

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**ANALISIS DE LOS PARAMETROS
FLUVIALES EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS, EN EL ANEXO DE
VILCACOTO, APLICANDO UN MODELO
HIDRAULICO BIDIMENSIONAL**

AREA: SOSTENTABILIDAD DE RECURSOS

LINEA DE INVESTIGACION: HIDRAULICA SUSTENTABILIDAD

PRESENTADO POR LA BACHILLER:

LOURDES ANDREA ROJAS MALPARTIDA

PARA OPTAR TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

HUANCAYO – PERU

2017

HOJA DE CONFORMIDAD DE JURADOS

Dr. CASIO AURELIO, TORRES LÓPEZ
PRESIDENTE

Ing. VLADIMIR, ORDOÑEZ CAMPOSANO
JURADO

Ing. YINA MILAGRO, NINAHUANCA ZAVALA
JURADO

Ing. CHRISTIAN, MALLAUPOMA REYES
JURADO

Mg. MIGUEL ANGEL, CARLOS CANALES
SECRETARIO DOCENTE

ASESOR: ING. JUAN JOSE, BULLÓN ROSAS

DEDICATORIA

La presente tesis va dedicado a toda mi familia y amigos, principalmente a mi padre Juan Rojas Mayhua, que ha sido. Un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, concejos, oportunidad y recursos para lograrlos, y por último a esos verdaderos amigos con los que compartimos todos esos años juntos.

INDICE

DEDICATORIA.....	IV
INDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE IMÁGENES	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	XVI
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD	19
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
1.2.1. PROBLEMA GENERAL.....	20
1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICOS.....	20
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	20
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	20
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.4.1. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	21
1.4.2. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	21
1.5. LIMITACIONES	21
1.6. VALIDAZ DEL ESTUDIO	21
1.7. ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	22
MARCO TEÓRICO	23
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
2.1.1. NACIONAL.....	23
2.1.2. INTERNACIONAL.....	24
2.2. BASES TEÓRICAS.....	25
2.2.1. DEFINICIONES DE TÉRMINOS HIDROGRÁFICAS	25
2.2.2. CLASIFICACIÓN DE CUENCA.....	26

2.2.2.1.	EN RELACIÓN CON EL AREA	26
2.2.2.2.	EN FUNCION A SU ELEVACION	26
2.2.3.	POR LA DIRECCIÓN DE LA EVACUACIÓN DE LAS AGUAS.....	27
2.2.3.1.	PARTE AGUAS O DIVISORIA DE AGUAS	28
2.2.3.2.	ÁREA DE LA CUENCA.	28
2.2.3.3.	CAUCE PRINCIPAL DE UNA CUENCA.....	29
2.2.4.	PARAMETROS GEOMORFOLOGICAS	29
2.2.4.1.	PARÁMETROS DE FORMA	29
2.2.4.1.1.	ÁREA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (A).....	30
2.2.4.1.2.	PERÍMETRO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (P)	30
2.2.4.1.3.	COEFICIENTE DE GRAVELIUS O ÍNDICE DE COMPACIDAD.....	30
2.2.4.1.4.	FACTOR DE FORMA (F)	31
2.2.5.	PARÁMETROS DE RELIEVE.....	32
2.2.5.1.	ALTITUD MEDIA (H)	32
2.2.5.2.	PENDIENTE MEDIA (SM).....	33
2.2.5.3.	LA CURVA HIPSOMÉTRICA (CH).....	33
2.2.6.	PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA.....	35
2.2.6.1.	DENSIDAD DE DRENAJE (D)	35
2.2.6.2.	PENDIENTE MEDIA DE UN CAUCE (PC)	36
2.2.7.	TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T C)	36
2.3.	TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA EN ESCURRIMIENTO.....	37
2.3.1.	PARÁMETROS DEL PROCESO DE CONVERSIÓN DE LLUVIA A ESCURRIMIENTO..	38
2.3.2.	RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO.	38
2.3.3.	MODELOS DE PRECIPITACIÓN – ESCURRIMIENTO	39
2.4.	MÉTODOS EMPÍRICOS.....	39
2.4.1.	MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA (CN).....	40
2.4.2.	FORMULACION DEL MÉTODO CN.	40
2.4.3.	MÉTODOS ESTADÍSTICOS	44
2.4.3.1.	HIDROGRAMAS.	44
2.5.	HIDRÁULICA FLUVIAL	46
2.5.1.	PARÁMETROS HIDRÁULICAS Y GEOMÉTRICAS.....	46
2.5.2.	FLUJOS EN CORRIENTES NATURALES.	47
2.5.3.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FLUJOS.	48
2.5.4.	VELOCIDAD DE LOS FLUJOS.....	48

2.5.5.	TIPOS DE FLUIDOS	49
2.5.6.	COMPOSICIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS.....	53
2.5.6.1.	CLASIFICACION PARA LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS.	54
2.5.6.2.	FLUJOS DE CORRIENTE ORDINARIO	55
2.5.6.3.	FLUJOS DE LODO	55
2.5.6.4.	FLUJOS HIPERCONCENTRADOS	56
2.5.6.5.	FLUJOS DE DETRITOS (DEBRIS FLOWS)	56
2.5.6.6.	FLUJOS GRANULARES.....	57
2.5.6.7.	PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS.	58
2.5.6.7.1.	VELOCIDAD.....	58
2.5.6.7.2.	PENDIENTE	58
2.5.6.7.3.	ÁNGULO DE DEPOSICIÓN	59
2.5.6.8.	CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS.....	59
2.5.6.9.	CONCEPTOS IMPORTANTES DEL MECANISMO DE SOPORTE DE LA PARTÍCULA. 61	
2.5.6.9.1.	ESFUERZO DISPERSIVO.	62
2.5.6.9.2.	FUERZA MATRICIAL	63
2.5.6.9.3.	GRADACIÓN INVERSA.....	63
2.6.	APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO.	64
2.6.1.	MODELOS HIDROLÓGICOS	64
2.6.2.	TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	64
2.6.3.	MODELOS HIDRÁULICOS	66
2.6.4.	TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS.	66
2.6.4.1.	MODELOS DE LECHO FIJO O AGUA CLARA.....	66
2.6.4.2.	MODELOS DE LECHO MÓVIL.....	66
2.6.4.3.	MODELOS DE RÉGIMEN NO - PERMANENTE.	67
2.6.4.4.	MODELOS MATEMÁTICOS FLUVIALES O DE FLUJO LIBRE.	67
2.6.7.	PROCEDIMIENTOS NUMÉRICOS DEL IBER v 2.4.2.	68
2.6.8.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO IBER v 2.4.2.	68
2.6.8.1.	ECUACIONES BÁSICAS	69
2.6.8.2.	SOLUCION NUMERICA.....	69
2.6.8.3.	ESQUEMAS NUMÉRICOS.....	70
2.6.8.5.	MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS	78
2.6.8.6.	CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA DE SEDIMENTOS	81
3.1.	MARCO METODOLOGÍCO	84

3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	84
3.1.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	84
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	85
3.2.1. POBLACIÓN	85
3.2.2. MUESTRA	85
3.4. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES.....	86
3.5. LIMITACIONES	86
3.5.1. ECONOMICAS	87
3.5.2. TECNICAS.....	88
3.6.1. TEMPORAL.....	88
3.6.2. ESPACIAL	88
3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	89
3.7.1. TÉCNICAS.....	89
3.7.2. BUSQUEDA DE INFORMACION BIBLIOGRAFICA.....	89
3.7.3. DATOS DE CAMPO.....	89
3.7.4. TRABAJOS DE GABINETE	89
3.8. ASPECTOS ÉTICOS.....	90
DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	91
4.1.1. DATOS DEL PROYECTO.	91
4.2. CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA.	92
4.2.1. UBICACIÓN GEOGRAFICA, EXTENCIÓN Y LÍMITES.....	92
4.3. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS.....	93
4.4. HIDROLÓGICAS.....	97
4.4.1. HIDROGRAFÍA.....	97
4.4.2. GEOMORFOLÓGICOS.....	97
4.4.3. HIDROLOGÍA.....	101
4.4.3.1. PRECIPITACIONES	101
4.4.3.2. PRECIPITACION MÁXIMA DE 24 HORAS (P24).....	101
4.4.4.3. CELDAS DE PRECIPITACIÓN CONCENTRADA	101
4.4.4.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETARDO (Tlag).....	102
4.4.4.5. DESCRIPCIÓN DEL USO DE TIERRAS Y CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA (CN).	102
4.4.4.6. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.	103
4.4.4.7. HIDROGRAMA DE AVENIDA LÍQUIDO (INFLOW).....	104

4.4.4. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEODINÁMICA.....	106
4.4.4.1. GEOLÓGIA.	106
4.4.4.2. GEODINÁMICA	106
4.4.4.2.1. VULNERABILIDAD DE LAS TIERRAS.	107
4.4.5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS	108
4.4.5.1. MECÁNICA DE SUELOS Y MEDICIONES DE CAMPO.	108
4.5. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO	112
4.5.1. INFORMACIÓN BÁSICA.....	112
4.5.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN CON EL IBER V 2.4.2	114
4.6. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS.....	115
PRESENTACION DE RESULTADOS.....	119
5.1.1. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	119
5.1.2. Análisis para Q max = 55.40 m³/s (CN=73 – CURVA CALCULADA).....	119
5.1.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=73 CURVA CALCULADA)	121
5.1.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=75 / CURVA EXTREMA)	125
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	128
6 . 1 . CONTRASTE DE RESULTADOS CON EVIDENCIA DE CAMPO Y CALIBRACIÓN.	128
6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	133
6.3 SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL ANEXO VILCACOTO	134
6.4 ELABORACIÓN DEL MAPA PRELIMINAR DE AMENAZA.	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1: Partes de la cuenca..	27
Figura 2. 2: tipos de evacuación de cuencas.....	28
Figura 2. 3: Divisoria de aguas.	28
Figura 2. 4: Componentes de una cuenca.....	29
Figura 2. 5: Diferentes Hidrogramas para cada tipo de cuencas,	31
Figura 2. 6: Curva Hipsométrica de una Cuenca	34
Figura 2. 7: Curvas Hipsométricas Características del Ciclo de Erosión de una Cuenca	35
Figura 2. 8: Curva Intensidad-Duración.....	38
figura 2.9: Relación lluvia-escorrimento.....	39
figura 2. 10: Variables en el método de abstracciones del SCS.....	41
figura 2. 11: hidrograma en función del caudal y tiempo	45
figura 2. 12: Partes o componentes del hidrograma.....	45
figura 2. 13: Esquematación del perfil longitudinal y secciones transversales	47
figura 2. 14: Formación de un flujo y partes de residuos en una ladera.	48
figura 2. 15: clasificación general de los fluidos.....	49
figura 2. 16: Típica relación entre el esfuerzo cortante	50
figura 2. 17: Incremento del Diámetro.....	54
figura 2. 20: Angulo de inclinación.....	59
figura 2. 21: Representación Idealizada de un brazo de flujos de escombros.....	60
figura 2. 22: Composición de una oleada de flujos de escombros	61
figura 2. 23: Transporte de grandes bloques, debido al esfuerzo dispersivo.	63
figura 2. 24: Tipos de modelos matemáticos en hidrología.....	65
figura 2. 25: Ejemplo de malla no estructurada formada por elementos triangulares.	71
figura 2. 26: Ejemplo de malla de discretización	72
figura 2. 27: Modelos de deformación del fluido	76
figura 4. 1: Ubicación Región, Provincia, Distrito.....	91
figura 4. 3: Vista de los tres niveles de terrazas	93
figura 4. 5: Diagrama de flujo utilizado en el programa IBER V 2.4.2.....	114

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 5. 1: Hidrograma líquido + sólido.	120
Imagen 5. 2: Tirantes máximos.	121
Imagen 5. 3: Velocidades máximas.	122
Imagen 5. 4: Hidrograma líquido y sólido.....	123
Imagen 5. 5: Tirantes máximos.....	125
Imagen 5. 6: Velocidades máximas. Tirantes máximos.	126
Imagen 6. 1: Punto De Control Para Calibración Del Modelo Hidráulico.....	
	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 6. 2: Tirante máximo de 1.80 m aguas arriba del rio shullcas.....	
	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 6. 3: Tirante máximo de 2.40 m aguas arriba del rio shullcas	
	¡Error! Marcador no definido.
Imagen 6. 4: Tirante máximo de 1.65 m aguas arriba del rio shullcas	129
Imagen 6. 5: Hidrograma líquido y sólido.....	130
Imagen 6. 6: Tirantes máximos.	131
Imagen 6. 7: Velocidades máximas.	132
Imagen 6. 8: Tirantes máximos.	135
Imagen 6. 9: Secciones Transversales Del Rio Shullcas.	135
Imagen 6. 10: Velocidades máximas.	136
Imagen 6. 11: Numero de Froude.	137
Imagen 6. 12: Mapa de Peligrosidad para un caudal.....	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: cuadro de cuencas según su área geográfica.....	26
Tabla 2. 2: Zonificación de la cuenca.....	27
Tabla 2. 3: Formas de cuencas.....	31
Tabla 2. 4: Valores Interpretativos Del Factor Forma .	32
Tabla 2. 5: Grupos de suelos hidrológicos .	41
Tabla 2. 6: Números de curva de escorrentía para usos de suelos .	42
Tabla 2. 7: clasificación de clases antecedentes de humedad (amc) .	44
Tabla 2. 8: Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D. .	68
Tabla 2. 9: Parámetros de Resistencia para flujo laminar .	78
Tabla 2. 10: Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla).....	80
Tabla 2. 11: Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de Cv.....	80
Tabla 2. 12: Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv	82
Tabla 4. 1: Principales faces identificadas en la subcuenca del río Shullcas .	94
Tabla 4. 2: Contabilización de aluviones en la subcuenca del río Shullcas .	97
Tabla 4. 3: Características de las lagunas .	97
Tabla 4. 4: Calculo de curva hipsométrica. .	98
Tabla 4. 5: Cuadro resumen de las características morfológicas de la zona .	100
Tabla 4. 6: Precipitaciones Para Diferentes Periodos De Retorno .	101
Tabla 4. 7: Calculo del tiempo de retardo para la zona de estudio .	102
Tabla 4. 8: Calculo del número de curva (CN) en función al grupo hidrológico.....	103
Tabla 4. 9: Coeficientes de Manning.....	103
Tabla 4. 10: resumen de resultados de la granulometría – ASTM D422. .	109
Tabla 4. 11: Contenido de Humedad - ASTM D2215.....	111
Tabla 4. 12: Peso Específico Relativo de Sólidos - ASTM D854 .	111
Tabla 4. 13: Caudales Máximos - Río Shullcas.....	113
Tabla 5. 1: Salida de datos del programa IBER V 2.4.2 ($Q_p(l+s)=72.02$ m ³ /s.....	120
Tabla 5. 2: Salida de datos del programa IBER V 2.4.2 ($Q_p(l+s) =86.97$ m ³ /s). .	123
Tabla 6. 1: Salida de datos (Calibrado) del programa IBER V 2.4.2 .	130
Tabla 6. 2: Tabla de amenaza para alud torrencial	138

LISTA DE SÍMBOLOS

A	= Área de la cuenca, (Km ²)
B	= Ancho Promedio de la cuenca, (Km)
L _c	= Longitud de la cuenca
A _s	= Área sobre la curva hipsométrica
A _b	= Área bajo la curva hipsométrica
L _g	= Tiempo de retardo del hidrograma unitario, en horas
L	= Longitud del cauce principal, en millas.
L _{ca}	= Longitud de desembocadura al centro de gravedad de la cuenca, en millas
S	= Pendiente promedio del curso de agua, en pies por milla
K _n	= Valor promedio de rugosidad, característico de la cuenca
V _x y V _y	= Componentes de la velocidad media
S _f	= Pendiente de fricción
g	= Aceleración de la gravedad
S _o	= Pendiente del lecho
i	= Intensidad de la precipitación
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
ΔQ _x	= Delta de la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación
Δt	= Variación del tiempo i e i + 1
τ	= Esfuerzo cortante total
τ _c	= Esfuerzo límite cohesivo
τ _{mc}	= Esfuerzo de Mohr-Coulomb
τ*	= Esfuerzo cortante en exceso adimensional
D _v *	= Tasa dispersivo-viscoso adimensional
T _d *	= Tasa turbulento-dispersivo
S _f	= Pendiente de fricción total
S _y	= Pendiente de cedencia
S _v	= Pendiente viscosa
Std	= Pendiente turbulenta- dispersiva
p _m	= Peso específico de la mezcla de sedimentos

RESUMEN

La presente investigación responde a la siguiente interrogante: ¿Cómo definir zonas de riesgo de flujos de lodos generados por parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos y evitar áreas vulnerables de crecidas en la sub cuenca del río Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín-Perú?, para cuyo efecto se formuló como objetivo principal: Definir zonas de riesgo de flujos de lodos generados en una máxima avenida generados por los parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos y evitar áreas vulnerables de inundación con la aplicación de modelo IBER V. 2.4.2. en la sub cuenca del río Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín – Perú, y la hipótesis que debe verificarse es: Los flujos de lodos generados por parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos originan zonas vulnerables y de inundación en la sub cuenca del río Shullcas en anexo de Vilcacoto.

El tipo de investigación es Aplicada, tiene un nivel explicativo, y con un diseño experimental, la población esta conformada el tipo de muestra es no probabilístico y que para el presente estudio esta constituido por el río shullcas desde el kilómetro 22+00 - 22+800 en el anexo de vilcacoto.

La conclusión fundamental de esta investigación es que los flujos de lodos generados por parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos originan zonas vulnerables y de inundación en la sub cuenca del río Shullcas en anexo de Vilcacoto.

PALABRAS CLAVES: Flujos de escombros, Hidrológicos, hidráulicos y geomorfológicos.

ABSTRACT

The present investigation responds to the following question: How to define risk zones of sludge flows generated by hydrological, geomorphological and hydraulic parameters and to avoid vulnerable flooding areas in the sub-basin of the Shullcas river, Vilcacoto annex of the Tambo district, province of Huancayo, Junín - Peru ?, for whose purpose the main objective was formulated: Define risk zones of sludge flows generated in a maximum avenue generated by hydrological, geomorphological and hydraulic parameters and avoid vulnerable flood areas with the application of the IBER model V. 2.4.2. in the sub-basin of the Shullcas river, annex of Vilcacoto district of Tambo, province of Huancayo, Junín - Peru, and the hypothesis that must be verified is: Sludge flows generated by hydrological, geomorphological and hydraulic parameters originate vulnerable and flood zones in the sub-basin of the Shullcas River in the Vilcacoto annex.

The type of research is Applied, has an explanatory level, and with an experimental design, the population is conformed the type of sample is not probabilistic and that for the present study is constituted by the river shullas from kilometer 22 + 00 - 22+ 800 in the annex of vilcacoto.

The fundamental conclusion of this research is that the mudflows generated by hydrological, geomorphological and hydraulic parameters originate vulnerable and flood zones in the sub-basin of the Shullcas river in the Vilcacoto annex.

KEY WORDS: Debris, hydrological, hydraulic and geomorphological flows.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis de investigación titulada: ¿Cómo definir zonas de riesgo de flujos de lodos generados por parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos y evitar áreas vulnerables de crecidas en la sub cuenca del río Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín-Perú, se elaboró con la finalidad de localizar las zonas vulnerables del anexo de vilcacoto por los efectos impredecibles de la naturaleza, como en este caso ocasionados por el fenómeno del niño. Utilizando los parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos haciendo uso del programa bidimensional IBER V 2.4.2.

El lugar donde se realizó la investigación es en el anexo de Vilcacoto el cual tiene como antecedentes los años (1990) sufrió daños de transporte de flujos de escombros originados por el fenómeno del niño. Ocasionando pérdidas irreparables como es las vidas humanas y muchos daños materiales a la población de Vilcacoto.

En la actualidad, podemos encontrar modelos numéricos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales como, por ejemplo, el HEC-RAS, REVERCAD, FLDWAV y FLOW3D que simulan flujos viscosos en 3 direcciones; y el IBER V 2.4.2. Que se realizara la simulación bidimensional de flujos de lodos y escombros. Estos modelos, han sido empleados en países como Estados Unidos, Venezuela, Italia, Japón, entre otros; generando la aceptación de los investigadores. Además, el IBER es un modelo aceptado y reconocido por FEMA (Federal Emergency Management Agency).

Para nuestro modelamiento, aplicaremos el Modelo Numérico IBER V. 2.4.2, versión 2016, calibrado por (O'Brien - Utah). Para la Sub cuenca del río Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín-Perú. La organización de la investigación se conforma de la siguiente manera:

El Capítulo I: Hacemos mención del Planteamiento del Estudio, se menciona el planteamiento del problema, la formulación de problema, el objetivo general y específico, formulación de la hipótesis general y específico, las justificaciones, las limitaciones, viabilidad del estudio.

El Capítulo II: Describiremos el Marco Teórico, se describe los antecedentes de la investigación y las bases teóricas.

El Capítulo III: Trata sobre la Metodología de la Investigación, se detalla las Variables y Operacionalización de variables, el diseño metodológico, tipo de estudio, nivel de investigación y las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El capítulo IV: Se prosigue con la modelación sobre el desarrollo de la investigación, con la modelación Hidráulica utilizando el software. Se ha hecho la comparación y ajustes respectivos de resultados obtenidos por el software y los resultados de la medición física en lugar del estudio. Finalmente se obtiene el modelo hidráulico (Calibrado) con un rango de aproximación aceptable para esta investigación.

El capítulo V: Verificamos los resultados de la investigación, de los parámetros de hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos obtenidos por la modelación Hidráulica utilizando el software IBER V.2.4.2.

El capítulo VI: Se concluye con la Discusión de Resultados, y culminando esta investigación está las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Asimismo, espero que los resultados del presente estudio aporten a la Facultad de Ingeniería y a la zona de estudio de manera productiva, el cual permita a los futuros profesionales a seguir investigando en las líneas de investigación claramente delimitadas

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCION DE LA REALIDAD

Al paso del tiempo, el natural y continuo desarrollo de las poblaciones y de sus economías han llevado a las ciudades a un crecimiento tal, que un fenómeno fluvial extremo implica mayores riesgos para sus habitantes.

En el Perú, los fenómenos que alteran las condiciones el clima y provocan fuertes lluvias, que generan grandes inundaciones y huaicos, es conocido como el fenómeno del niño. Este fenómeno ocurre de una manera inesperada y traen como consecuencia pérdidas de viviendas, obras civiles, zonas de cultivo y las pérdidas irreparables son las vidas humanas. Por lo que se deben, tomar las medidas preventivas de seguridad contra posibles desastres, inundaciones y huaicos provocados por el fenómeno del niño.

Las fuentes más fáciles y comunes que discurren son las quebradas siendo las más difíciles que debemos de solucionar, y los huaicos 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 huaico demuestra su poderío destructivo enterrando estructuras y coches en su camino; cubriendo carreteras, campos, pastos con una gran manta de lodo y piedras de diversos tamaños.

El modelamiento que, aplicaremos es el Modelo Numérico bidimensional IBER V 2.4.2. para la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín-Perú.

1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA

2.2.1.1. PROBLEMA GENERAL.

¿Cómo definir zonas de riesgos de flujos de lodos determinados por los componentes hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos y evitar áreas vulnerables de crecidas en la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín-Perú?

2.2.1.2. PROBLEMA ESPECIFICOS.

- a) ¿Qué parámetros hidrológicos influyen en el transporte de flujos de lodos, que generan zonas de riesgo de crecidas, en la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto?
- b) ¿Qué parámetros geomorfológicos influyen en el transporte de flujos de lodos, que generan zonas de riesgo de crecidas, en la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto?
- c) ¿Qué parámetros hidráulicos influyen en el transporte de flujos de lodos, que generan zonas de riesgo de crecidas, en la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.2.1.3. OBJETIVO GENERAL

Definir zonas de riesgo de flujos de lodos determinados por los componentes hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos y evitar áreas vulnerables de crecidas con la aplicación de modelo IBER 2.4.2. en la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto distrito del Tambo, provincia de Huancayo, Junín – Perú?

2.2.1.4. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- a) Identificar los componentes hidrológicos que originan el transporte de flujos de lodos, que generan zonas de riesgo. En la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto.
- b) Determinar los componentes geomorfológicos que originan el transporte de flujos de lodos, que generen zonas de riesgo En la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto.

- c) Analizar los componentes hidráulicos que originan el transporte de flujos de lodos, que generen zonas de riesgo En la sub cuenca del rio Shullcas, anexo de Vilcacoto.

1.4. **JUSTIFICACION DE LA INVESTIGACION**

2.2.1.5. **JUSTIFICACION METODOLOGICA**

Con la elaboración de un programa numérico computacional, se busca mejorar a entender y visualizar el comportamiento del transporte de flujos de lodos en la sub cuenca del rio Shullcas en anexo de Vilcacoto.

2.2.1.6. **JUSTIFICACION PRÁCTICA**

Con la elaboración del mapa de riesgo será más fácil delimitar las zonas de crecidas de conciencia frente a los fenómenos naturales e informar a la población de manera fácil y técnica sobre las consecuencias de estos desastres.

1.5. **LIMITACIONES**

El problema de investigación que tenemos definir zonas de riesgo de flujos de lodos generados por los componentes hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos e evitar áreas vulnerables de inundación es la incorrecta ubicación de las edificaciones puesto que conlleva a hacer un rediseño de la ubicación de viviendas, que en muchos casos las máximas avenidas afectan, así como también el presente estudio no se evaluará la economía de los daños ocasionados por una máxima avenida que se obtenga del análisis de riesgos.

Por cuestiones de conveniencia y de tiempo para la presente tesis se definió estudiar el Rio Shullcas.

1.6. **VIALIDAD DEL ESTUDIO**

Esta investigación es viable, ya que se ubica dentro de la región Junín el rio shullcas, se cuenta con la disponibilidad de información, donde se pueden realizar los parámetros, y en teoría me apoye netamente los datos de precipitación anual, para luego así poder calcular las áreas de vulnerabilidad y flujos de lodos, sedimentos (escombros).

1.7. ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La organización de la investigación está de la siguiente manera:

El Capítulo I: Hacemos mención del Planteamiento del Estudio, se menciona el planteamiento del problema, la formulación de problema, el objetivo general y específico, formulación de la hipótesis general y específico, las justificaciones, las limitaciones, viabilidad del estudio.

