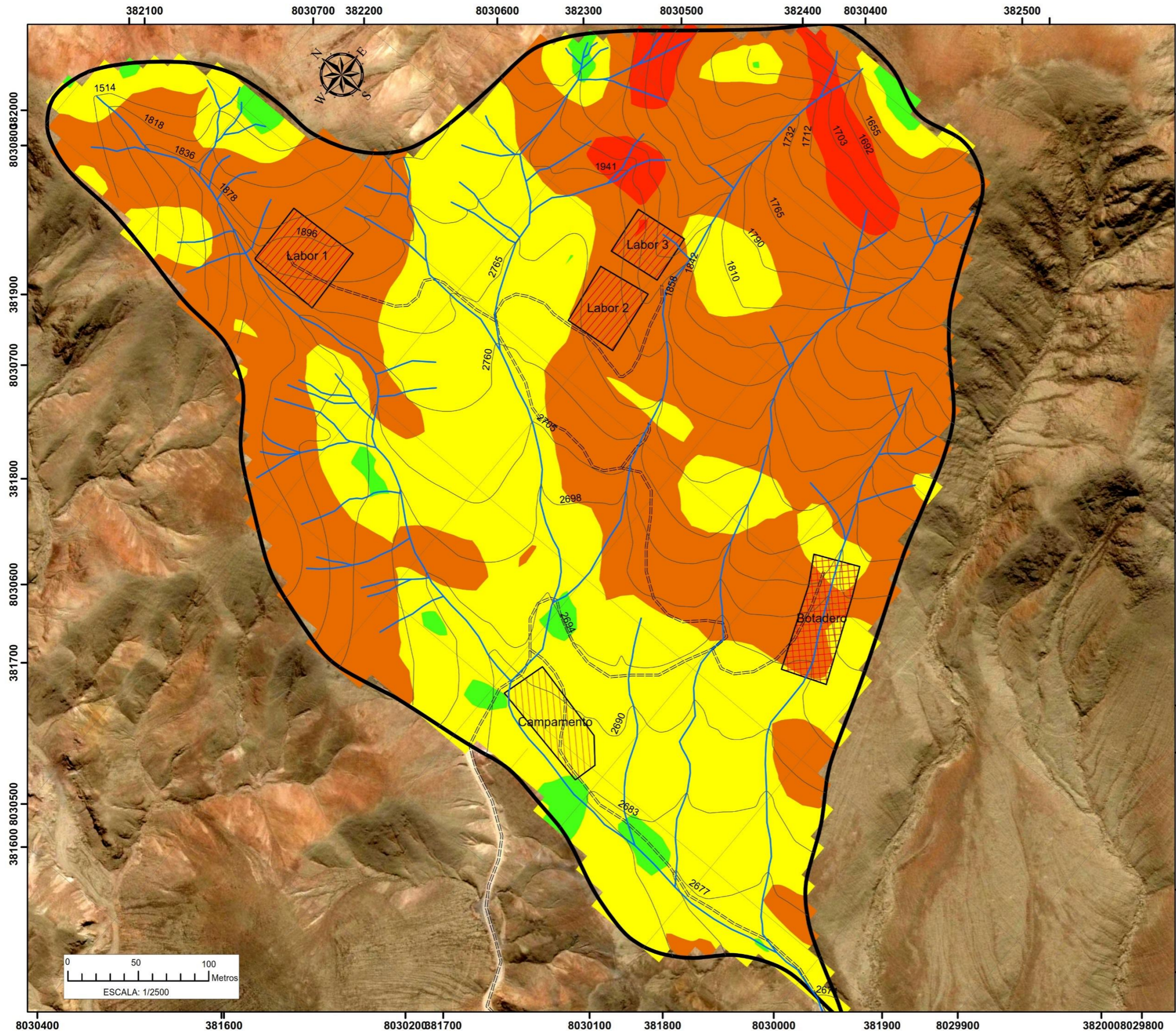
MAPA LITOESTRATIGRAFICO

UBICACIÓN: REGIÓN : TACNA
 PROVINCIA : TACNA
 DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
 ASESOR: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS ML-03

ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K





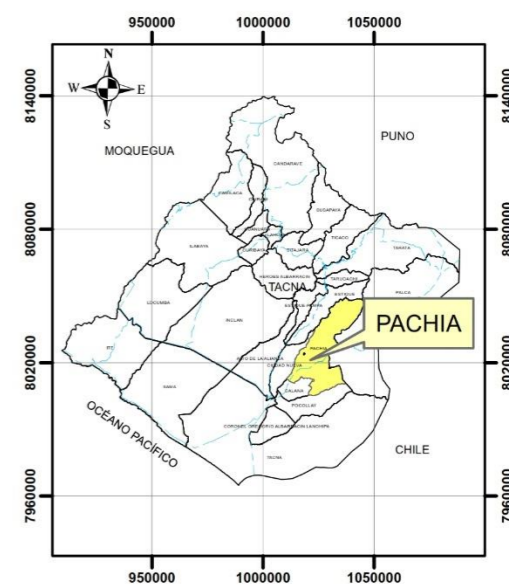
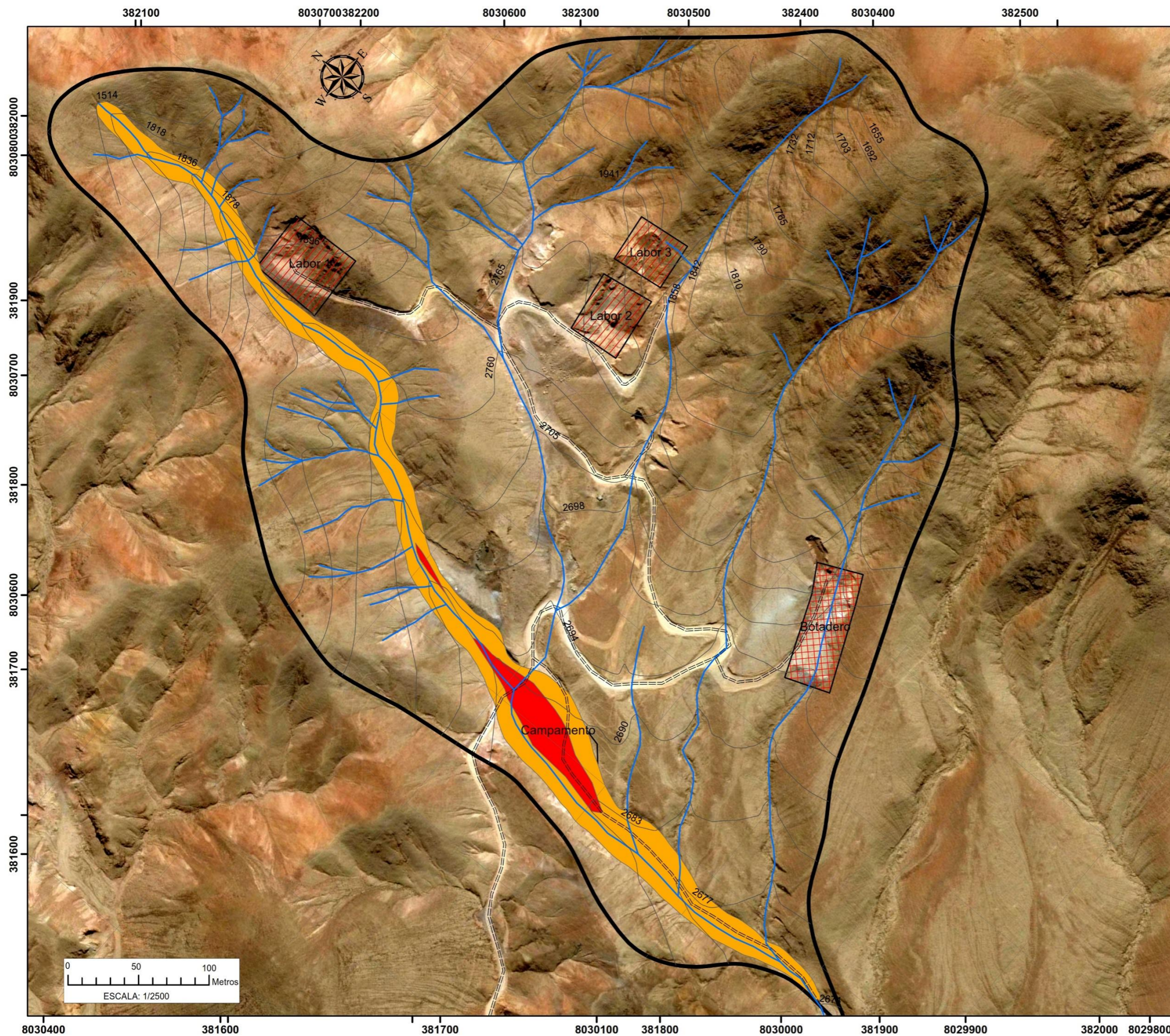
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA DE TACNA" - TACNA"