El Capítulo II: Describiremos el Marco Teórico, se describe los antecedentes de la investigación y las bases teóricas.

El Capítulo III: Trata sobre la Metodología de la Investigación, se detalla las Variables y Operacionalización de variables, el diseño metodológico, tipo de estudio, nivel de investigación y las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

El capítulo IV: Se prosigue con la modelación sobre el desarrollo de la investigación, con la modelación Hidráulica utilizando el software. Se ha hecho la comparación y ajustes respectivos de resultados obtenidos por el software y los resultados de la medición física en lugar del estudio. Finalmente se obtiene el modelo hidráulico (Calibrado) con un rango de aproximación aceptable para esta investigación.

El capítulo V: Verificamos los resultados de la investigación, de los parámetros de hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos obtenidos por la modelación Hidráulica utilizando el software IBER V.2.4.2.

El capítulo VI: Se concluye con la Discusión de Resultados, y culminando esta investigación está las conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Asimismo, espero que los resultados del presente estudio aporten a la Facultad de Ingeniería y a la zona de estudio de manera productiva, el cual permita a los futuros profesionales a seguir investigando en las líneas de investigación claramente delimitadas

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

Al paso del tiempo, el natural y continuo desarrollo de las poblaciones y de sus economías han llevado a las ciudades a un crecimiento tal, que un fenómeno fluvial extremo implica mayores riesgos para sus habitantes, así como para la infraestructura habitacional, vial, industrial, telecomunicaciones, agrícola.

En estos últimos años, los fenómenos naturales que alteran las condiciones el clima y provocan fuertes lluvias, que generan grandes inundaciones y huaicos, es conocido como el fenómeno del niño. Este fenómeno ocurre repentinamente y traen como consecuencia pérdidas de viviendas, obras civiles, zonas de cultivo y las pérdidas irreparables de vidas humanas. Por lo que se deben, tomar las medidas preventivas de seguridad contra posibles desastres, inundaciones y huaicos provocados por el fenómeno del niño.

2.1.1. NACIONAL

GUARNIZ M, CARLOS K, (2014), Realizo estudios sobre “Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo”, Trujillo – Perú.

El objetivo fue determinar las diferencias que se obtienen en el hidrograma de salida generado por la rotura en presas de materiales sueltos, usando para la obtención del hidrograma un esquema numérico unidimensional y un esquema bidimensional. Con la investigación realizada se pretende hacer un aporte en el estudio de los flujos de lodo y escombros en nuestro país, iniciando una línea de investigación muy importante en lo que se refiere a mitigación de desastres. En términos generales los resultados obtenidos mediante el programa IBER detallan

con mayor exactitud y profundidad el proceso de generación y propagación de una onda de rotura, así como las características de la inundación provocada por la misma, aproximándose con mayor veracidad los sucesos provocados por una rotura de presa.

MARISA R. SILVA D, (2012) Estudio y Modelamiento Matemático de los Procesos de Sedimentación y Purga de un Reservorio, Lima.

El objetivo es asegurar el mantenimiento de la vida útil del embalse que puede verse afectada por la acumulación de sedimentos, mediante la formulación de reglas de operación de compuertas para lograr la purga de sedimentos del embalse. El estudio se ha aplicado al reservorio Chimay ubicado en el departamento de Junín con capacidad de 1,5 hm³ para regulación horaria.

2.1.2. INTERNACIONAL

ING. SANTIAGO A G. (2014) evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales. Aplicación en un tramo del río suquía que incluye la confluencia con el arroyo la cañada, provincia de córdoba.

El Objetivo General de esta Tesis de Maestría es el estudio de las características hidrodinámicas en cauces naturales a través del uso y contraste de modelos numéricos y experimentales; se va a considerar el escenario de un tramo del río Suquía que incluye la confluencia con el arroyo. La Cañada para predecir el comportamiento de este tipo de flujos en eventos de crecida. Es así como, mediante la aplicación de esquemas numéricos y un modelo físico ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de Córdoba se busca caracterizar las variables de mayor importancia que afectan el comportamiento de estos elementos de vital importancia en los sistemas fluviales. De este Objetivo General se desprenden los siguientes Objetivos Específicos que permitirán llevar el análisis con éxito:

ÁNGELO ENRIQUE P. (2015), modelación bidimensional de flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER - Quito.

Interpretar el programa IBER para la simulación numérica del flujo bidimensional producido por la rotura de una presa de material suelto. Los resultados obtenidos en la modelación serán comparados con los resultados del análisis

unidimensional del programa HEC –RAS, para el mismo caso. Este análisis proporcionara información respecto a las condiciones de trabajo de los programas, además utilizar esta información en el desarrollo de zonas de riesgo en el caso de una falla en presa de tierra. El programa IBER, permite trabajar sobre una superficie, lo que facilita el trabajo y evitar seleccionar secciones transversales e ingresarlas para una posterior modelación. Emplea esquemas numéricos robustos, tiene un entorno amigable en preproceso y posproceso. Así mismo, IBER posee además del módulo hidrodinámico, dos módulos: de turbulencia y de transporte de sedimentos (carga de fondo y en suspensión). Considerando también, que se encuentra en continuo desarrollo y mejoras permitiendo incorporar nuevas funciones, en conclusión, se puede acotar que, los resultados de la modelación de IBER se asemeja más a lo que pudiese para en la falla de una presa.

2.3. BASES TEORICAS.

2.3.1. DEFINICIONES DE TERMINOS HIDROGRÁFICAS.

Sedimentos, Es un material sólido acumulado sobre la superficie terrestre (litósfera) derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera.

Flujos de lodo, Es el tipo de flujo más rápido (sobre los 80 km/h) y fluido de corrimientos de tierra, mezclas de materiales finos (arena, limo y arcilla) y más gruesos (grava), conteniendo una cantidad variable de agua, la cual se agrega de detritos vegetales. El material transportado tiene una granulometría muy variable, y un fenómeno singular se manifiesta frecuentemente con oleadas sucesivas ("pulsaciones") debido a la obstrucción temporal del canal de transporte.

Flujos de Escombros, Son una mezcla de sedimentos pobremente clasificados y agua que se mueven pendiente abajo, bajo efectos de la gravedad, y se presenta en diversos ambientes.

Cuenca hidrográfica, En el 2003 González expresa que "Una cuenca hidrográfica o Topográfica es toda aquella parte del terreno donde el agua de

lluvia que corre por la superficie se concentra y pasa por un punto del cauce principal que la drena”. (p.11).

“**La cuenca hidrográfica**, también llamada base de drenaje, es el área completamente drenada por un río o sistema de ríos o quebradas, conectadas en tal forma que todo escurrimiento originado en el área es descargado a través de una sola salida”. (Prieto, 2004, p.235).

Cuenca, Área caracterizada por tener el drenaje en un punto común, Sistema integrado por varias subcuencas o microcuencas.

Subcuencas, Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente.

Microcuencas, Una micro cuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias microcuencas.

Quebradas, Es toda área que desarrolla su drenaje directamente a la corriente principal de una microcuenca.

2.3.2. CLASIFICACIÓN DE CUENCA

2.3.2.1. EN RELACIÓN CON EL AREA

Una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño, en cuencas grandes, medianas y pequeñas.

Tabla 2. 1: cuadro de cuencas según su área geográfica.

TAMAÑO DE LA CUENCA Km2.	DESCRIPCION
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2500	Intermedia - grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy grande

2.3.2.2. EN FUNCION A SU ELEVACION

a) Cuenca alta

Corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas.

b) Cuenca media

Donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde

el río principal mantiene un cauce definido.

c) Cuenca Baja o zonas transicionales

Donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales.



Figura 2. 1: Partes de la cuenca. Fuente: Adaptado por Ordoñez, 2011.

Esta división por zonas resulta útil en el análisis del comportamiento de los diferentes componentes del balance hídrico, sino que también apoya en la delimitación de las zonas funcionales de la cuenca, que en términos generales coinciden con la caracterización del ambiente fluvial de Robertson (1992), quien define un sistema fluvial generalizado basado en Schumm (1977) con la zonificación que se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2: Zonificación de la cuenca.

	Zona alta	Zona media	Zona baja
	Montaña y colinas	Valle aluvial	delta
Procesos dominantes	Erosión	Transporte	Sedimento
influencia	Lito/Relieve	Erosión – Sedimentación.	Fluvio – Marina.

Fuente: Pladeyra (2003).

2.3.3. POR LA DIRECCIÓN DE LA EVACUACIÓN DE LAS AGUAS.

a) Cuencas Exorreicas o abiertas

Drenan sus aguas al mar o al océano. Un ejemplo es la cuenca del Río Rímac, en la Vertiente del Pacífico.

b) Cuencas Endorreicas o cerradas

Desembocan en lagos, lagunas o salares que no tienen comunicación fluvial al mar. Por ejemplo, la cuenca del río Huancané, en la Vertiente del Titicaca

c) Cuencas arreicas

Las aguas se evaporan o se filtran en el terreno antes de encauzarse en una red de drenaje. Los arroyos, aguadas y cañadones de la meseta patagónica

central pertenecen a este tipo, ya que no desaguan en ningún río u otro cuerpo hidrográfico de importancia. También son frecuentes en áreas del desierto del Sáhara y en muchas otras partes.

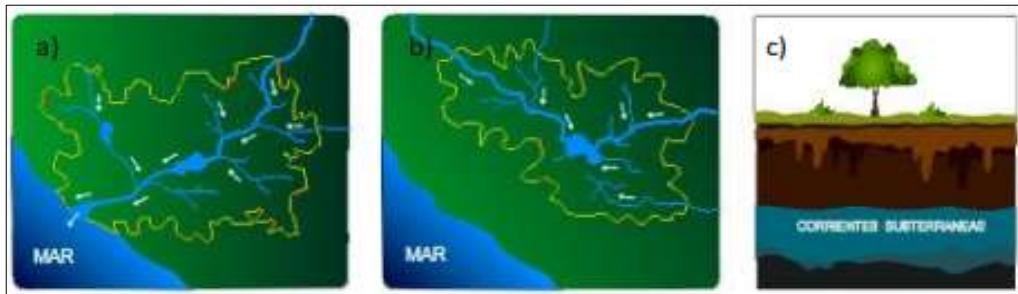


Figura 2. 2: tipos de evacuación de cuencas.

Las cuencas presentan tres elementos los cuales son: elementos: Parte aguas o divisoria de aguas, área de la cuenca y el cauce principal de la cuenca.

2.3.3.1. PARTE AGUAS O DIVISORIA DE AGUAS

La divisoria de aguas o *divortium aquarum* es una línea imaginaria que delimita la cuenca hidrográfica. Una divisoria de aguas marca el límite entre cuenca hidrográficas y las cuencas vecinas. El agua precipitada a cada lado de la divisoria desemboca generalmente en ríos distintos. También se denomina “parteaguas”.



Figura 2. 3: Divisoria de aguas, adaptado por Casa verde (2011).

2.3.3.2. ÁREA DE LA CUENCA.

Superficie en proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido-directa o indirectamente a un mismo cauce natural, está delimitado por la divisoria de aguas, influye directamente en la cantidad de agua que ella puede producir.

2.3.3.3. CAUCE PRINCIPAL DE UNA CUENCA

Corriente principal que recorre la cuenca, toda cuenca tiene una y solo una corriente principal que es la que le da el nombre; las demás corrientes se denominan cauces secundarios (tributarios). Las cuencas correspondientes a las corrientes tributarias se llaman cuencas tributarias o sub cuencas.



Figura 2. 4: Componentes de una cuenca

2.3.4. PARAMETROS GEOMORFOLOGICAS

La cuenca como unidad dinámica natural es un sistema hidrológico en el que se reflejan acciones recíprocas entre parámetros y variables. Las variables pueden clasificarse en variables o acciones externas, conocidas como entradas y salidas al sistema, tales como: precipitación, escorrentía directa, evaporación, infiltración, transpiración; y variables de estado, tales como: contenido de humedad del suelo, salinidad, cobertura vegetal, entre otros. Los parámetros en cambio permanecen constantes en el tiempo y permiten explicar las características fisiomorfométricas de la cuenca.

La morfología de la cuenca se define mediante tres tipos de parámetros:

- Parámetros de forma
- Parámetros de relieve
- Parámetros relativos a la red hidrográfica

2.3.4.1. PARÁMETROS DE FORMA

Sus formas son totalmente variables ya que depende de su topografía, antes de desarrollar los parámetros de forma se requieren establecer dos parámetros básicos: el área y el perímetro de la cuenca.

2.3.4.1.1. ÁREA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (A)

Es la superficie de la cuenca comprendida dentro de la curva cerrada de divortium aquarum. La magnitud del área se obtiene mediante el planimetrado de la proyección del área de la cuenca sobre un plano horizontal. Dependiendo de la ubicación de la cuenca, su tamaño influye en mayor o menor grado en el aporte de escorrentía, tanto directa como de flujo de base o flujo sostenido.

Los tamaños relativos de estos espacios hidrológicos definen o determinan, aunque no de manera rígida, los nombres de micro cuenca, sub cuenca o cuenca.

2.3.4.1.2. PERÍMETRO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA (P)

Es la longitud de la línea de divortium aquarum. Se mide mediante el curvímetro o directamente se obtiene del software en sistemas digitalizados. También se puede obtener con el recorrido de un curvímetro sobre la línea que encierra la forma de la cuenca.

La forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos y la distribución de los hidrogramas resultantes de una precipitación dada. Así en una forma alargada el agua escurre en general solo por un cauce, mientras que en una forma ovalada los escurrimientos recorren cauces secundarios hasta llegar a uno principal por lo tanto su duración es superior. Los índices más utilizados para representar estas características son:

2.3.4.1.3. COEFICIENTE DE GRAVELIUS O ÍNDICE DE COMPACIDAD

Relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de otra cuenca teórica circular de la misma superficie, es expresada por la siguiente forma:

$$C_g = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.0)$$

Donde:

C_g : es el coeficiente de Gravelius.

P : es el perímetro de la cuenca en Kilómetros.

A : es la superficie de la cuenca en Km²

El valor que toma esta expresión siempre es mayor que 1 y crece con la irregularidad de la forma de la cuenca, estableciéndose la siguiente clasificación:

Tabla 2. 3: Formas de cuencas

Índice Cg	Forma de la cuenca
1.00 a 1.25	Redonda
1.26 a 1.50	Ovalada
1.51 a 1.75	Oblonga a rectangular

2.3.4.1.4. FACTOR DE FORMA (F)

La forma se considera una característica morfométrica, cuyo concepto es complejo con muchos atributos específicos. Por esta razón, es difícil caracterizar satisfactoriamente la forma de una cuenca mediante un simple valor numérico.

El índice propuesto por Horton se estima a partir de la relación entre el área A de la cuenca y el cuadrado del máximo recorrido (L). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas a lentas y sostenidas, según que su factor de forma tienda hacia valores extremos grandes o pequeños, respectivamente. Es un parámetro adimensional que denota la forma redondeada o alargada de la cuenca.

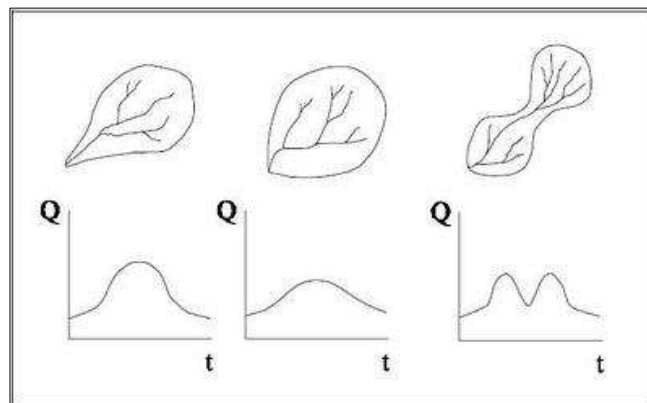


Figura 2. 5: Diferentes Hidrogramas para cada tipo de cuencas, (ABEL MUÑIZ 2012)

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (2.1)$$

A= Área de la cuenca

L= Longitud de máximo recorrido

T= tiempo

Los valores interpretativos de la relación de forma de Horton pueden verse en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4: Valores Interpretativos Del Factor Forma (PROF. DELGADILLO 2011).

VALORES APROXIMADOS	FORMA DE LA CUENCA
>0.22	Muy Alargada
0.220 - 0.300	Alargada.
0.300 - 0.370	Ligeramente Alargada
0.370 - 0.450	Ligeramente Ensanchada
0.600 - 0.800	Ensanchada
0.800 - 1.200	Muy Ensanchada
> 1.200	Redondeado el Desagüe

2.3.5. PARÁMETROS DE RELIEVE

La influencia del relieve sobre el hidrograma es aún más evidente. A una mayor pendiente corresponderá una menor duración de concentración de las aguas de escorrentía en la red de drenaje y afluentes al curso principal, los parámetros más utilizados son:

2.3.5.1. ALTITUD MEDIA (H)

Es el parámetro ponderado de las altitudes de la cuenca obtenidas en la carta o mapa topográfico. En cuencas de altas montañas o muy accidentadas este parámetro está relacionado con la magnitud de la lámina de precipitación, variación lineal muy importante en estudios regionales donde la información local es escasa. Se calcula como el coeficiente entre el volumen de la cuenca (que es la superficie comprendida entre la curva hipsométrica y los ejes coordenados) y su superficie, es decir:

$$H = \frac{V}{A} \quad (2.2)$$

Donde:

H, altitud media en Km.

V, es el volumen de la cuenca (producto de áreas parciales entre curvas de nivel por cada valor de la misma) en Km³

A, área de la Cuenca en Km².

La altura media es mayor cuando más se eleva el relieve por encima de la altitud mínima y tanto menor cuanto menores variaciones de altitud presente el relieve.

2.3.5.2. PENDIENTE MEDIA (SM)

También conocido como pendiente de laderas, es el promedio de las pendientes de la cuenca, es un parámetro muy importante que determina el tiempo de concentración y su influencia en las máximas crecidas y en el potencial de degradación de la cuenca, sobre todo en terrenos desprotegidos de cobertura vegetal. Existen variadas metodologías, tanto gráficas como analíticas, que permiten estimar la pendiente de la cuenca. Dentro de las metodologías gráficas, la más recomendada por su grado de aproximación es el Método de HORTON y dentro de las analíticas la que se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Sm = 100 \frac{LxE}{A} \quad (2.3)$$

Donde:

Sm es la pendiente media en %

Li es la suma de longitudes de las curvas de nivel en Km

E es la equidistancia entre curvas de nivel en Km

A es la superficie de la cuenca en Km²

2.3.5.3. LA CURVA HIPSOMÉTRICA (CH)

Es la representación gráfica del relieve de la cuenca, se logra por medio de las cotas del terreno en función de las superficies correspondientes. Para su representación se utiliza un gráfico similar a un perfil topográfico (en las ordenadas las alturas y en las abscisas las superficies). La curva hipsométrica permite caracterizar el relieve, una pendiente fuerte en el origen hacia cotas inferiores indica llanuras o zonas planas, si la pendiente es muy fuerte hay peligro de inundaciones. Una pendiente muy débil en el origen revela un valle encajonado, y una pendiente fuerte hacia la parte media significa una meseta.

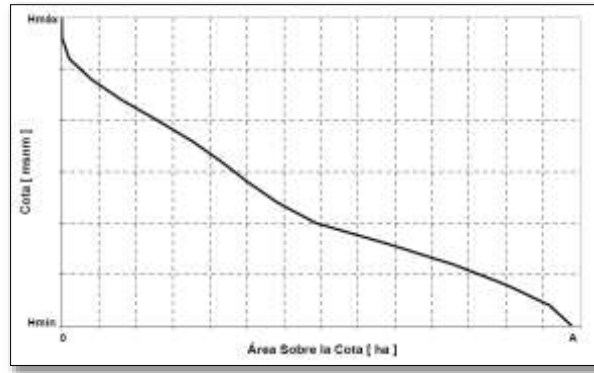


Figura 2. 6: Curva Hipsométrica de una Cuenca (Ing. VILLODAS 2008)

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

$$Rh = \frac{As}{Abi} \quad (2.4)$$

Dónde:

As: área sobre la curva hipsométrica.

Ab: área bajo la curva hipsométrica.

Según Strahler, la importancia de esta relación hipsométrica reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. Así, cuando $Rh=1$, se trata de una cuenca en equilibrio morfológico.

La Figura 2.7 muestra tres curvas hipsométricas correspondientes a tres cuencas hipotéticas, que tienen potenciales evolutivos distintos. La curva superior (A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (C) es típica de una cuenca sedimentaria. Quedando así, representan distintas fases de la vida de los ríos:

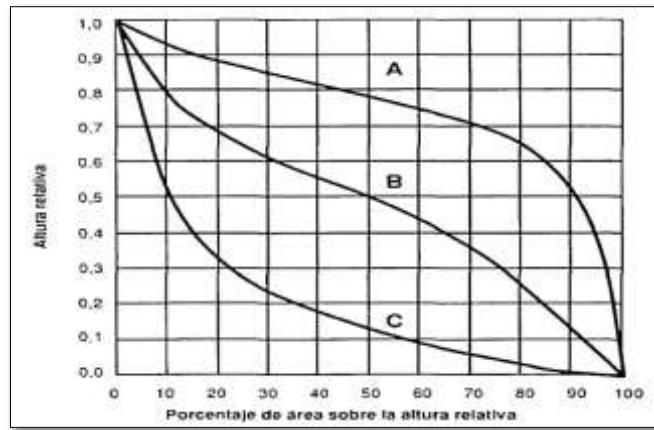


Figura 2. 7: Curvas Hipsométricas Características del Ciclo de Erosión de una Cuenca.

- **Curva A:** Cuenca en fase juventud (Cuenca Erosiva)
- **Curva B:** Cuenca en fase madurez (Cuenca Equilibrio)
- **Curva C:** Cuenca en fase de vejez (Cuenca Sedimentaria)

La topografía o relieve de una cuenca puede tener más influencia sobre su respuesta hidrológica que la forma de la misma. Con propósitos de comparación entre cuencas, es conveniente utilizar el porcentaje del área total en lugar de su magnitud y la altura relativa, como se ilustra en la Figura 2.7.

2.3.6. PARÁMETROS RELATIVOS A LA RED HIDROGRÁFICA

Coeficiente de Fournier o coeficiente de masividad

Se representa por la, $T = \frac{H}{A}$

H=altura media de la cuenca en km.

A= superficie de la cuenca en km²

Es un coeficiente relacionado con la erosión en la cuenca, permite diferenciar netamente cuencas de igual altura media y relieve diferentes, aun cuando no es suficiente para caracterizar la proclividad a la erosión en una cuenca, ya que da valores iguales en el caso de cuencas diferenciadas, como es el caso en el que la altura media y superficie aumenten proporcionalmente.

2.3.6.1. DENSIDAD DE DRENAJE (D)

Está definida por la longitud de todos los cauces divididos entre el área total de la cuenca. Sin tomar en consideración otros aspectos de la cuenca, cuando mayor sea la densidad de drenaje más rápida es la

respuesta de la cuenca frente a una tormenta, drenando el agua en menor tiempo.

$$D = \frac{\Sigma Lc}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

ΣLc =sumatoria de los parciales

A = área de la cuenca

2.3.6.2. PENDIENTE MEDIA DE UN CAUCE (PC)

Representa la inclinación promedio de un cauce parcial o del cauce principal de la cuenca.

$$PC = \frac{Hmax-Hmin}{L} \quad (2.6)$$

Donde:

H max. : Cota máxima del cauce

H min. : Cota minima del cauce

L : Longitud del cauce

2.3.7. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T C)

Este parámetro, llamado también tiempo de equilibrio, es el tiempo que toma la partícula, hidráulicamente más lejana, en viajar hasta en punto emisor. Para ello se supone que el tiempo de duración de la lluvia es de por lo menos igual al tiempo de concentración y que se distribuye uniformemente en toda la cuenca. Este parámetro tiene estrecha relación con el volumen máximo y con el tiempo de recesión de la cuenca, tiempos de concentración muy cortos tienen volúmenes máximos intensos y recesiones muy rápidas, en cambio los tiempos de concentración más largos determinan volumen máximo más atenuado y recesiones mucho más sostenidas. Existen muchas fórmulas empíricas para estimar el tiempo de concentración de la cuenca, siendo una de las más completas la siguiente:

$$Tc = \left(0.3 \frac{L}{(PC)^{\frac{1}{4}}} \right) \quad (2.7)$$

Donde:

Tc: tiempo de concentración en horas

L: cauce principal en km.

Pc: pendiente medie del cauce principal de la cuenca.

2.4. TRANSFORMACIÓN DE LLUVIA EN ESCURRIMIENTO.

Para realizar los trabajos de modelación del flujo en una cuenca uno de los datos más relevantes que se necesita conocer es el caudal que discurre por la misma. Dicho caudal depende directamente de los fenómenos de precipitación que se dan en la cuenca. Generalmente es más sencillo disponer de registros de precipitación para una zona, que de aforos de caudales para cada una de las cuencas de la misma. Es relativamente fácil tener datos de precipitación de una zona debido a que la red pluviométrica es relativamente amplia en la mayoría de las regiones del mundo, por lo que se cuenta con más datos y más fiables de precipitaciones que de caudales. Por ello se utilizan modelos de transformación de lluvia-escorrentía que permiten estimar el caudal generado a partir de los datos de precipitación.

Para calcular esta transformación existen modelos hidrológicos que aproximan el hidrograma de una cuenca a partir de la precipitación en la zona y los datos físicos de la cuenca: geometría (pendiente), tipo de suelo (infiltración), usos del suelo (coeficiente de fricción de fondo, retención superficial...). Para ello se necesita definir la precipitación de la zona y esto engloba dos aspectos: la altura total de la precipitación (mm) y la forma en la que esta se distribuye a lo largo del tiempo. Estos dos aspectos quedan definidos mediante un hietograma.

En la definición del hietograma de tormenta se debe emplear la información proporcionada por las *curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)*. Se trata de una familia de curvas Intensidad-Duración (Figura 2.8) para diferentes periodos de retorno (frecuencias). Expresan la máxima intensidad de precipitación promediada para distintos intervalos de tiempo. Si se dispone de datos de un aguacero real para un periodo de retorno determinado, para determinar la curva Intensidad-Duración se buscará en los datos pluviográficos los 5 minutos de máxima precipitación, los 10 minutos, etc. y se representan gráficamente.

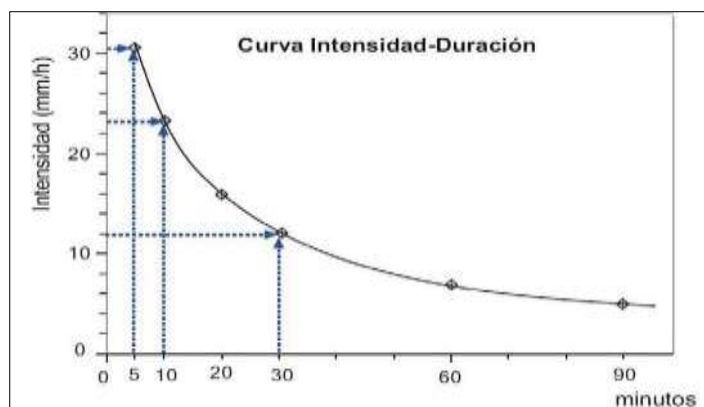


Figura 2. 8: Curva Intensidad-Duración.

2.4.1. PARÁMETROS DEL PROCESO DE CONVERSIÓN DE LLUVIA A ESCURRIMIENTO.

Los parámetros que intervienen en este proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son necesarios:

- ✓ Las ordenadas del hidrograma son gastos instantáneos (m^3/s , l/s , y pie^3/s) y las abscisas corresponden al tiempo (minutos, horas, días, meses o años)
- ✓ El área bajo la curva del hidrograma (es decir su integral) representa un volumen cuando la ordenada se expresa en términos de gasto, como por ejemplo m^3 .
- ✓ Los factores que influyen en la forma del hidrograma son:
 - Magnitud de precipitación
 - duración de la tormenta
 - área de la cuenca, capacidad de almacenaje de la cuenca (topografía, cobertura vegetal, tipo de suelo, entre otros)

2.4.2. RELACIÓN PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO.

Las relaciones lluvia - escurrimiento se utilizan principalmente para el diseño, los pronósticos y la evaluación. Si los datos de escurrimientos no están disponibles o son insuficientes para una interpretación o extrapolación fiables, las relaciones lluvia - escurrimiento pueden ser muy útiles porque permiten extraer la información de escurrimiento a partir de los registros de precipitación. Como los datos de lluvia son relativamente fáciles y poco costosos de recoger, son generalmente más abundantes que los datos de escurrimiento.

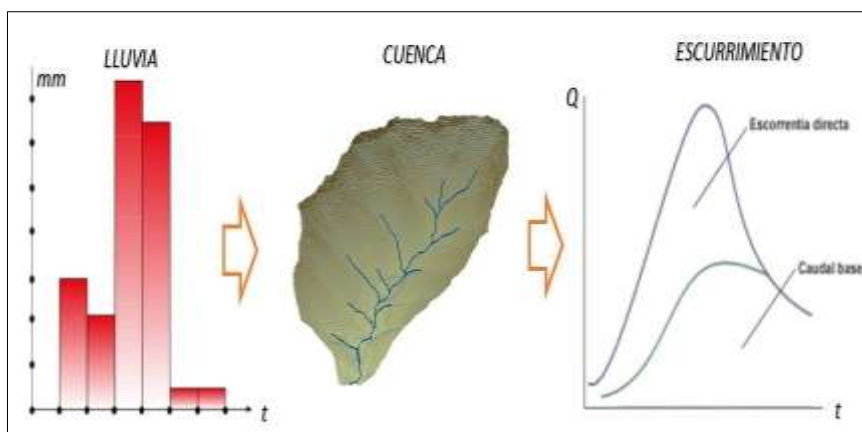


figura 2.9: Relación Lluvia-escurrimiento (AGUSTIN 2009).

2.4.3. MODELOS DE PRECIPITACIÓN – ESCURRIMIENTO

Si se puede establecer una relación estrecha entre lluvia y escurrimiento para una cuenca determinada, la relación lluvia-escurrimiento, aplicada a los datos de lluvia, puede dar estimaciones más fiables de la frecuencia de grandes caudales que los que puede dar una relación regional entre las crecidas o una extrapolación basada en los datos de escurrimientos de la cuenca.

Las relaciones lluvia-escurrimiento usualmente se establecen en dos etapas: la determinación de volumen de escurrimiento que resulta de un volumen de lluvia producido durante un período de tiempo dado, y la distribución del volumen de escurrimiento en función del tiempo. La primera etapa es necesaria debido a la división de la lluvia en evapotranspiración, infiltración y escurrimiento.

La segunda se requiere para tomar en cuenta el tiempo de recorrido y la atenuación de la onda de escurrimiento que se genera por la lluvia.

Los modelos de precipitación-escurrimiento se pueden clasificar, en métodos empíricos, métodos estadísticos y métodos de hidrograma unitario. La mayoría de los criterios con excepción de los hidrogramas unitarios sintéticos, requieren de registros históricos tanto de alturas de precipitación como de aforos de corrientes, pero en la mayoría de las cuencas de Perú no se tiene esta información con lo cual recurrimos a datos sintéticos para la elaboración de los hidrogramas.

2.5. MÉTODOS EMPÍRICOS

Ante la carencia de información hidrométrica, se han desarrollado varios métodos que permiten en función de la precipitación obtener los caudales que pueden presentarse en el río en estudio.

- ✓ Método racional.
- ✓ Método racional modificado.
- ✓ Método del número de curva (CN).

2.5.1. MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA (CN)

El Soil Conservation Service (1972) desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta. Para la tormenta como un todo, la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación la (abstracción inicial antes del encharcamiento) para lo cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$.

2.5.2. FORMULACION DEL MÉTODO CN.

La metodología del Número de Curva considera como variables en su determinación:

- La precipitación, representada en este caso por la precipitación para un período de tiempo previamente seleccionado.
- El complejo de suelo - hidrológico que considera la interrelación suelo - cobertura vegetal.
- La condición de humedad antecedente; de acuerdo con estas variables se fija un número de curva (CN) que representa tal interrelación.

La hipótesis del método del SCS consiste en que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Combinando las ecuaciones anteriores y resolviendo para P_e se encuentra:

$$Pe = \frac{(P - la)^2}{P - la + S}$$

La cual es la ecuación básica para el cálculo de la profundidad de exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta utilizando el método SCS (Ver Figura N° 2.10).

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica.

$$la = 0.2S$$

Con base en esto:

$$Pe = \frac{(P - 0.25)^2}{P + 0.8S}$$

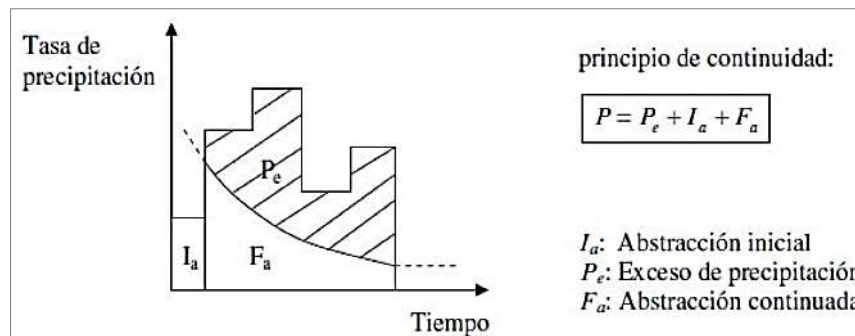


figura 2. 11: Variables en el método de abstracciones del SCS (VILLON 2008).

Todos los suelos son clasificados en 4 grupos de suelos hidrológicos de distintas Propiedades (ver Tabla 2.5).

Para el cálculo de CN debemos conocer la descripción del uso del suelo; cada uso de suelo representa un valor de CN (ver tabla 2.5). Finalmente, por ponderación se llega a un valor único de CN.

Tabla 2. 5: Grupos de suelos hidrológicos (VEN TE CHOW 1994).

GRUPO DE SUELOS	DESCRIPCION
A Infiltración 7.62-11.43 m/hr	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.

B Infiltración 3.81-7.62 m/hr	Suelos con moderadas tasas de infiltración. Suelos poco profundos, moderadamente drenados, con texturas moderadamente finas a gruesas. Esto suelos tienen una moderada tasa de transmisión de agua.
C Infiltración 1.27 – 3.81 m/hr	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.
D Infiltración 0 – 1.27 m/hr	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 2. 6: Números de curva de escorrentía para usos de suelos (VEN TE CHOW 1994).

DESCRIPCION DEL USO DE LA TIERRA	A	B	C	D
Tierra cultivada: sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	89	89
condiciones óptimas	39	61	74	90
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, cementerios, etc. óptimas	39	61	74	80
condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	49	69	79	84
condiciones aceptable: cubierta de pasto en el 50 al 75%.				
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Zonas residenciales				
Tamaño medio del lote				
impermeable				
	% Promedio			
500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1350	30	57	72	81
2000	25	54	70	80
4000	20	51	68	79
				84

Parqueos pavimentados, techos, accesos, superficies impermeables en general.	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

Los números de curva han sido tabulados por el Soil Conservation Service con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo A: Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B: Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C: Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.

Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Metodología exige la determinación del valor respectivo del CN (número adimensional de curva o curva número), correspondiente al área específica en estudio, valor que debe ser obtenido mediante procesos de calibración. La calibración del parámetro CN se realiza con información de campo, de algunos eventos en el que se disponga de datos de precipitación y caudales resultantes; luego se corre el modelo hasta ajustar el hidrograma calculado con el observado en el campo. Es un proceso de prueba error en donde se ajusta el parámetro (CN) hasta obtener coincidencias entre ambos hidrogramas.

Como alternativa, y como valor referencial, el parámetro CN puede estimarse mediante el siguiente procedimiento: Se define un número adimensional de curva CN, tal que $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN = 100$; para superficies naturales $CN < 100$. El número de curva y S se relacionan por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde S está en pulgadas.

Los números de curvas se aplican para condiciones para condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II). Para condiciones secas (AMC I) o

condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabla 2. 7: clasificación de clases antecedentes de humedad (amc) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

GRUPO ANC	LLUVIA ANTECEDENTE TOTAL DE 5 DIAS (PULG)	
	ESTACION INACTIVA	ESTACION ACTIVA
I	Menor que 0.5	Estacion que 1,4
II	0,5 a 1,1	1,4 a 2,1
III	sobre 1,1	sobre 2,1

Fuente: soil conservation service.

1. Una buena cubierta está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.
2. Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los sucesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.
3. Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva.
4. En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva. (Fuente: Hidrología Aplicada (Ven te Chow))

2.5.3. MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los métodos estadísticos, se basan en considerar que el caudal máximo anual, es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución. Se requiere tener el registro de caudales máximos anuales, cuanto mayor sea el tamaño del registro, mayor será también la aproximación del cálculo del caudal de diseño, el cual se calcula para un determinado periodo de retorno (T).

2.5.3.1. HIDROGRAMAS.

El hidrograma representa la variación de las descargas de una corriente con

respecto al tiempo, en una sección determinada del curso de agua.

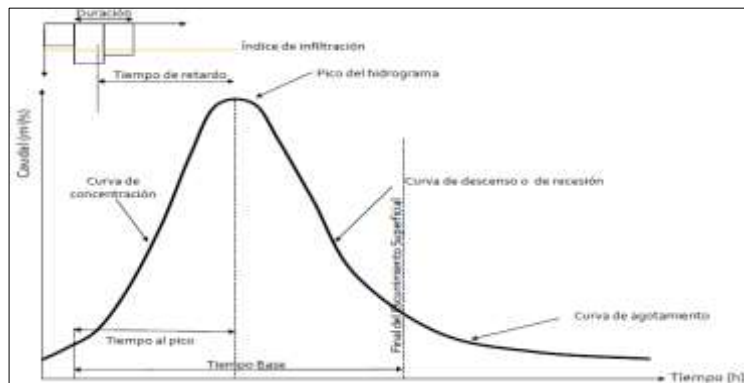


figura 2. 12: hidrograma en función del caudal y tiempo (Ovalles, Yajaira. 2008.).

Analizando el hidrograma correspondiente a una tormenta aislada (Figura 2.12) se observa en el histograma de la Figura 2.11 la precipitación que produce infiltración, y la que produce escorrentía directa, ésta última se denomina precipitación neta o efectiva. El área bajo el hidrograma es el volumen de agua que ha pasado por el punto de aforo, en el intervalo de tiempo expresado en el hidrograma. Del análisis de la Figura 2.12, es posible distinguir las siguientes partes:

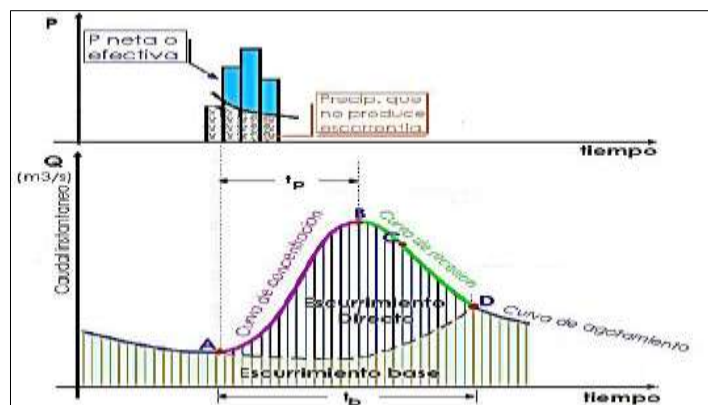


figura 2. 13: Partes o componentes del hidrograma (VILLON, Hidrología 2002).

Pico del Hidrograma (q_p). En este punto se expresa el valor máximo de la escorrentía.

Tiempo al pico (t_p). Tiempo entre el inicio de la escorrentía y la escorrentía de pico del hidrograma.

Tiempo de recesión (t_r). Tiempo desde el inicio de la recesión hasta el final de

la misma.

Tiempo base (t_b). Tiempo transcurrido desde el inicio de la crecida hasta el final de la escorrentía directa, por lo tanto, es el tiempo total del hidrograma de escorrentía.

Volumen de la escorrentía (Q), es el área debajo del hidrograma y se expresa en m^3 o litros.

Precipitación efectiva (p_e), es la porción de la precipitación que se transforma en escurrimiento esta comienza después que la tasa de infiltración sea menor que la intensidad de lluvia y termina cuando la intensidad de la lluvia se hace menor que la tasa de infiltración.

Duración de la precipitación efectiva (D), tiempo transcurrido entre el inicio y el final de la lluvia efectiva.

Abstracciones o pérdidas iniciales (La), porción de la precipitación que ocurre antes del inicio de la escorrentia.

Tiempo de retardo o respuesta (t_r), es el tiempo entre la mitad de la duración de la lluvia efectiva y el tiempo pico.

Puntos de inflexión, ocurren en la recesión y coinciden con los cambios de dirección de la curva de recesión. El primer punto de recesión indica el fin del escurrimiento y el segundo el fin de la escorrentia directa.

Tiempo de concentración (t_c), tiempo entre el final de la lluvia efectiva y el primer de inflexión.

2.6. HIDRÁULICA FLUVIAL

La hidráulica fluvial estudia el comportamiento de los ríos, cualquiera que sea la finalidad del proyecto (represamiento defensas ribereñas, navegación, puentes, etc) la ingeniería fluvial nos enseña como intervenir en el rio, como trabajar “con el río” para lograr los fines de un determinado proyecto.

Los ríos están cambiando constantemente de posición y forma y adquieren por un mecanismo que ha sido llamado el “autoajuste” el ancho, el tirante y la pendiente correspondiente al gasto líquido, al gasto sólido y a la composición granulométrica de los sólidos que arrastran. No pocas veces esto implica cambio de recorrido.

2.6.1. PARÁMETROS HIDRÁULICAS Y GEOMÉTRICAS.

Comúnmente se refiere a la sección transversal del cauce y sus estudios se

basan en las relaciones existentes entre los caudales y los niveles, pendientes de agua y los diferentes parámetros hidráulicos y geométricos, tales como es el área hidráulica, el ancho, la pendiente, la rugosidad y la velocidad del agua.

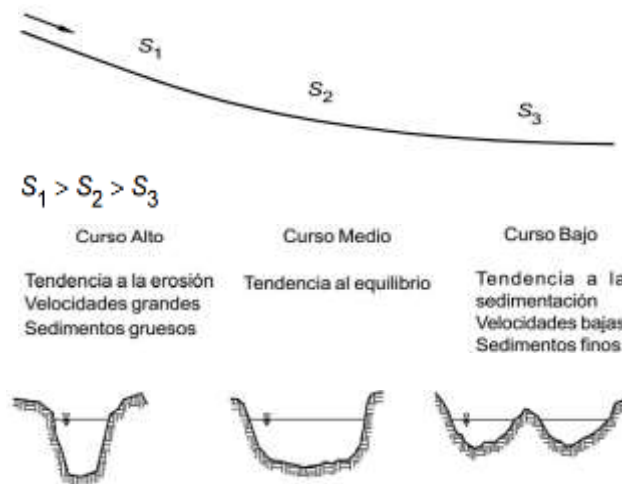


figura 2. 14: Esquematización del perfil longitudinal y secciones transversales Típicas de un río, a lo largo de su recorrido (Dr. ROCHA 1998).

El régimen de flujo en un tramo particular de una corriente natural se clasifica en función del Número de Froude, NF, el cual es una relación adimensional entre fuerzas de inercia y de gravedad.

- ✓ En el régimen supercrítico ($NF > 1$) el flujo es de alta velocidad, propio de cauces de gran pendiente o ríos de montaña.
- ✓ El flujo sub crítico ($NF < 1$) corresponde a un régimen de llanura con baja velocidad.
- ✓ El flujo crítico ($NF = 1$) es un estado teórico en corrientes naturales y representa el punto de transición entre los regímenes sub crítico y supercrítico.

2.6.2. CORRIENTES NATURALES.

Estos fenómenos presentan diferentes tipos de movimiento inicial (caídos, deslizamientos traslacionales, etc.). Seguidos de un movimiento de flujo de fragmentos de roca o residuos con una movilidad anormal (Hungro 1995).

Los flujos constituyen uno de los desastres naturales que más vidas han cobrado y la mayoría de los más grandes deslizamientos catastróficos ocurridos

en el mundo, corresponden a avalanchas (R.L. Schuster 1996).

2.6.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS FLUJOS.

Los flujos realizan movimientos referentes a las partículas o como también existen bloques pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre un cauce o canal. La ocurrencia de flujos generalmente está relacionada con la saturación de los materiales sub superficiales. Algunos suelos absorben agua muy fácilmente y la saturación conduce a la formación de un flujo. Aunque generalmente, si los flujos son saturados, la saturación no es pre - requisito para su ocurrencia y en ocasiones, se presentan flujos de materiales secos (SUAREZ 2004).

Los flujos generalmente se relacionan con lluvias torrenciales ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y aunque la ausencia de vegetación es un factor influyente, no es un pre- requisito para que ocurran. Generalmente, los flujos se originan en otros tipos de deslizamiento, los cuales, al desintegrarse la masa deslizada, forman el flujo a lo largo de un canal. Algunos flujos pueden resultar, además, de la alteración de suelos muy sensitivos, tales como sedimentos no consolidados. Por lo general, al disminuirse la pendiente o al ampliarse el ancho del canal, los sedimentos del flujo se depositan formando abanicos (Figura 2.14).

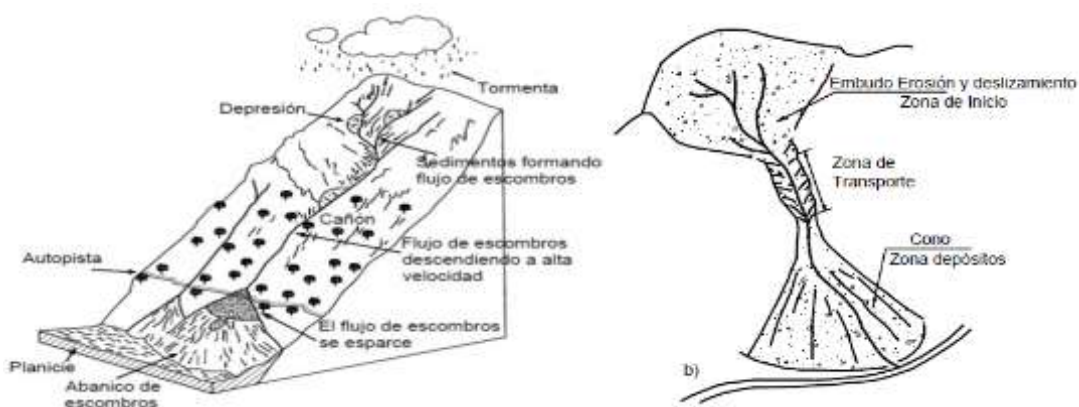


figura 2.15: Formación de un flujo y partes de residuos en una ladera de alta pendiente (SUAREZ 2004).

2.6.4. VELOCIDAD DE LOS FLUJOS.

Estos flujos pueden ser lentos como también muy rápidos, así como secos o húmedos y pueden ser de roca, de residuos y de suelo o tierra. En los flujos

rápidos el material desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo” (Figura 2.15). Los flujos pueden alcanzar velocidades de más de 20 metros por segundo (70 Km/hora), en algunos casos.

Los flujos que son muy rápidos son generados a partir de un gran aporte de materiales de uno o varios deslizamientos o flujos combinados, que involucran masas considerables de suelo o roca, generalmente con un volumen importante de agua de saturación. Estos forman una masa de comportamiento hidráulico complejo que pueden lograr velocidades muy altas con un gran poder destructivo; corresponden generalmente, a fenómenos que afectan áreas relativamente grandes dentro de una cuenca de drenaje.

Los flujos que son muy lentos o extremadamente lentos pueden asimilarse, en ocasiones, a los fenómenos de reptación y la diferencia consiste en que existe una superficie fácilmente identificable de separación entre el material que se mueve y el subyacente; mientras que, en la reptación, la velocidad del movimiento disminuye al profundizarse el perfil, sin que exista una superficie definida de rotura.

2.6.5. TIPOS DE FLUIDOS

De acuerdo con las características de un fluido es un líquido que se deforma continuamente por esfuerzos cortantes, es decir, que ofrece pequeña, o nula resistencia a las fuerzas tangenciales, o cortantes, que se le aplican.

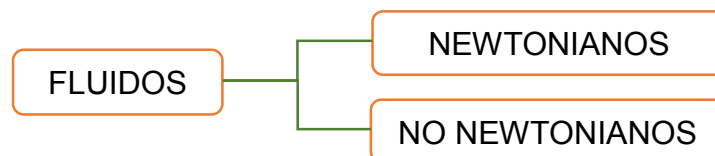


figura 2. 16: clasificación general de los fluidos

Un fluido es un líquido que se deforma continuamente por esfuerzos cortantes, es decir ofrece pequeña, o nula resistencia a las fuerzas tangenciales, o cortantes, que se le aplican.

En términos muy generales, a los fluidos que presentan una resistencia muy pequeña, o nula, a ser deformados se les conoce como **fluidos Newtonianos**, en tanto, a los fluidos que presentan mayor resistencia se les llama **fluidos no Newtonianos**.

Para un **fluido Newtoniano**, la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal, como lo indica el caso (a) de la Figura 2.16. Este tipo de fluido es el que se obtiene para todos los líquidos puros (por ejemplo “agua limpia”), cuyo comportamiento es Newtoniano con una muy buena aproximación. En la hidráulica fluvial o en la ingeniería de ríos se considera este fluido como “agua limpia” y se trabaja con los conceptos de fluidos newtonianos; donde la relación entre esfuerzo cortante tasa de deformación (gradiente de velocidades) es lineal.

Cuando el transporte de sólidos es tan grande y la densidad de la mezcla se eleva por encima de la densidad del agua, las nociones de hidráulica fluvial se desvanecen y se introducen los conceptos de fluidos no – newtonianos. Desde un punto de vista hidráulico, esta rama se conoce como “Hidráulica Torrencial”. Los fluidos no-Newtonianos comprenden en general mezclas como barros, aceites lubricantes muy viscosos, fluidos orgánicos como la sangre, etc. Y se subdividen en 3 tipos: fluidos dilatantes, pseudoplásticos y tipo Bingham.

A continuación, mostramos una breve descripción sobre cada tipo de fluido.



figura 2.17: Típica relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) para fluidos no - Newtonianos (Castillo 2006).

a. Fluido newtoniano

Este fluido muestra la relación lineal del esfuerzo cortante (t) y la deformación al corte gradiente de velocidad ($\hat{\gamma}$). La pendiente de la línea recta es la viscosidad μ .

$$t = \mu \hat{\gamma} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.1)$$

Donde t es el esfuerzo cortante, y du/dy es la tasa de deformación al corte o gradiente de velocidad.

Dentro de este campo podemos citar los conceptos de flujo laminar y turbulento. Cuando entre dos partículas en movimiento existe gradiente o velocidad, o sea que una se mueve más rápido que la otra, se desarrollan fuerzas de fricción que actúan tangencialmente a las mismas. Las fuerzas de fricción tratan de introducir rotación entre las partículas en movimiento, pero simultáneamente la viscosidad trata de impedir la rotación. Dependiendo del valor relativo de estas fuerzas se pueden producir diferentes estados de flujo.

Cuando el gradiente de velocidad es bajo, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan, pero no rotan, o lo hacen, pero con muy poca energía, el resultado final es un movimiento en el cual las partículas siguen trayectorias definidas, y todas las partículas que pasan por un punto en el campo del flujo siguen la misma trayectoria. Este tipo de flujo fue identificado por Reynolds y se denomina "laminar", queriendo significar con ello que las partículas se desplazan en forma de capas o laminas.

Al aumentar el gradiente de velocidad se incrementa la fricción entre partículas vecinas al fluido, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, la viscosidad pierde su efecto, y debido a la rotación, las partículas cambian de trayectoria. Al pasar de una trayectoria a otra, las partículas chocan entre si y cambian de rumbo en forma errática. Este tipo de fluido se le denomina turbulento.

Cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es lamina. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento.

Para números de Reynolds bajos el flujo es laminar, y para valores altos el flujo es turbulento.

b. Fluido pseudoplastico y dilatante

En el caso de los fluidos pseudoplasticos hay menor resistencia al flujo para esfuerzos mayores, es decir, el fluido escurre más fácilmente cuanto mayor es el esfuerzo (Ejm: la sangre, barro, etc)

En el caso de los fluidos dilatantes hay mayor resistencia al flujo para esfuerzos mayores, los fluidos dilatantes no son tan abundantes como los pseudoplasticos (Ejm: arena movidiza, etc.)