MAPA DE PENDIENTES

UBICACION: REGION : TACNA
PROVINCIA : TACNA
DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
ASESOR: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS MP-04
ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K



SIMBOLOGÍA

- Curvas 10m
- Drenaje
- Acceso
- Botadero
- Campamento
- Labor 1
- Labor 2
- Labor 3

Riesgo

- Alto
- Medio

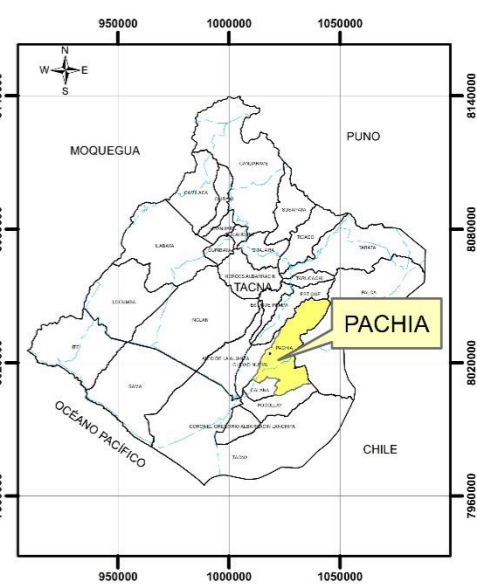
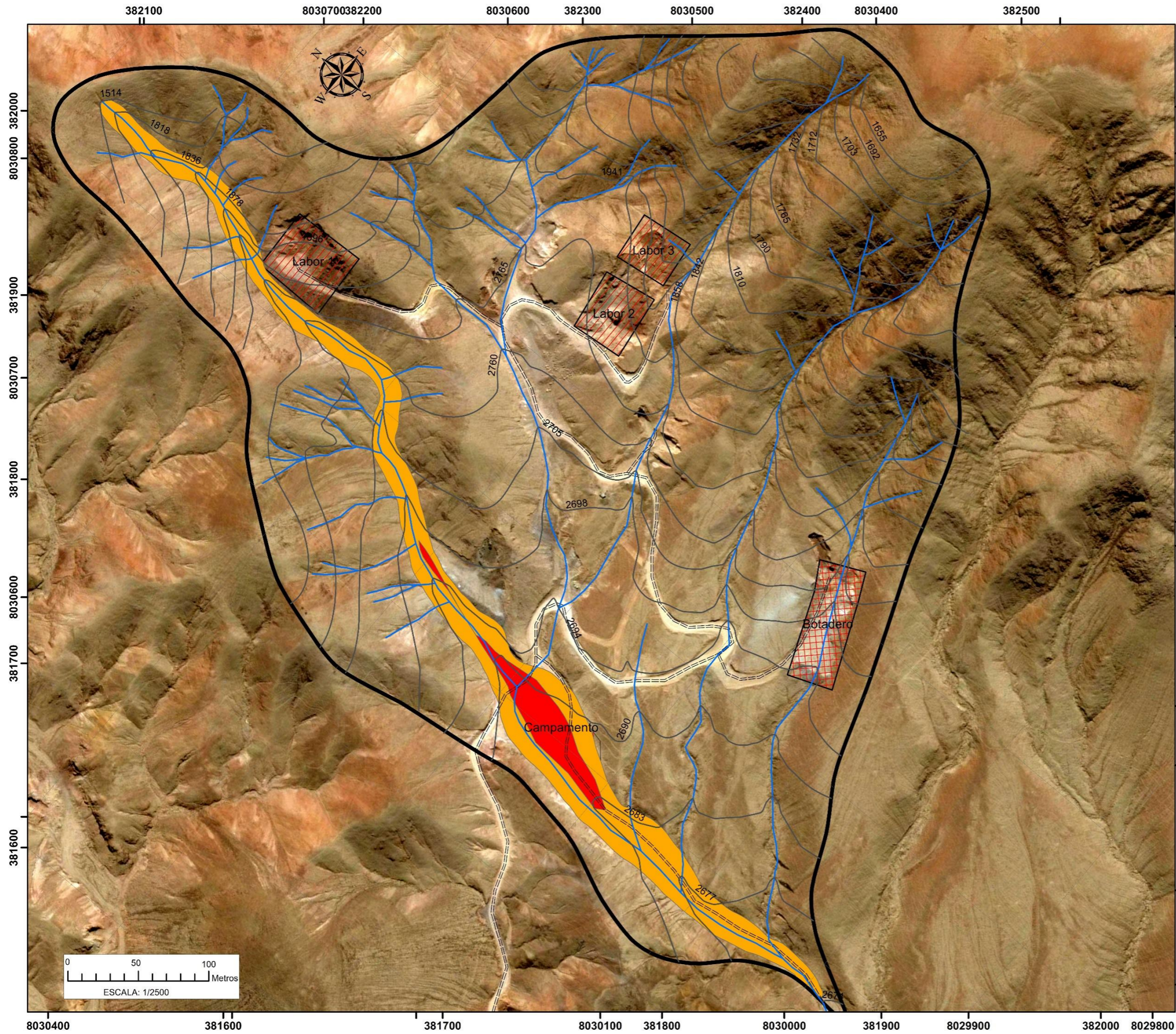
UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA DE TACNA" - TACNA"

MAPA DE RIEGO - 50 AÑOS

UBICACIÓN: REGIÓN : TACNA
 PROVINCIA : TACNA
 DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
 ASesor: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS MR-05
 ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K



SIMBOLOGÍA

- Curvas 10m
- Drenaje
- Acceso
- Botadero
- Campamento
- Labor 1
- Labor 2
- Labor 3

Riesgo

- Alto
- Medio

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL, ARQUITECTURA Y GEOTECNIA
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA GEOLOGICA - GEOTECNIA

TESIS: "DETERMINACION DEL NIVEL DE RIESGO POR DESBORDE E INUNDACION APLICANDO UN MODELO NUMERICO DE FLUJO DE ESCOMBROS FLO 2D PARA LA "MINA KARLA" DE TACNA" - TACNA"

MAPA DE RIESGO - 100 AÑOS

UBICACIÓN: REGION : TACNA
 PROVINCIA : TACNA
 DISTRITO : PACHIA

ELABORADO POR: Bach. ROSA ELISA LAURA QUISPE LÁMINA N°
 ASESOR: Ph.D. EDWIN MARTIN PINO VARGAS MR-06
 ESCALA: INDICADA DATUM: WGS84 19K