El fluido psuedoplastico es también característico por una pendiente progresivamente decreciente del esfuerzo cortante versus la tasa del esfuerzo al

corte. Los fluidos dilatantes presentan la característica opuesta, la pendiente crece con el incremento de la tasa de esfuerzo al corte. Esta pendiente ha estado definida en ambos casos con viscosidad aparente, n .

$$n = \frac{t}{y} \quad (2.2)$$

Hay un número de relaciones empíricas que se han usado para describir los fluidos pseudoplásticos y dilatantes. Una de las formas más usadas de la relación no newtoniana es la ley de potencia, el cual es descrito como siguiente:

$$t = my^n \quad (2.3)$$

Donde:

$N < 1$ para fluido pseudoplástico

$N > 1$ para fluido dilatante

$N = 1$ para fluido newtoniano

Sustituyendo en la ecuación (2.3) en (2.2), se obtiene la relación entre la viscosidad aparente y la gradiente de velocidades:

$$t = my^{n-1} \quad (2.4)$$

M , n son las constantes del modelo de la ley de potencia. La constante m , es una medida de la consistencia del fluido y, la constante n es una medida de como el fluido se desvía de un fluido newtoniano.

Una de las limitaciones del modelo es que falla para describir la viscosidad de muchos fluidos no newtonianos en regiones de muy baja o muy alta tasa de deformación (gradiente de velocidad).

En la actualidad, este modelo ha sido complementado por el modelo de herchell – bulkley donde incluye un límite de fluencia (t_y), como se muestra en la ecuación siguiente:

$$t = my^n + t_y, \text{ para } t > t_y \quad (2.5)$$

$Y=0$, para $t < t_y$

M , n son constantes del modelo.

c. Fluido plástico de Bingham

Otra clase importante de fluido no newtoniano es el fluido viscoplastico. Este es un fluido que no fluye cuando un esfuerzo de cortante muy pequeño es aplicado. Los esfuerzos de corte deben exceder un valor crítico conocido como esfuerzo

de cedencia o límite de fluencia para que el fluido fluya. Por ejemplo, cuando abrimos una pasta dental fluya. Sin embrago, los fluidos viscoplasticos se comportan con solidos cuando el esfuerzo de corte aplicado es menor que el esfuerzo de corte límite.

Uno de los modelos viscoplasticos simples es el modelo plástico de brighman, como se muestra en la curva D, de la figura 2.16.

los fluidos plásticos de Brigham requieren que el esfuerzo al corte exceda alguna cantidad mínima (t_y) antes de observar ua tasa de esfuerzo al corta (au/ay), seguida por una relación en línea recta entre el esfuerzo de corte y la gradiente de velocidades.

$$t = t_y + u_y y \quad (2.6)$$

Donde:

t_y : es el esfuerzo de cedencia (yiel stress)

u_y : es la viscosidad plástica.

2.6.6. COMPOSICIÓN DE LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS

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

Entre los principales componentes se puede mencionar: El agua, la matriz fina partículas de arcilla) y los granos gruesos. A continuación, mostramos una breve descripción sobre cada uno de ellos.

Agua. - El agua como componente, es el principal agente de transporte para los flujos de escombros debido a su propiedad de contener a las partículas gruesas y finas, así como envolver a todo el material que se presente en su camino. La densidad del agua (ρ) es muy cercana a 1000 Kg/m³.

Partículas de Arcilla.- Las partículas de arcilla se originan de la desintegración física o mecánica de las rocas seguida por una transformación química. Existen varios tipos de arcilla como: caolinitas,

illitas, montomorillonitas, etc., asociadas con diferentes combinaciones. La densidad de las partículas de arcilla es aproximadamente a 2650 Kg/m³. La consistencia de la arcilla seca es alta y cuando se encuentra húmeda es baja. La plasticidad del suelo depende del contenido de arcilla; a mayor cantidad de arcilla, mayor será la plasticidad. Por lo tanto, la presencia de gran cantidad de arcilla define a un tipo de flujo de lodo.

Granos.- El grupo de granos incluye varios tipos de partículas consistiendo de mineral inerte y fragmentos de rocas el cual se diferencia apenas por sus tamaños. Se usa la siguiente clasificación simple: por debajo de los 2 μm , arcilla; de 2 μm a 20 μm , limo; de 20 μm a 200 μm , arena fina; de 0.2mm a 2 mm, arena gruesa; de 2mm a 20mm, gravas; de 2cm a 20cm, guijarros; y por encima de 200 mm, cantos rodados (ver Figura 2.17). Estos granos son formados por la desintegración física o mecánica de las rocas pero conservan la estructura de sus rocas madres. Sus densidades generalmente varían entre los 2650 Kg/m³ y 2750 Kg/m³.



figura 2.18: Incremento del Diámetro (Plafker y Ericksen, 1978).

Estos dependen mucho de las cantidades de escombros, el flujo podría ser un flujo de lodo con predominante material fino o podría presentarse como fragmentos de rocas dispersos en una matriz de agua y finos. Por ejemplo, en las avalanchas del Nevado de Huascarán (Perú) los flujos de escombros contenían un 10-15% de bloques de piedra.

2.6.6.1. CLASIFICACION PARA LOS FLUJOS DE LODO Y ESCOMBROS.

Los huaicos no pueden ser tratados normalmente dentro del campo de la hidráulica fluvial. Sus características marcadas grandemente por su alta aglomeración la hacen digna de un estudio especial.

Una clasificación especial de los flujos de lodos y escombros se basa en el tipo del 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 Pierson y Costa (1987).

Los flujos de agua-sedimento pueden ser agrupados dentro de 3 banda Principales:

- Flujos de corriente ordinario (avenidas de agua)
- Flujos hiperconcentrados
- Flujos granulares
- Flujos de detritos
- Flujos de lodos

Características de los sedimentos	Concentración de sedimentos de la mezcla (Kg/m ³)	Pendiente del canal				
		> 100% (45°)	100 a 50%	50 a 20%	20 a 10%	10 a 5%
		Tipo de flujo				
Más del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	<90	Flujo hiperconcentrado	Flujo de lodo			
	>90	Flujo de lodo				
Menos del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d<ASTM#200)	<300	Flujo hiperconcentrado				
	300 a 600	Flujo turbulento de detritos (Debris flow)	Flujo hiperconcentrado			
	600 a 900	Flujo turbulento de detritos (Debris flow)				
	>900	Flujo laminar de detritos				

figura 2. 19: Tipo de flujo de acuerdo con las características de la mezcla y del canal

2.6.6.2. FLUJOS DE CORRIENTE ORDINARIO

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 concentración es menor al 5% en volumen según; (SUAREZ 2004). Suspensión es insuficiente para afectar el comportamiento del agua. Las propiedades del fluido Newtoniano gobiernan a este tipo de flujo.

2.6.6.3. FLUJOS DE LODO

Los flujos de lodo generalmente consisten en altas concentraciones de partículas finas (limos y arcillas), aunque también transportan grandes bloques o cantos de roca. De hecho, el fluido se comporta como un “slurry” homogéneo con una onda frontal y una serie de pulsaciones (Figura 2.19). De acuerdo a experimentos de Wan y Chien (1.989), un

fluido se convierte en un “slurry” homogéneo a una concentración de partículas finas de solamente 90 kg/m³. A medida que la concentración aumenta la estructura de los sedimentos se floclula rápidamente y la viscosidad aumenta en forma fuerte formándose una especie de cohesión de la mezcla suelo-agua.

2.6.6.4. FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

Del resultado de un estudio de flujos de corriente concentrados, Beverage y Culbertson (1964) definieron Hiperconcentración como la concentración mayor al 40% de sedimento por peso. Ellos sugirieron un límite superior de 80%. Diferentes nombres como inundaciones de lodo o flujos de lodo no-cohesivos (Kurdin, 1973) fueron dados a estos flujos. A menudo, especialmente en China, clasifican a los flujos de escombros (debris flows) como un tipo de flujo de lodo. O’Brien & Julien (1985) lo clasifican de la misma manera.

El flujo de lodo está formado por una mezcla de partículas gruesas y agua. En el flujo de lodo predominan las partículas granulares (arenas, gravas, cantos y bloques) por lo tanto la mezcla no tiene cohesión.

Se considera un flujo como el flujo de lodos si la concentración en volumen de sólidos en el flujo es mayor de 0.2 (20%) pero no supera 0.6 (60%), valor este que corresponde a un peso específico de 2.0 ton/m³ aproximadamente.

2.6.6.5. FLUJOS DE DETRITOS (DEBRIS FLOWS)

En los flujos de detritos los sedimentos controlan totalmente el flujo y el componente agua es menos importante. El movimiento de los flujos de detritos se le puede relacionar generalmente con “flujo turbulento de granos”. Este mecanismo no requiere de la presencia de una fase líquida o gaseosa y el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven.

Su comportamiento se aleja del modelo hidráulico típico. 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 fase propiamente sólida son las partículas gruesas. Las partículas gruesas ruedan y saltan con velocidades mucho menores que las del slurry y se

puede escuchar el ruido de golpeo de las partículas unas con otras, con ondas superficiales y salpicaduras, se observa claramente la turbulencia.

2.6.6.6. FLUJOS GRANULARES

Esta condición describe al flujo con altas concentraciones de sólidos. Una clasificación general de acuerdo con (SAVAGE 1984) describe 3 clases de flujos granulares:

- i. Cuasi-estático
- ii. Macroviscoso
- iii. Inercia granular.

Esta clasificación es una extensión de la clasificación antigua dada por Bagnold (1954). Bagnold 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. Davies (1986, 1988) consideró que ciertos tipos de flujos de escombros caen en esta categoría de flujos granulares.

Cuando suficientes esfuerzos son aplicados a la masa granular de manera que las cadenas friccionantes son separadas, entonces la masa empieza a fluir. Esta deformación lenta mantenida durante un período largo de tiempo define el régimen cuasi-estático.

El régimen de inercia granular es donde los esfuerzos de deformación son altos, tal que la transferencia de momentum es predominantemente, por la interacción grano a grano. Hay algunas versiones (Bagnold, 1954; Takahashi, 1981; Chen, 1985) que dice que los flujos de escombros son un flujo inercial. Las avalanchas de escombros y los deslizamientos de escombros están definidos en el régimen inercial. Muchos de los flujos inerciales grandes como las avalanchas de rocas son característicos de ésta región.

Meunier (1991) realiza 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% (véase Figura 2.19)

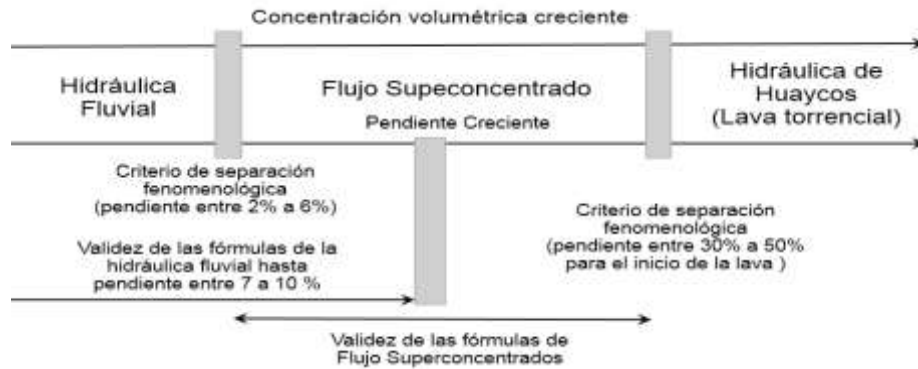


figura 2.20: Clasificación de flujos según (MEUNIER 1991)

El investigador francés Coussot (1997) clasifica los huaycos utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido (ver Figura 2.20). El flujo torrencial, flujo de lodo, así como también los deslizamientos de suelos llegan a ser contemplados dentro de esta clasificación de flujos.

2.6.6.7. PROPIEDADES DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS.

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

2.6.6.7.1. VELOCIDAD.

- La velocidad del flujo de escombros varía de 0.5 m/s a 20 m/s.
- La velocidad está relacionada con la geometría del canal, pendiente y tipo de flujo.
- Para el caso de flujos de lodo, Johnson y Rodine (1984) utilizan la sobreelevación en las curvas como parámetro para calcular la velocidad del flujo.

2.6.6.7.2. PENDIENTE

- Ocurren en pendientes pronunciadas, pero también tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves.
- Pendientes observadas de 2% a 32%
- Por medio de un análisis de estabilidad simple para un ancho y longitud unitario completamente saturado, de altura h , con pendiente $\text{sen}\theta$ y con

ángulo de fricción Φ , se obtiene el criterio de Iniciación del movimiento de flujos de escombros.

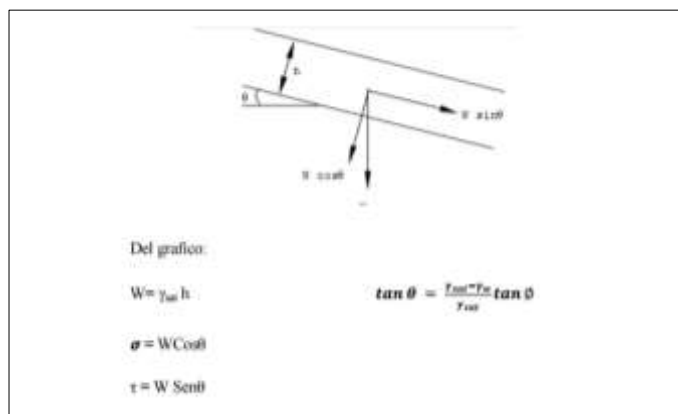


figura 2.21.: Angulo de inclinacion (Coussot 1997)

2.6.6.7.3. ÁNGULO DE DEPOSICIÓN

Al disminuir la pendiente o aumentar el ancho del canal se presenta una disminución de la velocidad o frenado de la avalancha. La energía cinética disminuye y se produce sedimentación de las partículas. La depositación de los flujos generalmente se da en pulsos (Williams, 2006), lo cual demuestra que el flujo no es permanente, sino que tiene ondas y cada onda puede transportar materiales de diferente granulometría desde materiales muy gruesos hasta materiales muy finos o mezclas de varios materiales.

El ancho y la pendiente de la zona de deposición determinan el espesor del depósito y la forma como se producen los procesos de frenado y sedimentación.

2.6.6.8. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS.

Las investigaciones de la gran mayoría de los depósitos de flujo de lodos y escombros y de flujos de escombros activos en el resto del mundo, indican que los mas comunes de flujos de escombros son ondas grandes de materiales sólidos y fluidos mezclados, que se transportan firmemente a través de un canal por medio de ondas pequeñas sobrepuestas viajando a altas velocidades.

Cada brazo (deposito) o lóbulo de un depósito de flujo de escombros comprende un frente, y dos otras partes, media y lateral (ver Figura 2.22). Los depósitos laterales están a los lados del cauce, o adyacentes al cauce, y los

depósitos mediales están dentro del mismo canal. Los depósitos laterales son formados por materiales del frente que se mueven lateralmente, y también por materiales de granos finos trasladados por las subsiguientes ondas.

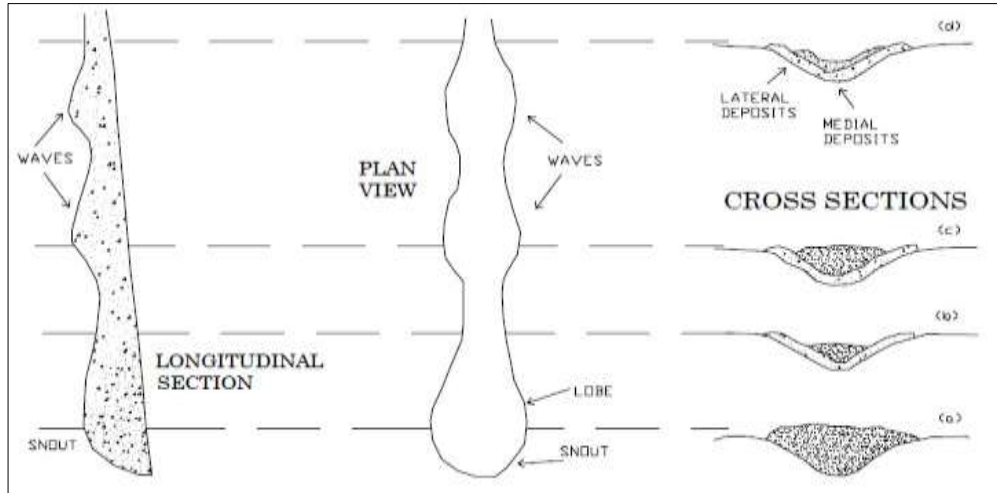


figura 2.22: Representación Idealizada de un brazo de flujos de escombros.
Fuente: (Johnson y Rodine 1984). Debris Flow In slope Instability.

La sección transversal (a) de la Figura 2.22, muestra un frente en su máxima extensión lateral, correspondiente a la amplitud máxima de la onda. El frente anterior se observa en la sección transversal (b), donde se aprecia los depósitos laterales en el caso que el flujo escombros se detenga. Aguas arriba del canal los depósitos laterales antiguos formados por el frente del huaico son ahora sobrelLENados por la sucesión de ondas futuras, como se observa en la sección transversal (c). Para el caso de la sección transversal (d), cada frente y onda sucesiva que pasa origina que la superficie del flujo de escombros se eleve y ensanche localmente, definiendo un estrato de escombros en los depósitos laterales. Los depósitos típicos de flujo de escombros contienen piedras grandes que se encuentran espacialmente distribuidos al azar dentro de una fina matriz suelta, formando un estrato del depósito de flujo de escombros. Los estratos sucesivos dentro de los lóbulos formados durante la actividad de flujo de escombros generalmente tienen los granos progresivamente más finos y arcillas. Algunos depósitos se muestran, con escombros más gruesos en la base y escombros más finos arriba, pero generalmente éste es un resultado de superposición y mezcla parcial de

dos o más estratos individuales desplazados sucesivamente. La composición litológica de las piedras en los flujos de escombros es determinada por la composición de rocas disponibles en las áreas de la fuente y de cantos rodados grandes y bloques en el canal principal por donde los escombros fluyen. En el caso que un depósito se encuentra compuesto de estratos sucesivos de la misma litología, y si estos estratos difieren uno de otro, entonces el depósito probablemente sea de origen de flujo de escombros. El perfil característico de una oleada de escombros comprende tres zonas específicas, como se muestra en la Figura 2.23.

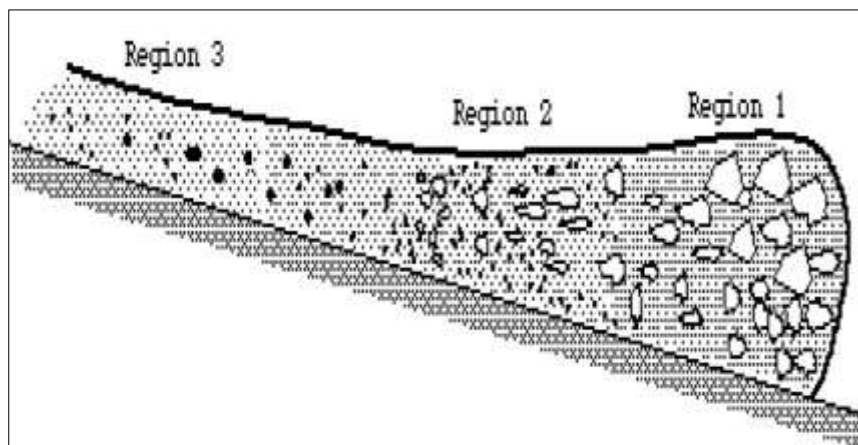


figura 2.23: Composición de una oleada de flujos de escombros (SUAREZ 2004)

La primera región es el frente que está hecho de fragmentos de rocas altamente desordenados que parecen hincharse hacia el exterior. (TAKAHASHI 1994) Sugiere que esta protuberancia es formada porque el frente es cargado con partículas grandes y tiende a bajar la velocidad y aumentar de volumen. La longitud de esta primera región varía de algunos metros a algunas decenas de metros. La altura depende de la pendiente del canal o el abanico en el que los escombros viajan. La segunda región es una región de agua enlodada, altamente turbulenta con guijarros de diversos tamaños cargados adelante. La región final es la región de agua enlodado con arena y guijarros. Con concentraciones altas de barro.

2.6.6.9. MECANISMO IMPORTANTES DE SOPORTE DE LA PARTÍCULA

La facilidad que tienen los flujos de escombros para transportar partículas gruesas de diversos tamaños y moverse a grandes distancias con pendientes

pequeñas ha intrigado a muchos investigadores. El tamaño máximo de partículas que pueden ser movidas por un “slurry” o matriz es generalmente decenas de veces mayor que aquellas para agua limpia, y entre mayor sea la viscosidad efectiva del slurry y menor la velocidad del flujo, es mayor esta relación. Las observaciones de flujos de lodo y escombros en el campo muestran sorprendentemente cantos rodados grandes flotando en una matriz fluida. (PIERSON 1981) Observó cantos rodados de hasta medio metro flotando en la superficie de flujo. BROSCOE Y THOMPSON (1969) observaron cantos rodados grandes de 3.9 m. atravesados en el flujo de barro. Sharp y Nobles (1953) reportaron cantos rodados de 0.60-0.90 m. de diámetro moviéndose con los escombros en la parte delantera viajando por casi 15 millas antes de ser depositados. Para explicar estas observaciones, se revisará los diversos mecanismos de soporte de partículas incluyendo la turbulencia en los flujos de escombros. Para explicar estas observaciones, se revisará los diversos mecanismos de soporte de partículas como se muestra a continuación.

2.6.6.9.1. ESFUERZO DISPERSIVO.

Basado en el concepto de esfuerzo dispersivo por Bagnold (1954). El cual realizó experimentos con partículas cizallándose en un cilindro giratorio y observó que los esfuerzos de soporte de la partícula eran generados por el resultado de la colisión entre partículas. El esfuerzo normal fue llamado esfuerzo dispersivo.

Existen otras observaciones de flujo de escombros reales (PIERSON 1981) donde el esfuerzo dispersivo no es el único mecanismo involucrado en el soporte de partículas. Los sólidos fueron observados flotando aún cuando los escombros estaban estáticos indicando la presencia de algunos mecanismos adicionales de soporte.

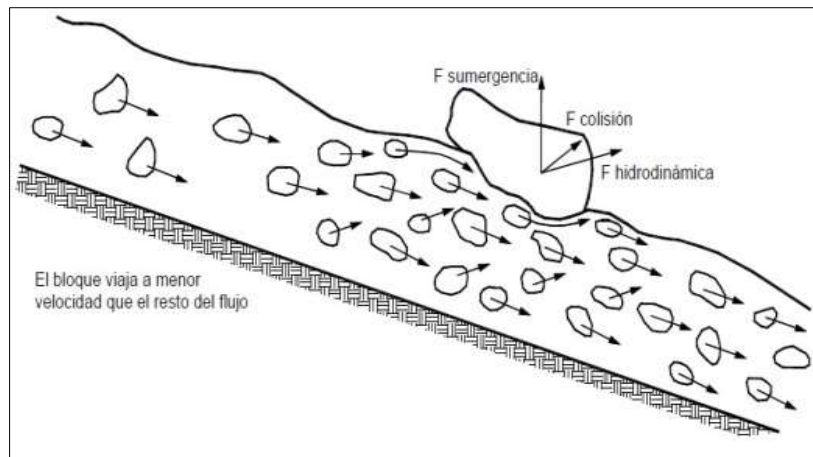


figura 2. 24: Transporte de grandes bloques, debido al esfuerzo dispersivo (SUAREZ 2004).

2.6.6.9.2. FUERZA MATRICIAL

“Se observa que, si una partícula suspendida en un flujo de lodo estacionario es empujada hacia abajo, tiende a hundirse un poco y quedarse en esa posición, sin retornar a la superficie o hundirse hasta el fondo” (Johnson, 1970)

Según Hampton (1975) existe una red de partículas de arcilla floculadas a todo lo largo del fluido. La floculación es la resultante de fuerzas atractivas netas entre dos partículas de arcilla.

La fuerza mínima requerida para romper esta red de partículas floculadas ha sido definida como la Fuerza matricial de Johnson.

2.6.6.9.3. GRADACIÓN INVERSA.

En el frente de una oleada de escombros se observa que las partículas mayores tienden a moverse lateralmente y verticalmente, denominándose a este fenómeno, gradación inversa de las partículas. Este fenómeno de la migración de piedras hacia márgenes es algunas veces llamado segregación. La fuerza dispersiva de Bagnold ha sido sugerida como uno de los mecanismos principales para la segregación. La expresión para la presión dispersiva muestra que es directamente proporcional a la segunda potencia del diámetro de la partícula y a la gradiente de la velocidad. Por eso un incremento en el diámetro resultará un incremento de la presión dispersiva. Un incremento en la gradiente de velocidad (tasa de deformación) aumentará la presión dispersiva. Desde que la gradiente de velocidad es grande cerca del lecho, existe una presión dispersiva grande, causando que las partículas se muevan para arriba.

Otra explicación de este comportamiento fue dada por FISHER Y MATTINSON (1968). Explicaron que la gradación inversa es el resultado del movimiento de la partícula desde una región de presión grande (en el fondo) hacia una región de presión más pequeña en la parte superior basada en el Principio de Bernoulli.

Hay muy pocos intentos para explicar la segregación usando razonamiento analítico.

Sin embargo, Hashimoto y Tsubaki (1983) usaron un concepto que trata de explicar el mecanismo en un flujo líquido-sólido con concentraciones altas y esfuerzos cortantes altos. Su modelo propuso que una partícula con tales esfuerzos cortantes experimenta dos fuerzas de partículas circundantes llamadas, la fuerza de colisión y la fuerza de contacto. Ambos de estos análisis describen una ecuación de movimiento vertical de una partícula mayor que una partícula circundante. Los análisis son muy complejos y muestran que una partícula con mayor diámetro que el diámetro común de las partículas Circundantes tiende a segregar hacia arriba.

2.7. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO.

2.6.1. MODELOS HIDROLÓGICOS

Fernández (Eds.). (2011). Los modelos hidrológicos son una representación física o matemática simplificada de la realidad, manipulable para mejorar la visión que de esta se tiene. En este estudio nos vamos a centrar en un tipo determinado de modelos, los matemáticos, que representan el sistema real por medio de un conjunto de expresiones matemáticas, puesto que son los más utilizados en la actualidad.

2.6.2. TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS

Según (KHALIDOU 2011) Existen dos tipos de modelos fundamentales: los físicos y los Matemáticos. Los modelos matemáticos se subdividen en estadísticos y determinísticos. Esta subdivisión se muestra en la siguiente figura.

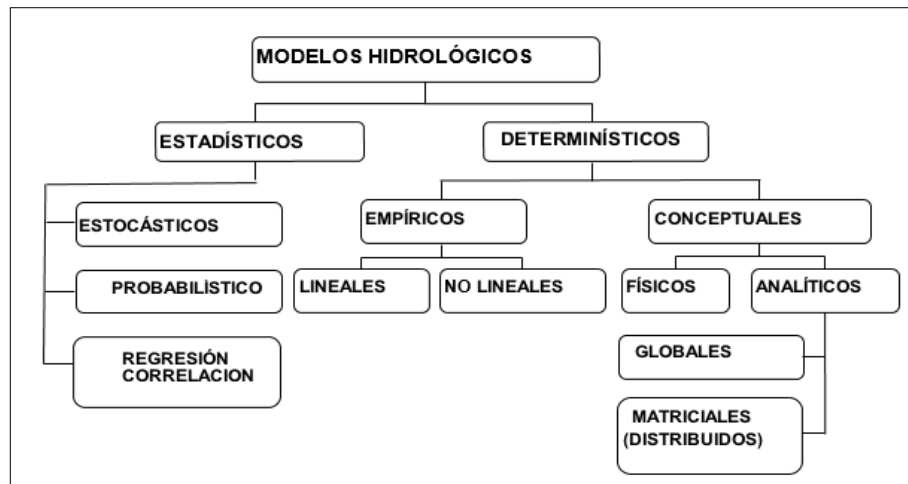


figura 2.25: Tipos de modelos matemáticos en hidrología. (KHALIDOU 2011)

a. Modelos determinísticos.

Hidrología determinística o paramétrica: estudia los fenómenos hidrológicos teniendo en cuenta las relaciones precisas de causa a efecto sin tener en cuenta las condiciones aleatorias del fenómeno o sus componentes. El hidrólogo determinista estudia detalladamente cada fenómeno bajo leyes físicas o analíticas rígidas e inmutables.

b. Modelos estadísticos

Hidrología estadística: estudia los fenómenos hidrológicos bajo un aspecto probabilístico. Se supone que las leyes que rigen u originan tales fenómenos son tan complejas que su examen riguroso es física o económicamente imposible. Dentro de los modelos estadísticos están los modelos probabilísticos y estocásticos.

Los modelos probabilísticos están en función al riesgo de falla y periodos de retorno. Los modelos estocásticos o de series temporales carecen de bases físicas y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios.

Según (MARCO. 1993) el origen de la estocacidad en los recursos hídricos es doble: por una parte, la distribución de la lluvia es un proceso aleatorio prácticamente puro, y por otro lado la gran cantidad de factores que afectan a la propagación del agua en la superficie terrestre (conductividad, propagación de agua, cubierta vegetal).

2.6.3. MODELOS HIDRÁULICOS

FERNÁNDEZ y VELA 2011) Los modelos hidráulicos son una representación física o matemática simplificada de la realidad, manipulable para mejorar la visión de los fenómenos que ocurren en ella.

Según se consigna en Universidad del Cauca – CRC- INGEOMINAS, (2005), existen numerosos programas para modelar las condiciones hidráulicas y morfológicas en ríos; dichos programas varían en el grado de sofisticación y fiabilidad. La ciencia de la modelación numérica está progresando rápidamente haciendo que nuevos programas replacen a los ya obsoletos. Los programas para modelación pueden clasificarse dependiendo de qué calculan, cuántas dimensiones son usadas y particularidades de los métodos numéricos empleados, lo que hace que muchos de ellos sean para aplicaciones muy específicas.

2.6.4. TIPOS DE MODELOS HIDRÁULICOS.

Guevara (2003). Existen varios tipos de modelos matemáticos en la hidráulica fluvial. Su clasificación depende del transporte de sedimentos y la variación del caudal en función del tiempo.

2.6.4.1. MODELOS DE LECHO FIJO O AGUA CLARA.

Los modelos de lecho fijo requieren información hidráulica, sedimentológica, topográfica y de calibración. En este tipo de modelos el sedimento no se emplea para calcular el arrastre, pero sí para evaluar las condiciones de rugosidad del cauce. Estos modelos sugieren un cauce de sección transversal fija.

2.6.4.2. MODELOS DE LECHO MÓVIL.

Los modelos de lecho móvil inician una modelación previa de las características hidráulicas. Una vez calibrado el comportamiento hidráulico se procede a incluir los datos complementarios que afectan a los sedimentos: granulometrías, zona erosionable y no erosionable y profundidad de la zona erosionable (profundidad de acorazamiento, controles geológicos, etc.). Una vez calibrados los modelos de lecho móvil, arrojan información importante para el análisis del comportamiento hidráulico-morfológico de la Corriente y su cauce.

2.6.4.3. MODELOS DE RÉGIMEN NO - PERMANENTE.

Los modelos de régimen no permanente requieren igualmente características topográficas, hidráulicas, sedimentológicas, de calibración y condiciones de caudal en función del tiempo. A lo anterior, se suma la complejidad de sus ecuaciones que se traduce en problemas adicionales de estabilidad numérica y convergencia. Por esto, es necesario realizar primero un proceso de calibración en condiciones de régimen permanente y finalmente un análisis de sensibilidad del modelo de los parámetros que se consideren inciertos.

2.6.4.4. MODELOS MATEMÁTICOS FLUVIALES O DE FLUJO LIBRE.

Este tipo de modelos son los que se aplican en la modelación de ríos y canales abiertos. Con las herramientas informáticas existentes, la simulación o modelación del comportamiento hidráulico y morfológico de cauces aluviales es un recurso de fácil utilización que proporciona buenos resultados para el análisis de complejos problemas que se presentan en el área de la ingeniería fluvial. Muchas personas y organizaciones públicas y privadas de gobiernos de todo el mundo, universidades, institutos, centros, entre otros, se han esforzado en desarrollar teorías, modelos y herramientas que mejor modelen el comportamiento de los ríos aluviales. Sin embargo, en nuestro país, estas técnicas son recientes y se inunda el medio de incertidumbre e incredulidad.

La facilidad de simular los procesos hidráulico-morfológicos, su dinámica y respuesta a estructuras invasoras, pasivas, temporales o permanentes del sistema, permitirá estudiar con mejor detalle la estabilización de los ríos y el impacto ambiental y ecológico de la intervención. En la Tabla 2.8 se relacionan algunos modelos reconocidos en el campo de la modelación e investigación y otros comerciales de circulación libre o licenciada para su aplicación en estudios de desarrollo gubernamental o privado.

En el caso de la hidráulica fluvial, los modelos pueden clasificarse como: modelos de lecho fijo, modelos de lecho móvil y modelos de régimen permanente y no-permanente, aunque pueden existir combinaciones entre ellos.

Tabla 2. 8: Modelos reconocidos de 1D, 2D y 3D. Universidad del Cauca – CRC-INGEOMINAS, (2005).

Modelos Unidimensionales	Modelos Bidimensional.	Modelos Tridimensional.
HEC2 HEC-RAS RIVERCAD ISIS WSPRO HEC-6 SEDIMOD FLUVIAL-11 DBF-1D NWS-FLDWAV	FLATMODEL RIVER 2D IBER V 2.4.2. TITAN 2D FLDWAY G- STARS HYDRO2DE RAM-2 DELFT 2D	SSIIM-CFD FLOW3D DELFT 3D CH3D-SED TRISULA1

2.6.7. PROCEDIMIENTOS NUMÉRICOS DEL IBER v 2.4.2.

Para realizar el cálculo con el programa, se deben realizar los siguientes pasos:

- Crear o importar una geometría.
- Asignar una serie de parámetros de entrada (rugosidad de fondo, modelo de turbulencia, etc.)
- Asignar condiciones de contorno e iniciales.
- Asignar opciones generales de cálculo (tiempo de cálculo, parámetros del esquema numérico, activación de módulos adicionales).
- Construir una malla e cálculo.
- Lanzar el cálculo.

2.6.8. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO IBER v 2.4.2.

Como es sabido el movimiento de un fluido tan complejo como el que forma los aludes torrenciales no puede representarse por medio de los que se aplican comúnmente para fluidos como el agua.

El modelo bidimensional de diferencias finitas IBER, es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina en régimen no - permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER V 2.4.2, abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de mareas en estuarios. Todos los criterios trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros.

2.6.8.1. ECUACIONES BÁSICAS

Las ecuaciones que utiliza el modelo IBER V 2.4.2. son las de continuidad y cantidad de movimiento, integradas en la vertical:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hV_x}{\partial x} + \frac{\partial hV_y}{\partial y} = i \quad (2.13)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (2.14)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (2.15)$$

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

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).

2.6.8.2. SOLUCION NUMERICA

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y de momentum en el modelo IBER V 2.4.2. 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 Iber v 2.4.2. 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:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{(v + c)} \quad (2.16)$$

Donde:

C es el número de Courant ($0.3 < C < 1.0$)

Δx es el ancho del elemento de la malla cuadrada

v es la velocidad promedio de la sección transversal calculada

c es la celeridad de la onda calculada.

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

$$\Delta t = \zeta S_o \Delta x^2 / q_o \quad (2.17)$$

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

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

2.6.8.3. ESQUEMAS NUMÉRICOS.

Tanto las ecuaciones hidrodinámicas (ecuaciones de aguas someras bidimensionales), como son aguas poco profundas como las correspondientes a los modelos de turbulencia y de transporte de sedimentos, se resuelven en forma integral por el método de volúmenes finitos. El método de volúmenes finitos es uno de los más extendidos y comúnmente utilizados en dinámica de fluidos computacional. En esta

sección se describen brevemente los esquemas numéricos utilizados en Iber.

a) malla de calculo

Para resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos es necesario realizar previamente una discretización espacial del dominio a estudiar. Para ello se divide el dominio de estudio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). Iber trabaja con mallas no estructuradas formadas por elementos que pueden tener 3 o 4 lados. Se pueden combinar elementos irregulares de 3 y 4 lados dentro de la misma malla. La principal ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es la facilidad con que se adaptan a cualquier geometría, ya que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna. Esta característica las hace especialmente indicadas para su utilización en hidráulica fluvial.

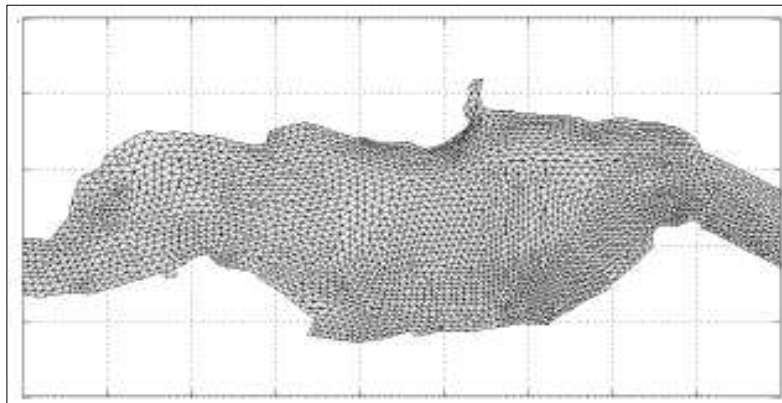


figura 2. 26: Ejemplo de malla no estructurada formada por elementos triangulares.

b) Discretización en volúmenes finitos de las ecuaciones 2D-SWE

Para su discretización por el método de volúmenes finitos, en Iber se trabaja con las ecuaciones de aguas someras bidimensionales escritas en forma conservativa y vectorial como:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} - \sum_k G_k$$

en donde el vector de variables conservadas w y el vector de los términos de flujo F_x , F_y vienen dados por:

$$w = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix} \quad F_x = \begin{pmatrix} \frac{q_x}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix} \quad F_y = \begin{pmatrix} \frac{q_y}{h} + \frac{gh^2}{2} \\ \frac{q_x q_y}{h} \end{pmatrix}$$

Para realizar la discretización espacial de las ecuaciones de conservación de masa y movimiento por el método de volúmenes finitos se realiza la integral de las ecuaciones diferenciales en cada celda de la malla de cálculo. Esta forma de proceder es especialmente ventajosa para la resolución de ecuaciones de conservación, ya que se resuelven las ecuaciones en forma integral, lo que permite formular de forma sencilla métodos conservativos. La discretización temporal y espacial de las ecuaciones de aguas someras bidimensionales en forma vectorial viene dada por la siguiente expresión:

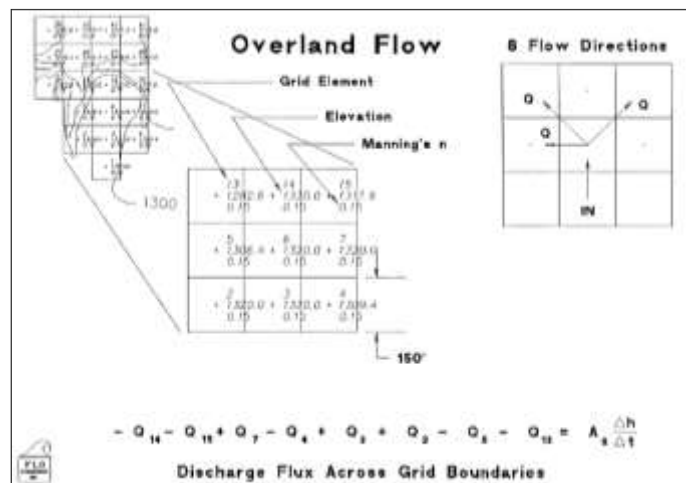


figura 2. 27: Ejemplo de malla de discretización

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).

$$d_x^{i+1} = d_x^i + d_{x+1}^i \quad (2.18)$$

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.

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw} \quad (2.19)$$

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

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{\Delta Q_x^{i+1} \Delta t}{Area} \quad (2.20)$$

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.

2.6.8.4. MODELO REOLÓGICO

Intentos iniciales para simular flujos de escombros fueron realizados por modelos de tránsito unidimensionales. De León y Jeppson (1982) modelaron flujos de agua laminares con incrementos de factores de fricción. Schamber y

MacArthur (1985) crearon un modelo de elementos finitos unidimensional para flujos de lodo usando el modelo reológico de Bingham para evaluar los esfuerzos cortantes del fluido no Newtoniano. O'Brien (1986) diseñó un modelo de flujo de lodo unidimensional para canales de cuenca, empleando también el modelo reológico de Bingham. En 1986, MacArthur y Schamber presentaron un modelo de elementos finitos de dos dimensiones para ser aplicado a topografías superficiales simplificadas. Las propiedades fluidas fueron modeladas como un fluido Bingham cuyo esfuerzo al corte es una función de la viscosidad y el esfuerzo de cedencia del fluido.

Takahashi y 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 de Bagnold's (1954) que describe los esfuerzos resultantes de la colisión de partículas de sedimento. Luego, Takahashi y Nakagawa (1989) modificaron el modelo de flujos de escombros para incluir turbulencia.

O'Brien y Julien (1988), Major y Pierson (1990), y Julien y Lan (1991) investigaron flujos de lodo con altas concentraciones de sedimento fino en la matriz fluida. Estos estudios mostraron que los flujos de lodo se comportan como los fluidos 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 propuesto por O'Brien y Julien (1985) describe el régimen continuo del flujo viscoso a flujo turbulento/dispersivo.

Los esfuerzos cortantes en flujos de sedimento, lodos y escombros, 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.

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (2.21)$$

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 and Julien, 1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (2.22)$$

Donde:

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc} \quad (2.23)$$

y

$$C = \rho_m l^2 + a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2 \quad (2.24)$$

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 , 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 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:

$$\frac{1}{\lambda} = \left[\left(\frac{C_m}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (2.25)$$

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 (ver Figura 2.27). 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.

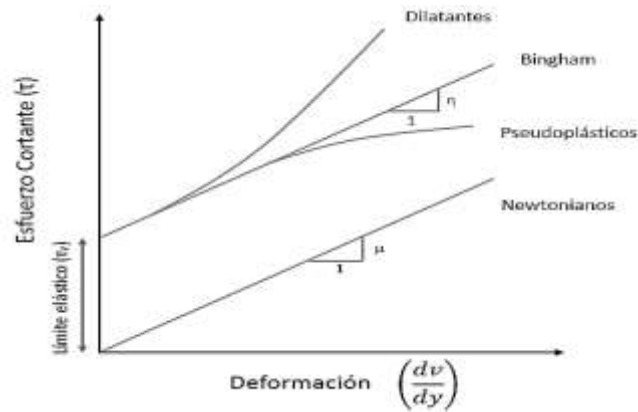


figura 2. 28: Modelos de deformación del fluido

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 2.22, Julien y Lan (1991) propusieron una formulación adimensional del modelo reológico cuadrático como sigue:

$$\tau^* = 1 + (1 + T_d^*) a_i D_v^* \quad (2.26)$$

en donde los tres parámetros adimensionales τ^* , D_v^* y T_d^* son definidos como:

1. Esfuerzo cortante en exceso adimensional, si $\tau^* = 1$ la mezcla se comporta como un fluido del tipo Bingham

$$\tau^* = \frac{\tau - \tau_y}{\eta \frac{\partial u}{\partial y}} \quad (2.27)$$

2. Tasa dispersivo-viscoso adimensional Si Dv^* es grande, el flujo será dispersivo; si Dv^* es pequeño será viscoso.

$$D_v^* = \frac{\rho_s \lambda^2 d_s^2}{\eta} \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (2.28)$$

3. Tasa turbulento-dispersivo, Si Td^* es grande el flujo será turbulento; si Td^* es pequeño será dispersivo.

$$T_d^* = \frac{\rho_m l_m^2}{a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2} \quad (2.29)$$

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 $Dv^* > 400$ y $Td^* > 1$.
- 2) Los flujos de lodo (Mudflow) ocurren cuando los esfuerzos de cedencia y viscosos son dominantes, dados por $Dv^* < 30$.
- 3) Los flujos de escombros (Debris flow) o flujos granulares ocurren cuando los esfuerzos dispersivos son dominantes, dados por $Dv^* > 400$ y $Td^* < 1$.

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

En el Anexo C, se efectuará la clasificación del tipo de flujo para el río Shullcas utilizando el criterio de Julien y Lan (1991).

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

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (2.30)$$

Donde la pendiente de fricción total S_f es la suma de los componentes: la pendiente de cedencia S_y , la pendiente viscosa S_v , y la pendiente turbulenta-dispersiva S_{td} . La pendiente de viscosidad puede ser escrito como:

$$S_v = \frac{K\eta}{8\gamma_m} \frac{V}{h^2} \quad (2.31)$$

Donde γ_m es el peso específico de la mezcla de sedimentos, K es el parámetro de resistencia para flujos laminares (tabla 2.9).

Tabla 2. 9: Parámetros de Resistencia para flujo laminar (Woolhiser (1975))

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

Un valor de $K=2285$ fue calibrado para el flujo de lodo de la quebrada Rudd en Utah (EE. UU) 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:

$$S_{td} = \frac{\eta_{td}^2 V^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (2.32)$$

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.

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta}{8\gamma_m} \frac{V}{h^2} + \frac{\eta_{td}^2 V^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (2.33)$$

Una solución de la ecuación cuadrática para la combinación de pendientes de fricción ha sido formulada en el modelo IBER V 2.4.2. para la estimación de velocidad en la ecuación de momentum.

2.6.8.5. 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 vs. Tasa de deformación. Usualmente en estos aparatos sólo se analiza la matriz del fluido (limos y arcillas con tamaños menores a 0,072 mm), es decir sólo se analiza la matriz más viscosa de la mezcla sin considerar el material grueso. Sin embargo, el uso de esta metodología resulta ser complicado y a la vez muy costosa.

O'Brien 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 2.10. 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 obtenidos se concluyó que la viscosidad (η) y el esfuerzo de cedencia (τ_y) se incrementan potencialmente con la concentración de sedimentos (C_v):

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (2.34)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (2.35)$$

Donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio y C_v es la concentración volumétrica de sedimentos (Ver Tabla 2.10, Figuras 2.27).

Tabla 2. 10: Propiedades de las matrices de flujos de lodo (sólo limo y arcilla)

SAMPLE	DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE SEDIMENTO				LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO
	ARCILLA (%)	D16 (mm)	D50 (mm)	D84 (mm)		
Glenwood original	4.8	0.010	0.034	0.062	-	-
Glenwood sample 1	6.8	0.009	0.023	0.050	-	-
Glenwood sample 2	3.0	0.016	0.035	0.061	-	-
Glenwood sample 3	4.8	0.011	0.025	0.053	-	-
Glenwood sample 4	7.6	0.001	0.018	0.032	-	-
Aspen Pit 1	31.3	0.001	0.011	0.032	0.32	0.11
Aspen natural soil	27.0	0.001	0.012	0.028	0.25	0.06
Aspen mine fill	27.8	0.001	0.013	0.030	0.24	0.06
Aspen natural soil source	31.6	0.001	0.016	0.039	-	-
Aspen mine fill source	25.2	0.001	0.018	0.061	-	-

Tabla 2. 11: Esfuerzo de cedencia y viscosidad en función de C_v

FUENTE	$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$		$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$	
	α	β	α	β
Correlaciones de mediciones en Campo				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.036	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Área	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	6.2
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Correlaciones disponibles de la literatura:				
lida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.05	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

Muchos flujos de sedimento de lodos y escombros, viscosos son algunas veces referidos a ya sea 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 en agua y sedimentos finos.

La viscosidad del flujo de sedimento de lodos y escombros 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 2.11 representan un rango completo de características de flujo potencial.

Por ejemplo, las muestras de Glenwood con porcentajes bajos de arcilla tiene valores bajos de esfuerzo de cedencia en comparación de las muestras de Aspen con contenidos de arcilla altos.

Además de la revisión de literatura, la muestra de Glenwood4 nos da un mayor valor de viscosidad y los tirantes del flujo son elevados; sin embargo, la muestra de Glenwood2 nos da una menor viscosidad y los tirantes del flujo menores. Para el caso de simulaciones de flujos de lodo, la muestra de Glenwood4 nos proporciona una buena aproximación del comportamiento para altas concentraciones de sedimento.

2.6.8.6. 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 IBER v 2.4.2. se observa en la Tabla 2.12. Eventos de avenidas.

Tabla 2. 12: Comportamiento del flujo de lodo como una función de Cv.

Descripción del Tipo de Flujo	Concentración de sedimentos		Características del Flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamientos	0,65 – 0,80	0,83 – 0,91	No 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 IBER V 2.4.2. 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).

Hay varias relaciones importantes de concentración de sedimento que ayudan a definir los flujos de lodo y escombros.

$$C_v = \frac{\text{volumen del sedimento}}{\text{volumen del agua + sedimento}} \quad (2.36)$$

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

$$C_v = \frac{C_w \gamma}{\gamma_s - C_w(\gamma_s - \gamma)} \quad (2.37)$$

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

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \quad (2.38)$$

Similarmente la peso específico de la mezcla de flujo ρ_m es dado por:

$$\rho_m = \rho + C_v(\rho_s - \rho) \quad (2.39)$$

$$\rho_m = \frac{\gamma_m}{g} \quad (2.40)$$

CAPITULO III

3.1. MARCO METODOLOGÍCO

3.1.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Por su finalidad de estudio, el tipo de investigación de acuerdo con las variables propuestas, el objetivo general y objetivos específicos de la investigación es de tipo: APLICADA. Según algunos autores:

3.1.2. NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación será de alcance EXPLICATIVO, son aquellos trabajos donde muestra preocupación, se centra en determinar los orígenes o las causas de un determinado conjunto de fenómenos, donde el objetivo es conocer por que suceden ciertos hechos atrás ves de la delimitación de las relaciones causales existentes o, al menos, de las condiciones en que ellas producen.

Según Ricardo Flores (2013) Este es el tipo de investigación que más profundiza nuestro conocimiento de la realidad, porque nos explica la razón, el porqué de las cosas, y es por lo tanto más complejo y delicado pues el riesgo de cometer errores aumenta considerablemente.

3.1.3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente trabajo de investigación se utilizará el diseño de Investigación EXPERIMENTAL. Según el filósofo Ludovico Geymonat, (1908-1991) decía en su obra “Historia de la filosofía y de la investigación sin ampliar el reclutamiento de nuevos investigadores y, para ello, se necesita empezar a atraer hacia el interés cultural el mayor número de personas de la sociedad.

El estudio experimental se realiza cuando se conocen los factores que ha originado el problema para darle un tratamiento metodológico. Responde a preguntas de ¿Cuál es la eficiencia del nuevo sistema?, ¿Cómo influye el? ¿Qué mejoras ha logrado?, etc.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población de estudio de nuestra investigación será el RIO SHULLCAS (Long total 36 Km)

3.2.2. MUESTRA

- La investigación tendrá como población RIO SHULLCAS (Long total 36 Km) y como muestra al anexo de VILCACOTO (del km 22+000 al 22+800)
- Mediante los problemas que suscitan, en apocas de fuertes lluvias por efectos del fenómeno del niño, provocando grandes riesgos de vulnerabilidad.

3.3. FORMULACION DE LA HIPOTESIS

3.3.1. HIPOTESIS GENERAL

Los flujos de lodos generados por los componentes hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos originan zonas vulnerables y de inundación en la sub cuenca del rio Shullcas en anexo de Vilcacoto.

3.3.2. HIPOTESIS ESPECIFICAS

- a) Los componentes hidrológicos influyen en el cálculo de transporte de flujos de lodos y generen zonas de crecidas de inundación, son precipitaciones (intensidad) y caudales.
- b) Los componentes geomorfológicos influyen en el cálculo de transporte de flujos de lodos y generen zonas de crecidas de inundación, son parámetros de la cuenca, tipo de suelo, tamaño y forma de sedimentos.
- c) Los componentes hidráulicos influyen en el cálculo del transporte de lodos y generen zonas de crecidas de inundación, son velocidad, área de la sección transversal y tirante.

3.4. OPERACIONALIZACION DE VARIABLES

Las variables son los que componen el problema y la hipótesis de la investigación y presentan características complejas tienen algunas características, dimensiones y áreas que se encuentran antes de los indicadores, por lo que hay que descomponerlas en su nivel resectivo.

La operacionalización de la variable dependiente e independiente juntamente con sus indicadores, se describen en el cuadro 3.1:

Cuadro 3.1: Operacionalización de variables.

OPERACIONALIZACION DE VARIABLES, DIMENSIONES E INDICADORES		
VARIABLES INDEPENDIENTES	DIMENSIONES	INDICADORES
X1: componentes hidrológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Precipitaciones • Caudales 	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad (Alta, Media y Baja) • m3/seg
X1: componentes geomorfológicos	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros de la cuenca • Tipo de suelo. • Tamaño y forma de sedimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Área, Perímetro, Pendiente, Longitud del recorrido máximo. • clasificación SUCS. • Angular, esférico, etc.
X3: componentes Hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad. • Área • Tirante 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta, Media, Baja • Irregular • Normal y Critico.
<p><u>VARIABLE DEPENDIENTE</u></p> <p>Y: Flujo de lodos</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de sedimentos transportados • Magnitud de la profundidad del río. • Magnitud de la velocidad del flujo de río. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta, Media y baja. • Profundo y poco profundo. • Fuerte, Media, Baja

Fuente: Elaboración propia.

3.5. LIMITACIONES

El problema de investigación que tenemos definir zonas de riesgo de flujos de lodos generados por los parámetros hidrológicos, geomorfológicos e hidráulicos e evitar áreas vulnerables de inundación es la incorrecta ubicación de las edificaciones puesto que conlleva a hacer un rediseño de

la ubicación de viviendas, que en muchos casos las máximas avenidas afectan, así como también el presente estudio no se evaluará la economía de los daños ocasionados por una máxima avenida que se obtenga del análisis de riesgos.

Por cuestiones de conveniencia y de tiempo para la presente tesis se definió estudiar el Rio Shullcas.

3.5.1. ECONOMICAS

Debido a la complejidad de realizar un muestreo y el tiempo y costo que demanda que demanda y para lograr que las muestras sean representativas, el presente trabajo se realizó tomando muestras de un tramo de 800 ml, del tramo 22+00 al 22+800, aprovechando la vulnerabilidad del anexo de vilcacoto, con características expuestas al peligro de flujos de lodos y escombros para diversos giros de cambios climatológicos con efluentes del rio shullcas, los cuales se realizaron los siguientes gastos.

<u>PRESUPUESTO DE LA INVESTIGACION</u>				
<u>ACTIVIDADES</u>	UNIDADES	CANTIDADES	P.U.	TOTAL
<u>RECURSOS HUMANOS</u>				
Estudios de mecánica de suelos	UND	4	200.00	800.00
Estudio topográfico (2KM margen de rio)	GLB	1	1600.00	1600.00
<u>VIATICOS Y SERVICIOS</u>				
Gastos de copias de información bibliográfica	GLB	1	200.00	200.00
Gastos de búsqueda de información sobre el tema (Internet)	MES	4	100.00	400.00
Visita a las entidades respectivas (ANA,ALA,IGP)	GLB	1	200.00	200.00
Capacitación en GIS	MES	4	250.00	1000.00
Obtención de metadatos espaciales IGP	GLB	1	200.00	200.00
<u>RECURSOS MATERIALES</u>				
Compra de libros y revistas	GLB	1	200.00	200.00
Material de impresión	GLB	1	100.00	100.00
Alquiler de equipo de computo	GLB	1	200.00	200.00
Documentación y material de oficina	GLB	1	300.00	300.00
TOTAL (S/.)				5200.00

SON : CINCO MIL DOCIENTOS SOLES CON 00/100

Fuente: Elaboración Propia

3.5.2. TECNICAS

La técnica que se utilizará será la observación sistemática y experimentación.

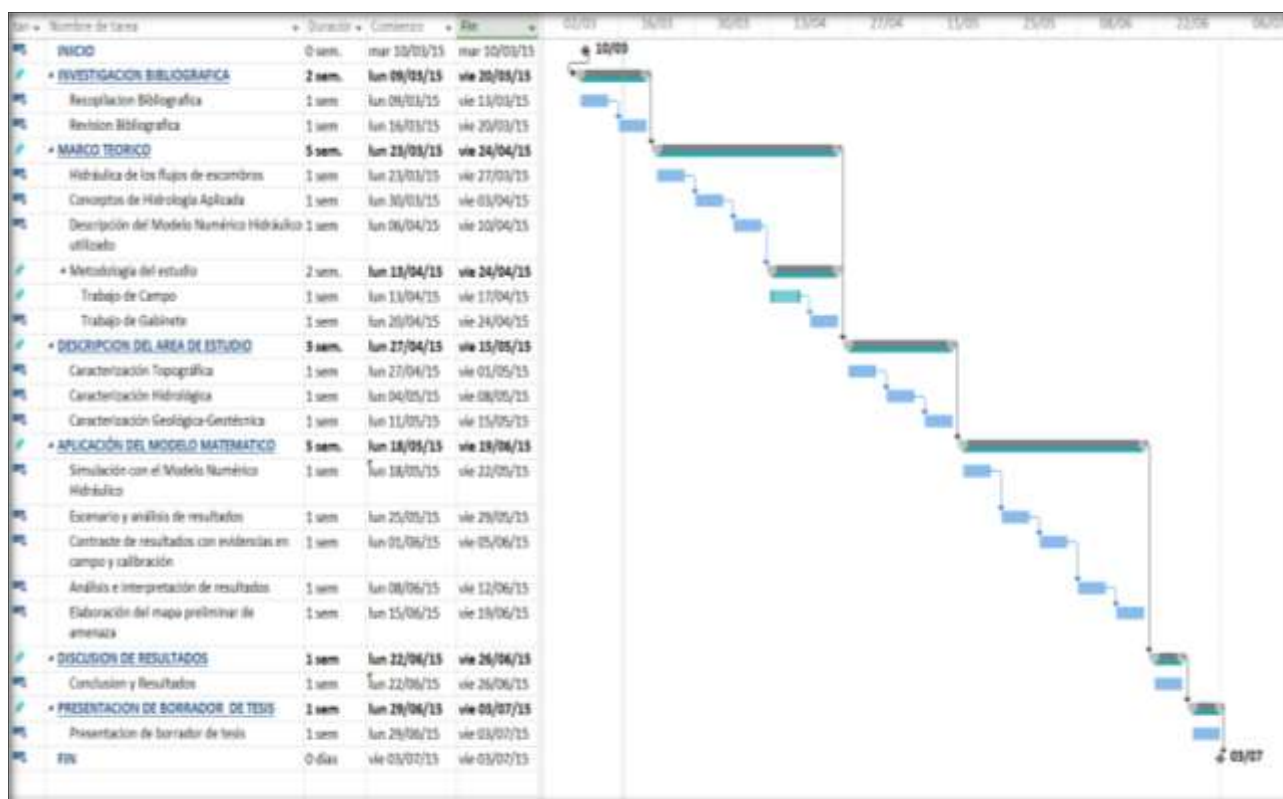
3.6. DELIMITACIONES

Mediante los problemas que suscitan, en apocas de fuertes lluvias por efectos del fenómeno del niño, provocando grandes riesgos de vulnerabilidad.

La investigación se realizará teniendo en cuenta como área de estudio el RIO SHULLCAS (Long total 36 Km) y como muestra al anexo de VILCACOTO (del km 22+000 al 22+800).

3.6.1. TEMPORAL

La presente investigación se realizó con el presente cronograma, el cual fue planteado al inicio de la investigación teniendo en cuenta los temas a desarrollarse.



Fuente: Elaboración propia.

3.6.2. ESPACIAL

El área de estudio, geográficamente se encuentra ubicada, en el distrito del Tambo Provincia de Huancayo, geográficamente la subcuenca constituye un afluente del río Mantaro en su margen izquierda, ubicada

en las Sierras Orientales del departamento, entre los paralelos 11°52' 13" a 12° 07' 00" de Latitud Sur y entre los meridianos 75° 01' 57" a 75° 14' 37" de Longitud Oeste; altitudinal mente, se encuentra comprendido entre los 3 172 msnm a 4943 msnm. Abarca una superficie aproximada de 23236.09 ha.

3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.7.1. TÉCNICAS

La técnica que se utilizará será la observación sistemática y experimentación.

3.7.2. BUSQUEDA DE INFORMACION BIBLIOGRAFICA.

A continuación, citamos, grandes fuentes de información referentes a huacos en río shullcas, que nos han servido para conocer mejor la problemática del fenómeno.

Uno de los eventos extraordinarios el que ocurrió en diciembre de 1990 el desembalse de 1'350,429 m³ de agua de la laguna Chuspicocha originó un aluvión que causo grandes daños, tanto en la población de las riberas del río Shullcas, áreas de cultivo entre otros, además también afecto a una parte de la ciudad de Huancayo (Fuente El Comercio, 1991), la misma que se encuentra sobre el cono de deyección del río Shullcas.

3.7.3. DATOS DE CAMPO.

Los instrumentos de medición son:

- Registros de precipitaciones y caudales (fuente SENAMHI)
- Estudio de mecánica de suelos
 - Granulometría
 - Clasificación de suelos
- Estudio topográfico
 - Modelo digital de elevación

3.7.4. TRABAJOS DE GABINETE

Para el procesamiento de datos del proyecto de investigación se utilizaron los siguientes programas:

- Microsoft Excel: cálculo hidráulico.

- Microsoft Word: para la elaboración de las fichas de organización, sistematización e interpretación de los datos obtenidos en la obtención de resultados.
- AutoCAD: Para establecer la localización, delimitación, puntos de investigación, etc., del proyecto mediante planos.
- Para la estimación del hidrograma de avenida, utilizaremos como apoyo 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. Además, se utilizará tormentas hipotéticas para 24 horas provenientes de investigaciones en los Estados Unidos.
- IBER V.2.4.2.: para el procesamiento de datos, y visualización de las áreas vulnerables.

3.8. ASPECTOS ÉTICOS

Los documentos que se adjunta en los anexos son la validación y confiabilidad del instrumento, ya que han sido visados y aprobados por la entidad correspondiente y la opinión del experto en el tema.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

4.1.1. DATOS DEL PROYECTO.

- Región : Junín
- Provincia : Huancayo
- Distrito : El Tambo
- Lugar : Vilcacoto

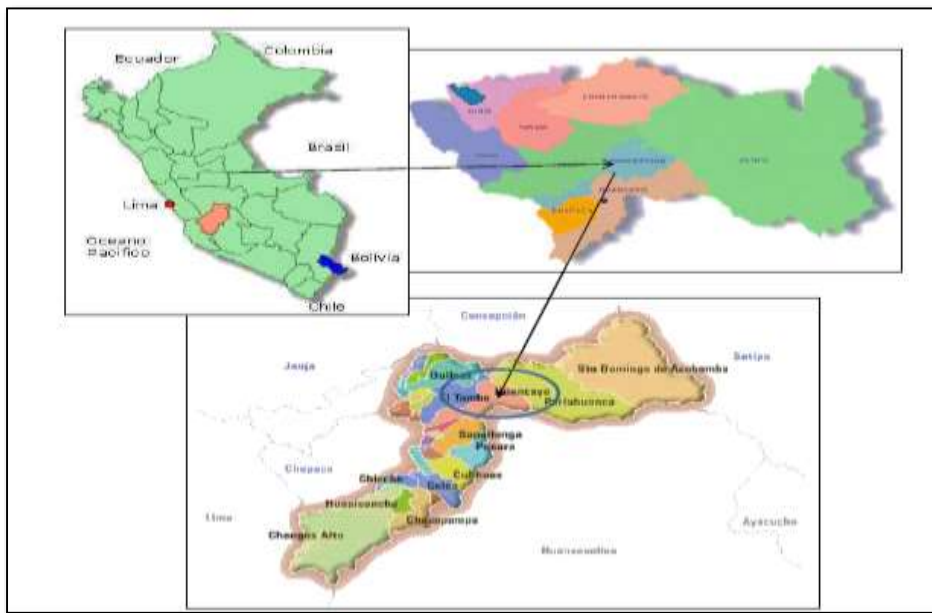


figura 4. 1: Ubicación Región, Provincia, Distrito.



Figura 4.2: Ubicación de la cuenca shullcas.

4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Para el modelamiento de la investigación fue necesario caracterizar y definir las propiedades más importantes, del tramo (del km 22+000 al 22+800), del anexo de Vilcacoto, que comprende en general la subcuenca del Shullcas con un área total de 232.36 km², para la aplicación del modelo numérico de flujo se eligió 800 ml, del anexo de Vilcacoto el cual tiene un área de aporte es de 180.30 km² y un perímetro de 66.406 km aproximadamente.

Como también, se pasará a describir las características fundamentales de la cuenca topografía de la zona, su hidrología con el cálculo del hidrograma de avenida y su geología acompañado de sus estudios de suelos.

4.2. CARACTERIZACIÓN TOPOGRÁFICA.

4.2.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA, EXTENSIÓN Y LÍMITES

El área de estudio, geográficamente se encuentra ubicada, en el distrito del Tambo Provincia de Huancayo, geográficamente la subcuenca constituye un afluente del río Mantaro en su margen izquierda, ubicada en las Sierras Orientales del departamento, entre los paralelos 11°52' 13" a 12° 07' 00" de Latitud Sur y entre los meridianos 75° 01' 57" a 75° 14' 37" de Longitud Oeste; altitudinalmente, se encuentra comprendido entre los 3 172 msnm a 4943 msnm. Abarca una superficie aproximada de 23236.09 ha. Los límites hidrográficos son: El río Shullcas, que tiene una longitud de 35.9 Km, nace de las descargas de las aguas de las lagunas Chuspicocha (4632 msnm) y Lasuntay (4646 msnm),

ubicadas al pie del flanco occidental del nevado Huaytapallana.

- Norte : Subcuenca del Tulumayo.
- Sur : Microcuenca del Chaclas.
- Este : Subcuenca del Pariahuanca.
- Oeste : Subcuenca del Achamayo.

4.3. CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS.

La sub cuenca de la subcuenca del río Shullcas presenta tres niveles de terrazas, lo que hace entender que la subcuenca estuvo sometida a tres periodos de acumulación aluvial; para fines prácticos estas geomorfologías han sido enumeradas de la forma creciente: T3 la más elevada y de mayor espesor; T2 de altura y espesor intermedio y T1 la más baja y de menor espesor (Imagen 4.3).



figura 4. 3: Vista de los tres niveles de terrazas (IGP 2011).

Según (DOLLFUS,1965) pudo reconocer cuatro episodios glaciares, el más antiguo conocido como glaciaciones Mantaro que descendió hasta los 3.600 msnm, y las otras tres más recientes que al igual que en las terrazas han sido enumeradas de la más antigua a la más reciente: G3 correspondiente a una glaciación que llegó hasta los 3.800 msnm; G2, que llegó alrededor de los 4.000 msnm, y G1, correspondiente a avances glaciares más recientes que bajaron hasta los 4.700 msnm.

Como también los procesos de erosión, transporte y sedimentación ocurridos durante el movimiento de un flujo se reflejan en las características texturales del depósito como el tamaño, la distribución o el ordenamiento, de los sedimentos.

Como también se han elaborado una serie de secciones estratigráficas en cortes naturales de los depósitos aluviales donde se han descrito dichas características. Producto del análisis de las secciones estratigráficas se han reconocido las fases mostradas en la Tabla 4.1

Tabla 4. 1: Principales facies identificadas en la subcuenca del río Shullcas (OCAMPO Y GOMEZ 2011).

Facies		Características texturales	Interpretación
A L U V I Ó N	Flujo de escombros	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Amplio rango de granulometría. ➤ Depósitos heterogéneos. ➤ Clastos englobados por una matriz arenosa de arcilla. ➤ No presenta estructuras sedimentarias. ➤ Clastos angulosos. 	La granulometría, la heterogeneidad y la matriz del depósito revela que este se formó a partir de la rápida depositación de un flujo denso y con una alta concentración que no permitió el ordenamiento de los clastos.
	Flujos Heperconcentrados	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Amplio rango de granulometría. ➤ Depósitos homogéneos. ➤ Los clastos están en contacto entre sí o englobados por una matriz arenosa. ➤ Los clastos presentan un alineamiento. 	La granulometría, la heterogeneidad y la matriz del depósito revelan que este también se formó a partir de la rápida depositación de un flujo denso y con una alta concentración. Sin embargo, el alineamiento de los clastos revela que hubo una mayor concentración de agua

		con respecto al flujo de escombros.
Flujos Normales	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Granulometría uniforme. ➤ Depósitos homogéneos. ➤ Los clastos están en contacto entre sí. ➤ Presentan estructuras sedimentarias. 	
Coluviales	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Amplio rango de granulometría. ➤ Depósitos heterogéneos. ➤ Los clastos están en contacto entre sí o englobados por una matriz. ➤ Presentan clastos angulosos y fracturados. 	Por las características texturales principalmente la angulosidad de sus componentes se infiere que este depósito se formó a partir de movimiento rápido de rocas y suelo de las laderas del valle. Dentro de estos tenemos: deslizamientos, avalanchas, flujos, etc.
Lacustre	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Granulometría correspondiente a sedimentos finos (arcillas). ➤ Depósitos homogéneos. ➤ Presentan estratificación. 	El tamaño de los sedimentos y la estratificación de los depósitos revelan que se formó en un ambiente de relativa tranquilidad como una laguna.
Tills	Amplio rango de granulometría Depósitos heterogéneos.	El amplio rango de los sedimentos (de diferentes tamaños)

		depositados a partir a fusión del hielo del glaciar.
--	--	--

A. Sector cabeceras.

Son las quebradas que se encuentran sobre los 4,000 msnm. Dentro de las cuales se ubican las siguientes quebradas, Chuspe, se identificó 4 depósitos de aluvión, Antayaco, se tiene al menos un depósito de aluvión de los años 1960 y Ronda que descienden de la cordillera Huaytapallana, nos muestran evidencias de la ocurrencia de aluviones, por lo que son calificadas como quebradas inactivas.

B. Sector Acopalca.

Son los depósitos aluviales originados en el río Shullcas entre las cotas 4.000 y 3.800 msnm.

C. Sector vertiente empinada.

Comprende a los depósitos aluviales de río Shullcas entre las cotas 3.800 y 3.450 msnm. En este sector, donde predominan las pendientes escarpadas.

D. Sector abanico aluvial.

Se hacen referencia a los depósitos aluviales del río Shullcas de los 3.450 msnm hasta la desembocadura de río Shullcas en el río Mantaro (3.200 msnm). Tanto en los sectores Acopalca, Vertiente montañosa y abanico aluvial se han observado los tres niveles de terrazas. El análisis textural de los depósitos de éstas revela que las fases más predominantes son los aluviones, lo que permite inferir que el relleno de éstas geoformas están conformadas principalmente por depósitos de este tipo.

La contabilización tentativa del número de aluviones ocurridos en la subcuenca del río Shullcas durante el proceso de relleno de las terrazas, sedimentológicas entre los depósitos de aluvión de las terrazas sugieren que los flujos fueron de mayores proporciones que los más antiguos, esto probablemente se debería a que durante la formación de T3 y T2 había una mayor disponibilidad de agua que era proporcionada por el glaciar.

Tabla 4. 2: Contabilización de aluviones en la subcuenca del río Shullcas (OCAMPO Y GOMEZ 2011).

Sector	Acopalca	Vertiente Empinada	Abanico aluvial
Terraza T3	6	4	5
Terraza T2	5	3	4
Terraza T1	3	1	2

4.4. HIDROLÓGICAS

La precipitación varía de 500 a 1000 mm anuales. La biotemperatura media anual es de 12.9° C y la media anual mínima de 5.59 °C. El clima varía desde Huancayo hasta las faldas de los nevados del Huaytapallana desde un clima frío húmedo y temperado hasta un clima glacial. (M. Sc. CONCHA FLORES 2011).

4.4.1. HIDROGRAFÍA.

Según su hidrografía la Subcuenca Shullcas, pertenece a la vertiente del Atlántico, cuenca del río Mantaro. Su curso principal de estudio es tributario por la margen izquierda del río Mantaro; presenta una extensión de 18030.33 Ha. La Subcuenca, está formada por el área de drenaje del río Shullcas, entre el tramo comprendido entre su nacimiento en los 5550 msnm y su punto de estudio en el Vilcacoto a los 3478 msnm con una pendiente media de 15.89%. (Tabla 4.3).

Tabla 4. 3: Características de las lagunas (ANA 1997).

LAGUNA	ALTITUD (msnm)	AREA (km2)	UBICACIÓN (Provincia)
Huacracochoa	4424	4.4	Huancayo
Yanacochoa	4541	SD	Huancayo
Chupiscocha	4650	3.4	Huancayo
Ancapuachanan	4690	SD	Huancayo
Lazo Huantay	4650	3.10	Huancayo
Peñacochoa	4770	SD	Huancayo

4.4.2. GEOMORFOLÓGICOS.

En la tabla 4.1 se observan los parámetros geomorfológicos estimados para la Subcuenca del Shullcas. Además, a continuación, se presentan los gráficos de la curva hipsométrica, del histograma de frecuencias y el perfil longitudinal del cauce principal. Ver en el anexo (Mapa Hipsografico HP-01).

Tabla 4. 4: Cálculo de curva hipsométrica.

Cotas Intervalo (msnm)		Cota media	Área (Ha)	Área Acumulada	% del Área Total	
Menor	Mayor				Intervalo	Acumulada
5200	5550	5375	197.41	197.4	1.09	1.09
5000	5200	5100	317.98	515.4	1.76	2.86
4800	5000	4900	544.92	1060.3	3.02	5.88
4600	4800	4700	3069.97	4130.3	17.03	22.91
4400	4600	4500	6178.4	10308.7	34.27	57.17
4200	4400	4300	3557.98	13866.7	19.73	76.91
4000	4200	4100	2234.85	16101.5	12.39	89.3
3800	4000	3900	1196.24	17297.8	6.63	95.94
3600	3800	3700	584.2	17882.0	3.24	99.18
3478	3600	3539	148.39	18030.3	0.82	100

Curva Hipsométrica

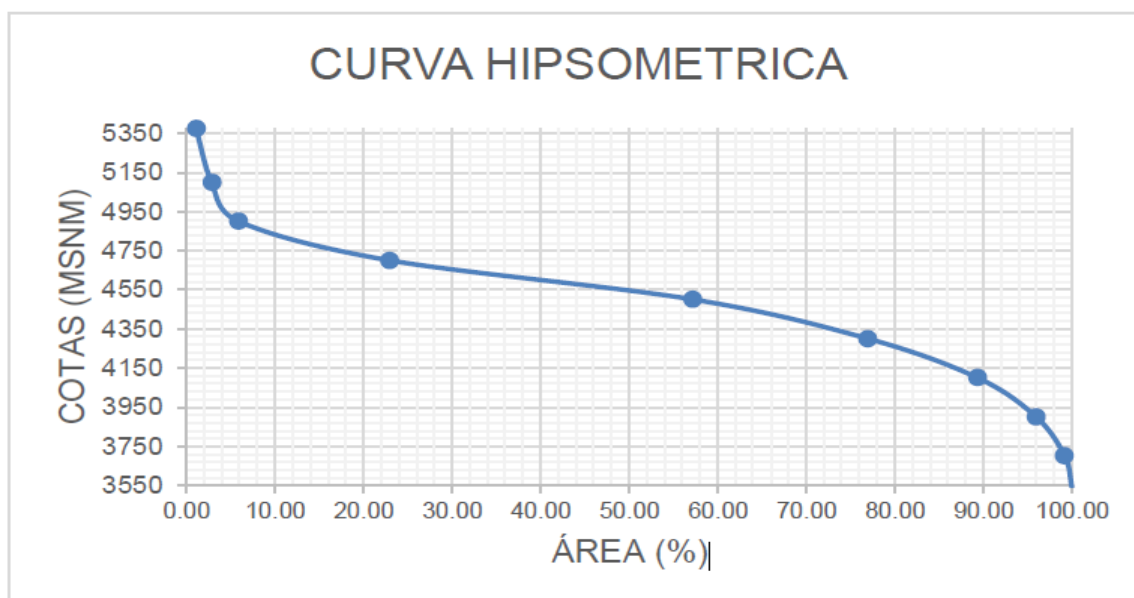


imagen 4.4: Curva hipsométrica de la de la zona de estudio (Subcuenca río Shullcas)

Histograma de frecuencias altimétricas.

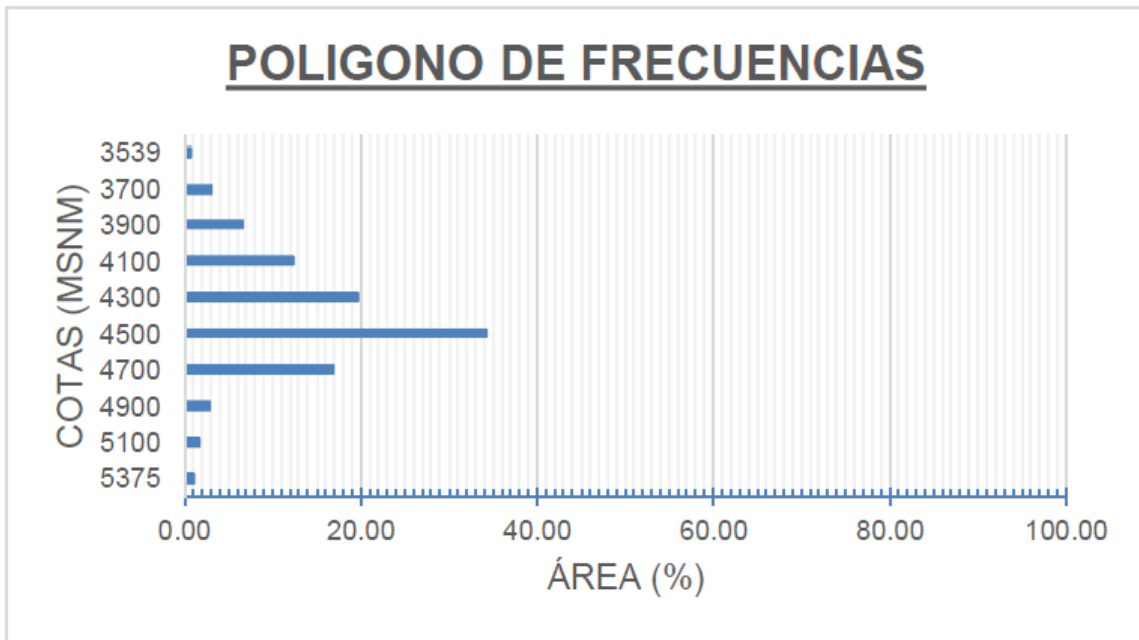


imagen 4.5: Histograma de frecuencias altimétricas de la de la zona de estudio (Subcuenca rio Shullcas).

Perfil altimétrico del cauce principal y su pendiente promedio.

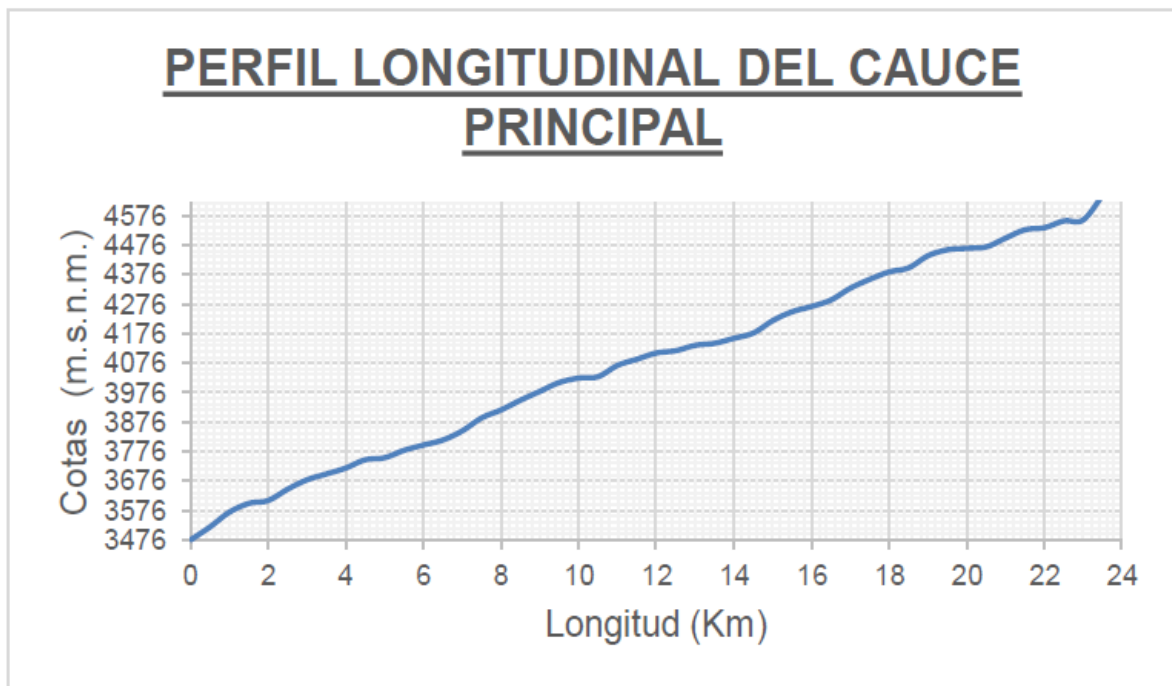


imagen 4.6: Eje longitudinal del cauce principal de la de la zona de estudio (Subcuenca rio Shullcas)

Tabla 4. 5: Cuadro resumen de las características morfológicas de la zona de estudio (Subcuenca Shullcas)

DESCRIPCION	UND	VALOR
DE LA SUPERFICIE		
Área (A)	KM2	180.303
Perímetros de la cuenca (P)	km	66.406
Centroide (WGS84 - UTM Zone 18S)		
X centroide	m	489137.7
Y centroide	m	867734.1
Z centroide	msnm	4198
ALTITUD		
Altitud media		
Altitud más frecuentes		
Altitud de frecuencia media (1/2)		
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	15.899
DE LA RED HIDRICA (ZONA DE ESTUDIO)		
Longitud del cauce principal (L)	km	23.56
Pendiente promedio de cauce principal.	%	9.7
PARAMETROS D ELA FORMA DE LA CUENCA		
Factor forma de Horton	$R_f = \frac{A}{L^2}$	0.325
Factor forma de Horton Índice de frecuencias (cuanto más cercano es a 1.0 presenta forma circular)	$I_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	1.385
Razón de Circularidad	$R_{ci} = \frac{4\pi A}{P^2}$	0.514

4.4.3. HIDROLOGÍA

4.4.3.1. PRECIPITACIONES

La única fuente de agua disponible del Río Shullcas, corresponde al agua de las altas precipitaciones de Lluvias y nevados estacionales que caen sobre la cuenca del río Shullcas. Especialmente, los módulos de precipitación varían con la altitud, a partir de 700 mm/año, que corresponde a la ciudad de Huancayo que se encuentra sobre los 3,200 msnm; hasta los 1000 mm/año que precipitan sobre los nevados de Huaytapallana, cuyas altitudes superan los 4,500 msnm, para alcanzar un máximo de 5,557 msnm.

4.4.3.2. PRECIPITACION MÁXIMA DE 24 HORAS (P24)

INRENA realizó un estudio de afianzamiento del Río Shullcas con fines agrícolas en el 2008 obteniendo isoyetas para tiempo de retorno (T_r) de 20, 50 y 100 años para la Sub cuenca Shullcas. Esta información ha sido utilizada para obtener la precipitación máxima de 24 horas correspondiente a la zona de estudio (Subcuenca Shullcas). La información pluviométrica que se utilizó en ese estudio fueron registros históricos de precipitación máxima de 24 horas, pertenecientes a las entidades SENAMHI y ELECTROANDES (MUÑIZ 2012).

En resumen, las precipitaciones máximas en 24 horas para tiempos de retorno de 20, 50 y 100 años correspondientes a la zona de estudio (Subcuenca Shullcas).

Tabla 4. 6: Precipitaciones Para Diferentes Periodos De Retorno (MUÑIZ 2012).

Tr (años)	P24 (mm)
20	44.45
50	49.88
100	53.98

4.4.4.3. PRECIPITACIÓN CONCENTRADA

Se llaman precipitación concentradas, a las 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 del Shullcas. Esta precipitación se va a estimar por medio de las precipitaciones máximas de los registros históricos en la Subcuenca Shullcas. Estas

precipitaciones máximas de 24 horas fluctúan entre los 53.98 mm como se mencionó anteriormente para un tiempo de retorno de 100 años.

Para el cálculo del hidrograma de avenida, tomaremos como precipitación máxima de 24 horas (P24) la de 53.98 mm. Con este valor máximo nos estamos dando el factor de seguridad necesario para este tipo de análisis.

4.4.4.4. CÁLCULO DEL TIEMPO DE RETARDO (Tlag).

Para dicho cálculo del tiempo de retardo, tomaremos de la Figura 2.12 (Capítulo 2). La ecuación correspondiente al valor de Kn más desfavorable, este valor corresponde a Kn igual a 0.073.

Tabla 4. 7: Calculo del tiempo de retardo para la zona de estudio (Subcuenca Shullcas)

CARACTERISTICAS	FORMULA	RESULTADO
Longitud del cauce principal	L	23.56 km (14.64 ml)
Longitud de la desembocadura al CG.	L_{ca}	10.90 km (6.77 mi)
Pendiente promedio del curso de agua	S	9.7 (512.16 pies/mil)
Factor	K_n	0.073
Tiempo de retardo	$L_n = 26K_n \left(\frac{LL_{ca}^{0.33}}{S^{0.5}} \right)$	3.09 horas

$$1 \text{ km} = 0.621371 \text{ mí}$$

4.4.4.5. DESCRIPCIÓN DEL USO DE TIERRAS Y CÁLCULO DEL NÚMERO DE CURVA (CN).

Anteriormente se han realizado estudios de uso de suelos en la Subcuenca del Shullcas. A continuación, citaremos 2 fuentes para el cálculo del número de curva (CN). Asignando un tipo de suelo hidrológico "B" (característico para la Subcuenca del Shullcas tabla 2.4 (ANA 1997).

Tabla 4. 8: Calculo del número de curva (CN) en función al grupo hidrológico.

COBERTURA VEGETAL	GRUPO HIDROLOGICO	AREA (Ha) (1)	% USO DE SUELO (2)	CN (1)x(2)
Bofedal	61	1152.5	6.39	3.9
Pajonal	79	10796.3	59.88	47.3
Herbazal de Tundra	79	2501.1	13.87	10.96
Césped de Puna	79	1445.6	8.02	6.33
Sin Vegetación	66	347.8	1.93	1.27
Cultivo	71	513.8	2.85	2.02
Matorral Húmedo	55	291.7	1.62	0.89
Pasto Cultivado	81	20.4	0.11	0.09
Plantación Forestal	55	99.6	0.55	0.3
Caso calculado		CN=		73.00
caso desfavorable		CN=		75.00
Factor		0.073		
Tiempo de retardo		3.09 horas		

En el cálculo del hidrograma líquido se empleará el valor del número de curva (CN) igual a 73, y la denominamos “curva calculada”. Otro cálculo que realizar es considerando la situación más desfavorable con un valor de CN igual a 75, a esta curva la denominamos “curva extrema”. Hacemos nota que el valor de CN igual a 75 corresponde a la zona de estudio (Subcuenca Shullcas).

4.4.4.6. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING.

Para el cálculo del coeficiente de rugosidad de Manning en la zona de estudio anexo Vilcacoto, se utilizó las tablas elaboradas por (VENTE CHOW, Hidráulica De Canales Abiertos 1994) comparado con una foto satelital landsat7 y visitas a campo para calibrar los datos mostrados (Ver Mapa coeficientes de Manning CM-01). Los valores de rugosidad que se utilizaron en la zona de estudio se pueden apreciar en el siguiente cuadro elaborado.

Tabla 4. 9: Coeficientes de Manning.

COEFICIENTES DE MANNING	
<u>DESCRIPCION</u>	n
Canal revestido	
cemento / mortero	0.015
recubrimiento vegetal	0.5
<u>CORRIENTES MONTAÑOSAS, SIN VEGETACION</u>	
<u>EN EL RIO BANDAS USUALMENTE EMPINADAS,</u>	
<u>ARBOLES Y MOTORRALES</u>	

fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.05
fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.07
<u>PLANICIES DE INUNDACION</u>	
a) Pastizales, sin Matorrales	
Pastos cortos	0.035
pastos alto	0.05
b) Áreas cultivadas	
sin cultivo	0.04
campos cultivados	0.05
c) Matorrales	
matorrales dispersos, mucha maleza	0.07
poco matorrales y arboles	0.065

4.4.4.7. HIDROGRAMA DE AVENIDA LÍQUIDO (INFLOW).

Para el cálculo de hidrograma de avenida, utilizaremos como apoyo 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. Además, el ingreso de datos es sencillo y muy fácil de interpretar.

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. Además, se utilizará tormentas hipotéticas para 24 horas provenientes de investigaciones en los Estados Unidos.

Cálculo del hidrograma líquido para CN=73 (**Q pico=55.40 m3/s**):

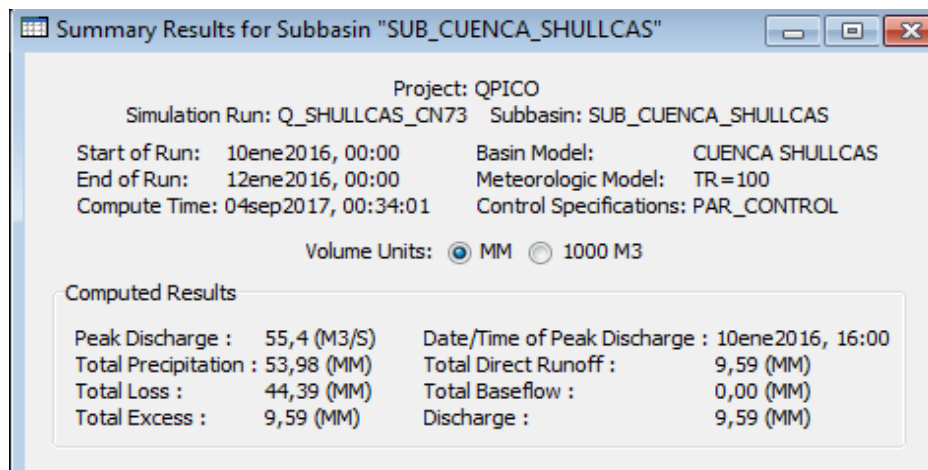


imagen 4.7: Resultados Del Hidrograma Obtenido Con El Hec - Hms, (CN=73).

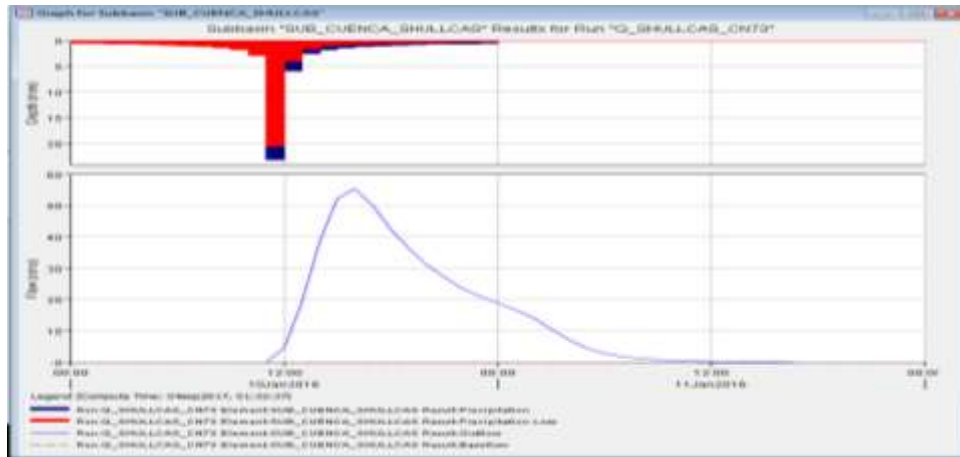


imagen 4.8: Hietograma E Hidrograma Obtenido Con El Hec-Hms, (CN=73).

Cálculo del hidrograma líquido para CN=75, caso extremo (**Qpico=66.90 m3/s**):

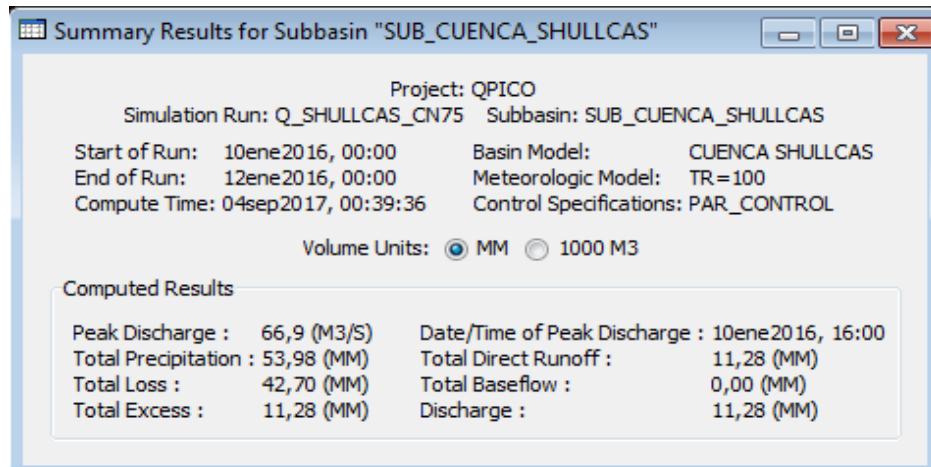


imagen 4.9: Resultados Del Hidrograma Obtenido Con El Hec-Hms, (CN=75).

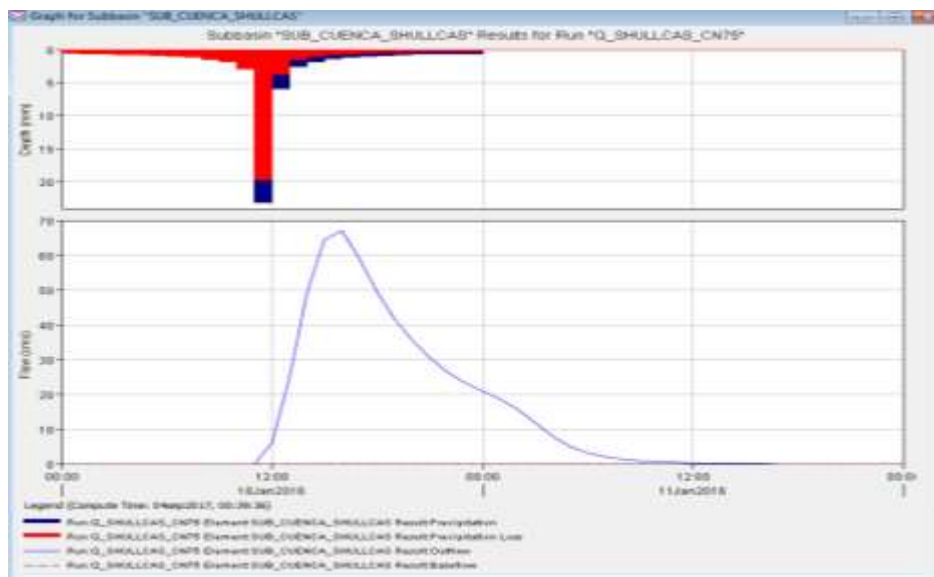


imagen 4.10: Hietograma E Hidrograma Obtenido Con El Hec-Hms, (CN=75).

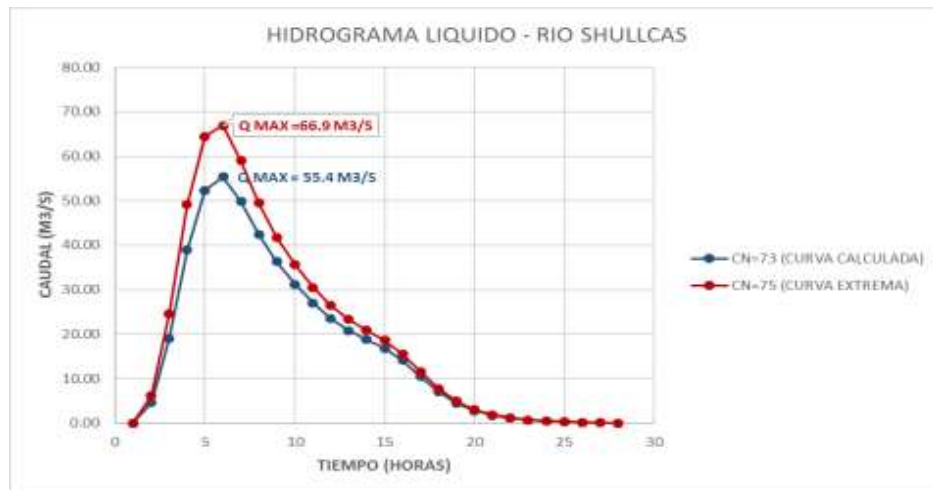


imagen 4.11: Hidrograma liquido Obtenido Con El Hec -Hms para CN=73-75.

4.4.4. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEODINÁMICA

4.4.4.1. GEOLÓGIA.

Según el estudio de (IGP 2011) se basa en el periodo Cuaternario, el más reciente y en el que ocurrieron procesos geológicos que configuraron el relieve actual de la sub cuenca. Dicho periodo comprende aproximadamente los últimos 2,5 millones de años, en él ocurrieron una serie ciclos climáticos conocidos como periodos glaciares (periodos fríos donde tuvo lugar una mayor extensión de los glaciares) e interglaciares (periodos cálidos y de desglaciación).

Los materiales que fueron depositados durante el periodo Cuaternario están compuestos en su mayoría depósitos no consolidados. Según el agente geológico (hielo, agua, etc.) que los formó estos depósitos se clasifican principalmente en: depósitos glaciares, aluviales, coluviales.

La configuración topográfica se denominan geoformas como, por ejemplo; morrenas (acumulaciones dejadas por el avance glaciario) y terrazas y abanicos (acumulaciones aluviales en el fondo de los valles que fueron depositadas por corrientes de agua).

4.4.4.2. GEODINÁMICA

De un punto de vista geodinámico es una de las Subcuencas se considera como activas, considerando que existen evidencias de fenómenos sucedidos como: flujos aluviónicos, deslizamientos antiguos y modernos, escarpas erosionales, flujos morrénicos y relictos de deslizamientos de glaciares en la cabecera de la laguna La Suntay y Chuspicocha y cárcavas en la zona de encuentro de la base del valle del Mantaro y las estribaciones del flanco oeste de

la Cordillera Oriental.

Evidentemente como elementos geodinámicos activos se halla la actividad glaciaria muy próximos a la falla del Huaytapallana, que ha determinado una atención preferencial para controlar los volúmenes fósiles de las lagunas existentes al pie de la cordillera cubierta por este material; luego se tiene los deslizamientos de tierra ubicados en la zona intermedia de la cuenca (Norte de la hacienda Acopalca), y finalmente la zona de cárcavas por erosión de suelos residuales ubicados en la cabecera de la ciudad de Huancayo.

4.4.4.2.1. VULNERABILIDAD DE LAS TIERRAS.

El modelo representa los diferentes grados de capacidad de resistencia del ecosistema a los procesos geodinámicos naturales o a aquellos inducidos por las actividades del hombre. Tales como: estabilidad geológica, tipos de cobertura, grado de inclinación del terreno (pendiente), condiciones climáticas, y el factor antrópico, uso de la tierra. Su determinación es importante porque brinda información inherente a la conservación de suelos, riesgos económicos de producción, seguridad física de las poblaciones, construcción y conservación de la infraestructura hidráulica y vías de comunicación. La vulnerabilidad es calificada en sus distintos grados, presentándose como áreas de riesgo morfo dinámico o vulnerables, para el aprovechamiento y protección de los Recursos Naturales en (Ver Mapa Vulnerabilidad V-01).

1) Tierras Con Muy Bajo Riesgo.

Este tipo de tierras permite realizar algunas actividades de desarrollo, sin deterioro de su capacidad productiva. Se encuentran entre los 3200 y 4800 msnm. Como también geológicamente son estables en terrenos con cierta pendiente, la vulnerabilidad es atenuada por la cobertura vegetal que protege el suelo del efecto erosivo de la lluvia. Abarcan una superficie aproximada de 14.9 ha, que representa el 0.06% del área de la Subcuenca.

2) Tierras Con Bajo Riesgo.

Agrupar tierras, que por sus características físicas (litología, pendiente) ecológicas y de uso, presentan ciertas limitaciones de uso de su capacidad productiva. Se distribuyen en forma localizada entre los 3 200 y 5 500 msnm. Geológicamente son estables; la vulnerabilidad es atenuada por la cobertura vegetal. Generalmente la estabilidad de estas tierras es alterada por la actividad agrícola. Abarcan una superficie aproximada de 992.7 ha, que representa el

4.27% del área de la Subcuenca.

3) Tierras con Moderado Riesgo.

Agrupación de tierras caracterizadas por la presencia de un relieve escarpado; se encuentran en forma localizada entre los 3 280 y 4 650 msnm. La estabilidad geológica es alterada, por presentar procesos morfodinámicos (surcos, cárcavas, deslizamientos) activos. El uso de estas tierras en la actividad agrícola está supeditada al uso de prácticas de conservación de suelos, como terrazas de absorción o agroforestería; asimismo, en las zonas de protección, se deberá evitar el pastoreo, con el fin de recuperar la cubierta natural de arbustos perennifolios o semi - caducifolios. Abarcan una superficie aproximada de 81655.0 ha, que representa el 35.14 % del área de la Subcuenca.

4) Tierras con Alto Riesgo.

Agrupación de tierras, que presentan deterioro y degradación de suelos, se caracterizan por presentar un relieve fuertemente escarpado, con pendientes empinadas; se encuentran entre los 3 380 y 4 180 msnm. Geológicamente son consideradas muy inestables; y se encuentran generalmente cubiertos por una vegetación natural tipo matorral caducifolio. El pastoreo temporal altera la estabilidad del área haciéndolas altamente vulnerables por la erosión hídrica. Su uso no es económico y deben ser manejados con fines de protección de cuencas. Abarcan una superficie aproximada de 11311.6 ha, que representa el 48.68% del área de la Subcuenca el anexo de Vilcacoto se encuentra en esta zona de vulnerabilidad.

4.4.5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS

4.4.5.1. MECÁNICA DE SUELOS Y MEDICIONES DE CAMPO.

a. Análisis Granulométrico completo y Límites de Consistencia.

Se tomó una muestra representativa del estrato atravesado en dichas calicatas y en cantidad suficiente como para realizar los ensayos de identificación y clasificación del terreno. Paralelamente al muestreo se realizaron los registros de exploración, en los que se indican las diferentes características de los estratos subyacentes, tales como tipo de suelo, espesor del estrato, color, humedad, plasticidad, compacidad, etc. Los cuales las calicatas (CAL-01 y CAL-02), los cuales fueron tomados en el cauce principal y en el abanico fluvial (CL-03).

Con estas muestras se han realizado análisis granulométrico y determinación de los límites de Atterberg, estos resultados indican muestras de baja plasticidad en

arenas y gravas con baja plasticidad variando de SC (arena arcillosa con grava) a GP (gravas pobremente graduada con arena) en el esquema de clasificación de suelo unificado (SUCS). Se obtuvieron los siguientes resultados (hacemos referencia que la granulometría convencional está basado en material menor a las 3")

Tabal 4.9 Resultados de límite de consistencia – ASTM D4318

CALICATA	MUESTRA	PROFUNDIDAD	GRANULOMETRIA			LIMITES (%)		INDICE DE PLASTICIDAD	C.H. (%)
			GRAVA	ARENA	FINOS	L.L.	L.P.		
CAL-01	M-1	1.50	30.34	39.40	30.26	33.70	25.00	8.70	18.50
CAL-02	M-1	1.50	68.39	31.36	0.25	26.00	24.20	1.80	24.00
CAL -03	M-1	1.50	35.57	44.79	19.64	31.60	19.00	12.60	15.23

Tabla 4. 10: resumen de resultados de la granulometría – ASTM D422.

MUESTRA	DIAMETRO (d)		LIMITES DE CONSISTENCIA			SUCS
	3" < d < No 200	d < No 200	% LL	% LP	% IP	
CL - 01	2.2 %	30.3%	33.70%	25.00%	8.70%	SC
CL- 02	2.8 %	0.2%	26.00%	24.20%	1.8%	GP
CL - 03	6.8%	19.6%	31.14%	19.00%	12.60%	SC

Para mayor detalle de las pruebas de laboratorio ver el ANEXO A. y (Ver mapa de sondeo para estudio de mecánica de suelos).

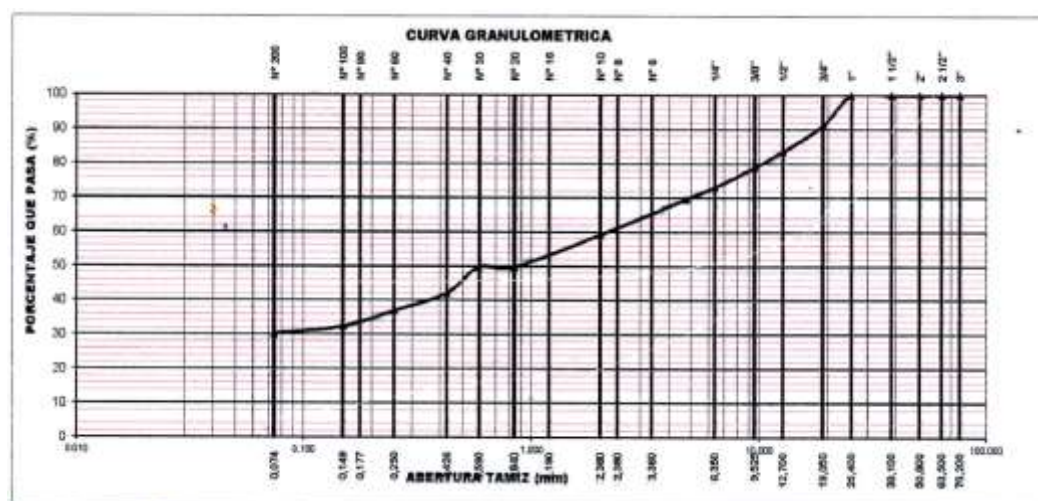


imagen 4. 12: Resultado de la Granulometría de las muestras extraídas. CAL-01.

Descripción de perfil estratigráfico CAL -01, contiene una primera capa de 0.30 m, de nivel freático de agua superficial que transcurre por el cauce de rio, una segunda capa de 1.20 m. de (arena arcillosa con grava) color marrón, estado húmedo, tamaño máximo de grava de ¾” consistencia firme, estructura homogénea, plasticidad baja, cimentación débil, gravas subangulosas, subredondeadas y redondeadas, se concluye en suelo mal graduada con granulometría discontinua.

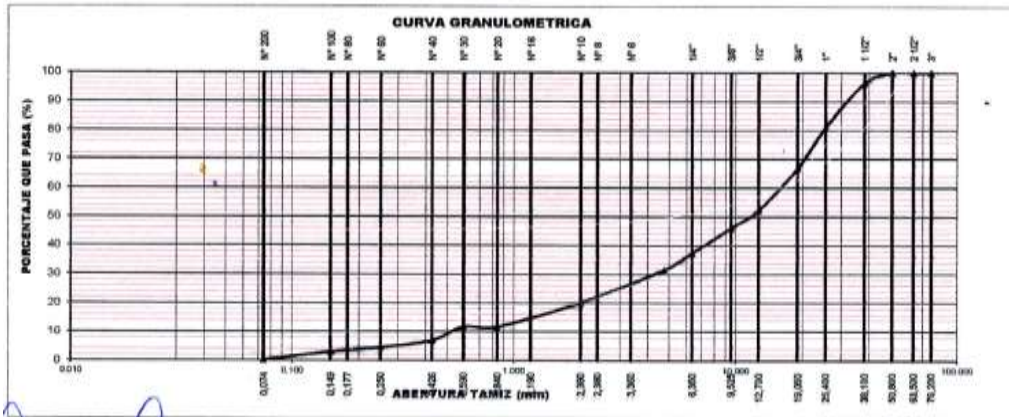


imagen 4.13: Resultado de la Granulometría de las muestras extraídas. CAL-02

Descripción del perfil estratigráfico CAL -02, contiene una primera capa de 0.40 m de nivel freático de agua superficial que transcurre por el cauce de rio, una segunda capa de 1.10 m, de (grava pobremente graduada con arena), color marrón cimentación baja, resistencia baja, consistencia suave, plasticidad baja, estado húmedo con la forma de la grava subredondeadas y redondeadas, chatas y alargadas de 1 ½” de tamaño máximo.

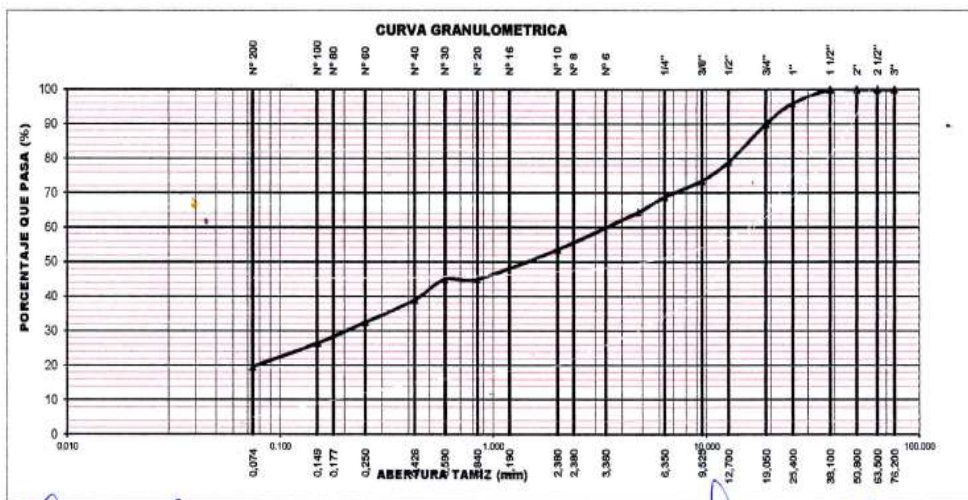


imagen 4. 141: Resultado de la Granulometría de las muestras extraídas. CAL-03

Descripción granulométrica de la CAL-03, contiene una primera capa de 0.35 m, de nivel freático de agua superficial que transcurre por el cauce de río una segunda capa de 1.15 m. de (arena arcilla con grava) color marrón estado húmedo, tamaño máximo de grava 1” de consistencia firme estructura homogénea, plasticidad baja cimentación débil, gravas subangulosas, subredondeadas. Suelo mal graduado con granulometría discontinua.

De la tabla 4.12 las muestras presentan una baja plasticidad. Además, por conocimientos de mecánica de suelos los límites de consistencia con Límites Líquidos (LL) menores a 50 y con un Índice Plástico (IP) mayor a 5 en el caso de las calicatas (CL-01 y CL-03), que según el esquema de clasificación de suelo unificado (SUCS) es SC (limos, arcilla, limos finos). El material fino se caracteriza por poseer arcillas. Por lo tanto, se reafirma la suposición del alto contenido de arcilla dentro del material fino. Además, en el caso de la calicata (CL-02), que según el esquema de clasificación de suelo unificado (SUCS) es GP (grava pobremente graduada) que fue extraído del abanico aluvial posee una cantidad mínima de finos con el cual el contenido de arcilla es mínimo. Además de la tabla 4.10 se obtiene como promedio un LL de 26.00 % y IP de 1.8 %.

El índice de plasticidad para las matrices de sedimentos del flujo de escombros que son mayores al 5% en caso de las calicatas CL-01 Y CL-03, se colocan dentro de la clasificación de **flujos de lodo o mudflow** (Hungry, 2001).

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 ensayo de materiales en: “GEOVICON”

A continuación, mostramos los resultados del contenido de humedad y gravedad específica de las diferentes muestras:

Tabla 4. 11: Contenido de Humedad - ASTM D2215.

MUESTRA	CL - 01	CL - 02	CL - 03
RESULTADO	15.23 %	18.50%	24.00%

Tabla 4. 12: Peso Específico Relativo de Sólidos - ASTM D854

MUESTRA	CL - 01	CL - 02	CL - 03
RESULTADO	3.01 %	2.55%	2.61%

Para mayor detalle de las pruebas de laboratorio ver el ANEXO A. (Ver mapa de sondeo para estudio de mecánica de suelos).

4.5. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMATICO

Una vez conocido las características principales de la quebrada y el tipo de flujo que discurre por ella, procedemos al ingreso de datos en el software IBER V 2.4.2.

4.5.1. INFORMACIÓN BÁSICA

Se recopilaron fotografías satelitales Landsat7, topografía digital, planos topográficos, hidrogramas de caudal líquido y estudios previos, y se procesaron para la obtención de la información básica necesaria para el desarrollo del presente estudio.

a. Fotografía Satelital

Para el estudio de la cuenca del río Shullcas se obtuvieron las fotos satelitales Landsat7 gratuitas de la página web <http://reverb.echo.nasa.gov> con una resolución espacial de 1.00m x 1.00m Georreferenciadas en el sistema de proyección UTM 18S y Datum WGS1984.

b. Planos Topográficos.

Se obtuvieron las cartas nacionales vectorizadas y en formato raster de la cuenca del río Shullcas escala 1:25,000 gratuitas de la página web <http://escale.minedu.gob.pe>. Sobre esta base topográfica se delimitó la cuenca del río Shullcas, mediante software de procesamiento SIG (Sistema de Información Geográfica) se determinó los parámetros morfo métricos de la cuenca 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 30m x 30m, procesadas en ERDAS Image 2010.

Un plano a mayor detalle se procedió a realiza el levantamiento topográfico con estación total TOPCOM de 1+000 Km de longitud que abarca toda la zona de estudio con curvas de nivel cada 0.50m para mayor precisión en la elaboración del modelo hidráulico.

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 DEM) de resolución por pixel de 30m x 30m y procesadas con GIS. Georreferenciadas en el sistema de proyección UTM 18S y Datum WGS1984.

c. Hidrología.

Se obtuvieron los hidrogramas de caudal líquido para la precipitación de celda concentrada (P24=53.98mm) correspondientes al valor máximo de precipitación para un tiempo de retorno de 100 años dentro de la cuenca del Río Shullcas. Además, se analizarán 2 escenarios para un CN=73 (curva calculada) y para un CN=75 (curva extrema). En la Figura 4.4 y Figura 4.6. se indican los caudales máximos para e ambos escenarios.

Tabla 4. 13: Caudales Máximos - Río Shullcas.

Quebrada	Caudales Máximos (m3/seg)	
	CN = 73	CN=75
Río Shullcas	55.4	66.9

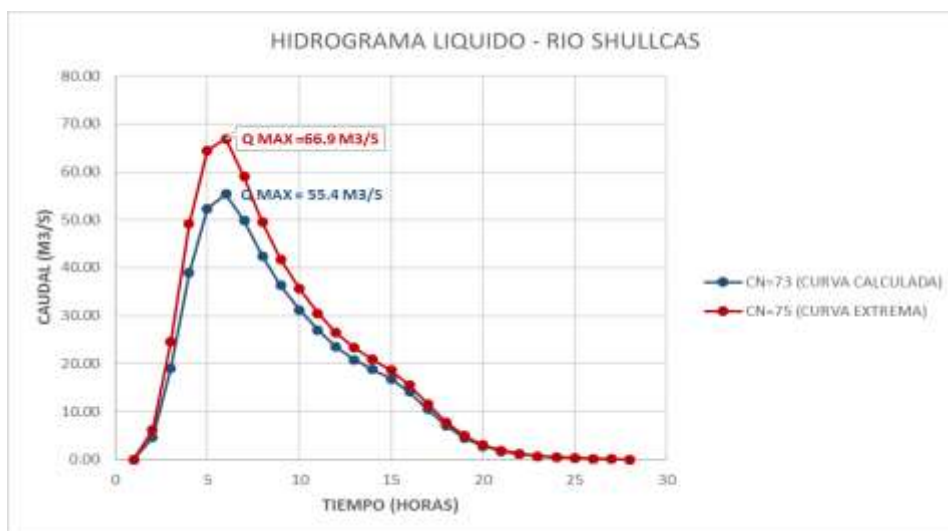


imagen 4. 26: Hidrograma líquido - Río Shullcas.

c. Fotografías de campo.

Se realizaron diversas fotografías de campo, para el desarrollo de la presente tesis. Para Validación y calibración de modelo hidráulicos IBER V 2.4.2. En el Anexo. se presenta el Panel Fotográfico de la cuenca de Shullcas (Zona De Estudio) con una breve descripción de cada fotografía.

4.5.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN CON EL IBER V 2.4.2

Como primero paso, es insertar la imagen georreferenciada, para luego crear la geometría del área en estudio. Luego se crean superficies en función al tipo de suelo (04 tipos), para luego asignar los valores de rugosidades a cada superficie. Luego se generan las mallas para cada superficie. A través de un Modelo de Elevación de Terreno (DEM), también se asignan las condiciones de contorno para el ingreso hidrógrafa de entrada (INFLOW) en la grilla correspondiente. Además, en la parte baja de la quebrada, se definen las grillas que son salidas de flujo (OUTFLOW). Finalmente se ingresan los datos del problema como son el tiempo de simulación, así como el valor de cada intervalo, para luego realizar el cálculo y ver los resultados en el pos proceso.

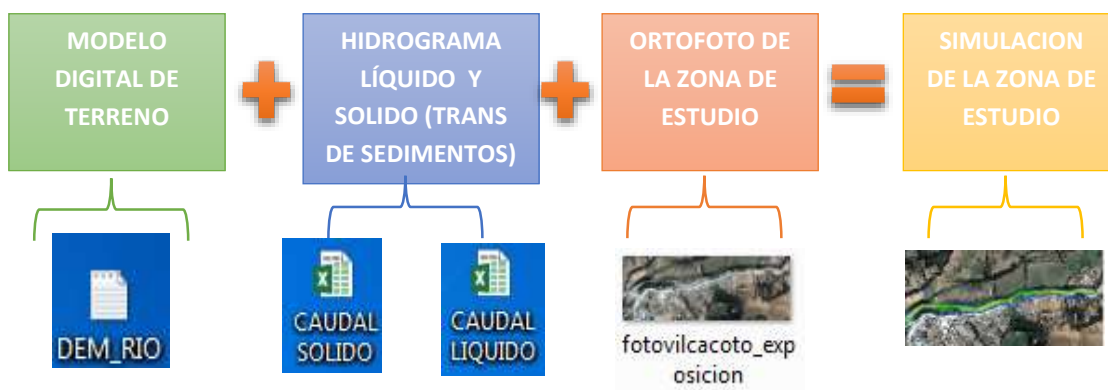


figura 4.17: Diagrama de flujo utilizado en el programa IBER V 2.4.2.

Para la modelación de un flujo con el programa IBER V 2.4.2. se requiere archivos en diferentes formatos los cuales son los siguientes, con una breve explicación de cada uno de ellos:

- GEOMETRIA.DXF; Que sirve para la creación de la malla de cálculo donde se asignaran valores de coeficientes de rugosidad, caudales de entrada y salida, etc.
- IMAGEN.PRJ; Es la imagen georreferenciada para poder visualizar de manera más clara, las áreas a intervenir, así como las áreas de inundación, entre otros.
- TOPOGRAFIA.DEM; Es un modelo digital de las elevaciones, que es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

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 para la quebrada respectiva.

Finalmente, los resultados son graficados y visualizados en el post-procesadores el post - proceso en la ventana de resultados y visualización. Los resultados obtenidos por el programa son las elevaciones del terreno, tirantes, velocidades, hidrogramas y sedimento del flujo.

4.6. DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Se realizó el levantamiento topográfico con estación total TOPCOM de 800+00 ml de longitud que abarca toda la zona de estudio con curvas de nivel cada 0.25m para mayor precisión en la elaboración del modelo hidráulico.

El plano topográfico base para un primer análisis y sensibilidad del programa será el plano digitalizado del levantamiento topográfico con estación total TOPCOM de 800+00 ml de longitud que abarca toda la zona de estudio con curvas de nivel cada 0.25m para mayor precisión en la elaboración del modelo hidráulico.

Sobre el plano mencionado se generó una malla de 17047 celdas de 1 m x 1 m en el cauce del río y 4 m x 4 m en el resto del área de análisis, cubriendo parte de toda la zona de estudio propenso al área vulnerable de inundación. Además se define la grilla en donde se ingresar el hidrograma de entrada (INFLOW) y las grillas de flujo de salida (OUTFLOW) (ver figura 4.11)



imagen 4.18: Malla de grillas. Rio Shullcas (Vilcacoto).

Para un modelamiento de flujos de escombros con el software IBER V 2.4.2, es necesario obtener la topografía, el hidrograma líquido + sólido, las propiedades del sedimento, y los parámetros reológicos. Los parámetros característicos del sedimento se fijaron de acuerdo con la experiencia en otros países, donde se han calibrado con cuencas experimentales.

Las siguientes características (parámetros de entrada) son empleadas para la Simulación:

Se aplicó el modelo bidimensional IBER V 2.4.2 para la simulación del flujo hiperconcentrado de barro y escombros, utilizando las ecuaciones que gobiernan el movimiento en su expresión más completa.

El modelo considera el fluido homogéneo (una sola fase) de concentración variable; esto significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento.

Para un evento de flujo de escombros, se estima como primera aproximación una distribución de C_v en el tiempo partiendo de un valor cercano a 0.22 y aumentando gradualmente hasta 0.35 ó 0.45 dependiendo del tipo de sedimento de la cuenca. El pico de C_v debe ubicarse unos minutos antes del pico del hidrograma líquido. Esta metodología descrita es una práctica común en estos trabajos.

El hidrograma de caudal líquido con la respectiva concentración volumétrica de sedimento se coloca como condición de inicial en la línea 01 donde la quebrada alcanza la cota 3480.35 m.s.n.m.

Se estableció la rugosidad "n" de Manning de 0.050 en el cauce del río, 0.05 en cultivos, 0.035 en cobertura de terreno natural y en bosques el valor de 0.065. Para la elaboración del modelo hidráulico.

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 Aspen, son que poseen gran cantidad de arcilla; por ejemplo, la Aspen Pit1 alcanza un Índice Plástico (IP) de 11, clasificándose como de alta plasticidad. Por lo tanto las ecuaciones utilizadas para el modelo son (O'Brien & Julien, 1988):

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C v} \quad (4.1)$$

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_2 C v} \quad (4.2)$$

- La gravedad específica del sedimento es igual 2.63 (valor máximo del estudio de mecánica de suelos de las muestras extraídas de campo)
- Se asume una resistencia de la planicie al flujo laminar igual 2285 (empleado en otros estudios de flujos de escombros).
- El tiempo de simulación es de 16.75 horas en intervalos de 15 minutos.

CAPITULO V

5.1. PRESENTACION DE RESULTADOS

5.1.1. ESCENARIOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizará el análisis de 2 escenarios enfocados únicamente en el cauce del río Shullcas; para los hidrogramas líquidos con números de curvas de 73 (curva calculada) y 75 (curva extrema). Además de considerar la concentración de sedimentos volumétrica (C_v) inicial será variable de 22% a 35%. (realizadas en Visitas in-situ a la zona de estudio además de la observación de la deposición de sedimentos en el cauce del río).

El resto de los parámetros para la entrada de la modelación fueron las mencionadas anteriormente en el ítem 4.6 del capítulo IV.

También, además de mencionado en los párrafos anteriores, se realizó el estudio topográfico con estación total marca TOPCOM en una longitud de 800 metros de longitud el cual comprende la zona de estudio con curvas de nivel cada 0.25 m para la elaboración de un modelo hidráulico de precisión, estos datos fueron Georeferenciadas en el sistema de proyección UTM 18S y Datum WGS1984.

5.1.2. Análisis para $Q_{max} = 55.40 \text{ m}^3/\text{s}$ (CN=73 – CURVA CALCULADA)

Se realizara el análisis de una avenida, de un caudal líquido máximo de 55.40 m^3/s adicional a esto se considerara una concentración volumétrica de sedimentos (C_v) de 22 % a 30% en la rama ascendente del hidrograma y de valor máximo de 35 % en el intervalo anterior al caudal pico líquido, luego disminuye hasta un 30 %, permaneciendo constante hasta el final del hidrograma líquido, en la Figura 5.1 se muestra el hidrograma líquido + solido ($Q_p (l+s) = 72.02 \text{ m}^3/\text{s}$) en el cual se realizó la distribución de la concentración de sedimentos según lo mencionado anteriormente, utilizada como condición de

borde en el modelo.

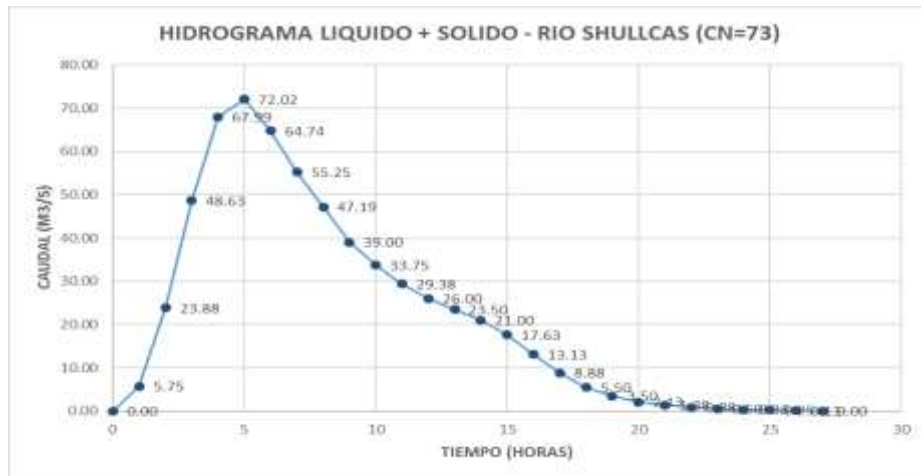


Imagen 5. 1: Hidrograma líquido + sólido. $Q_p(L+S)=72.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_v=0.22-0.35$)

Tabla 5. 1: Salida de datos del programa IBER V 2.4.2 ($Q_p(L+S)=72.02 \text{ m}^3/\text{s}$)

FLUJO (M3)	AGUA (M3)	BULKED WITH SEDIMENT (M3)
Hidrograma de entrada (Inflow)	1729440.00	474894.00

La cantidad total de volumen para la creciente simulada es de 2.20 millones de m³, de los cuales 1.7 millones de m³ corresponden al volumen líquido (agua) y 0.50 millones de m³ corresponden al volumen de los sólidos (sedimentos).

El tirante máximo en el inicio del modelo varía entre 2.3 m y 2.6 m con velocidades máximas de 4.9 m/s; y tirantes que varían entre 1.1 m y 1.3 m con velocidades de 4.5 m/s en la parte final del modelo (Figuras 5.2 y 5.3). También se ve en los resultados que para este modelo se tendrá un área de inundación de 41548.00 m² dentro del área en estudio simulada.

5.1.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=73 CURVA CALCULADA)

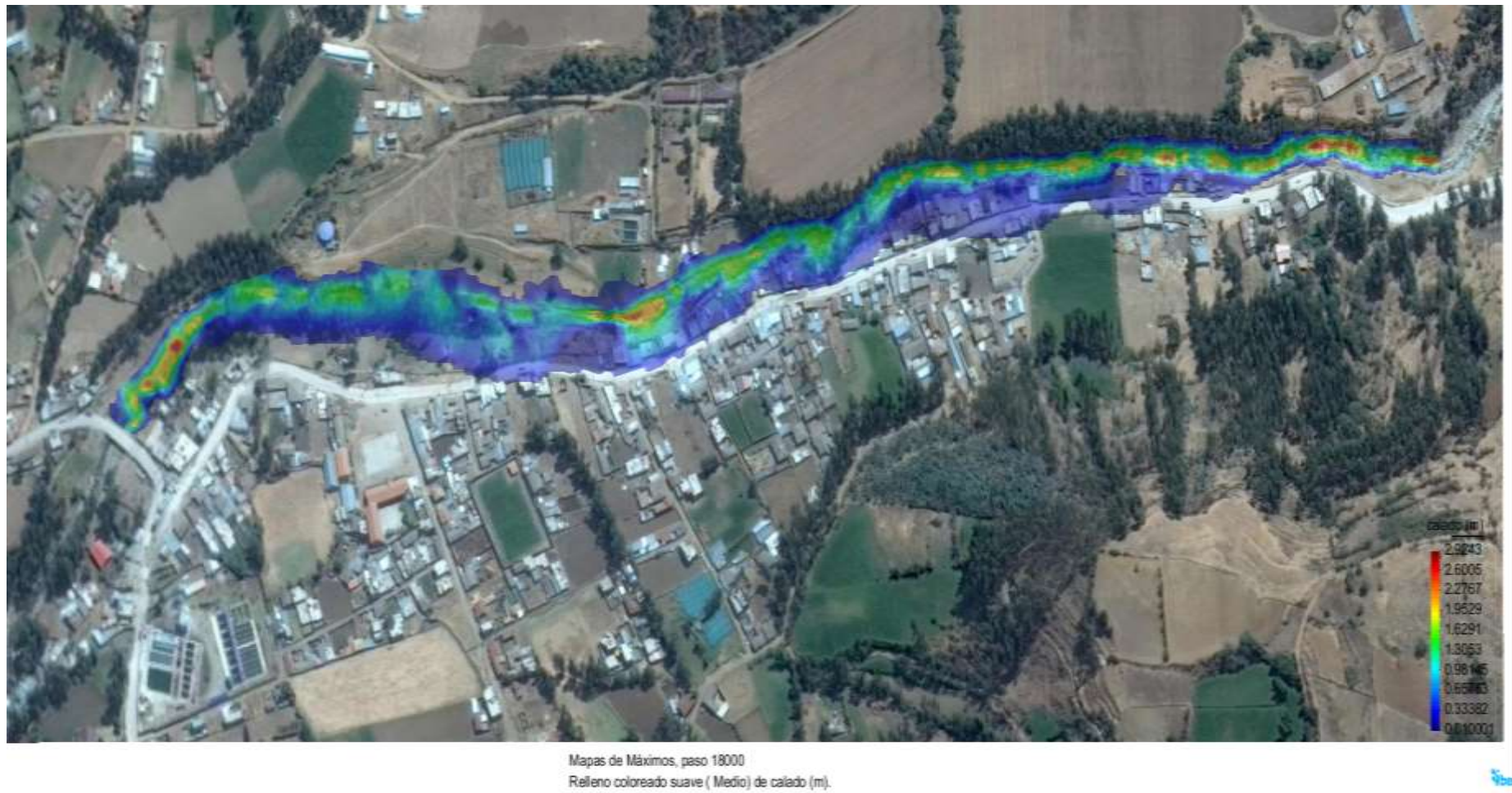
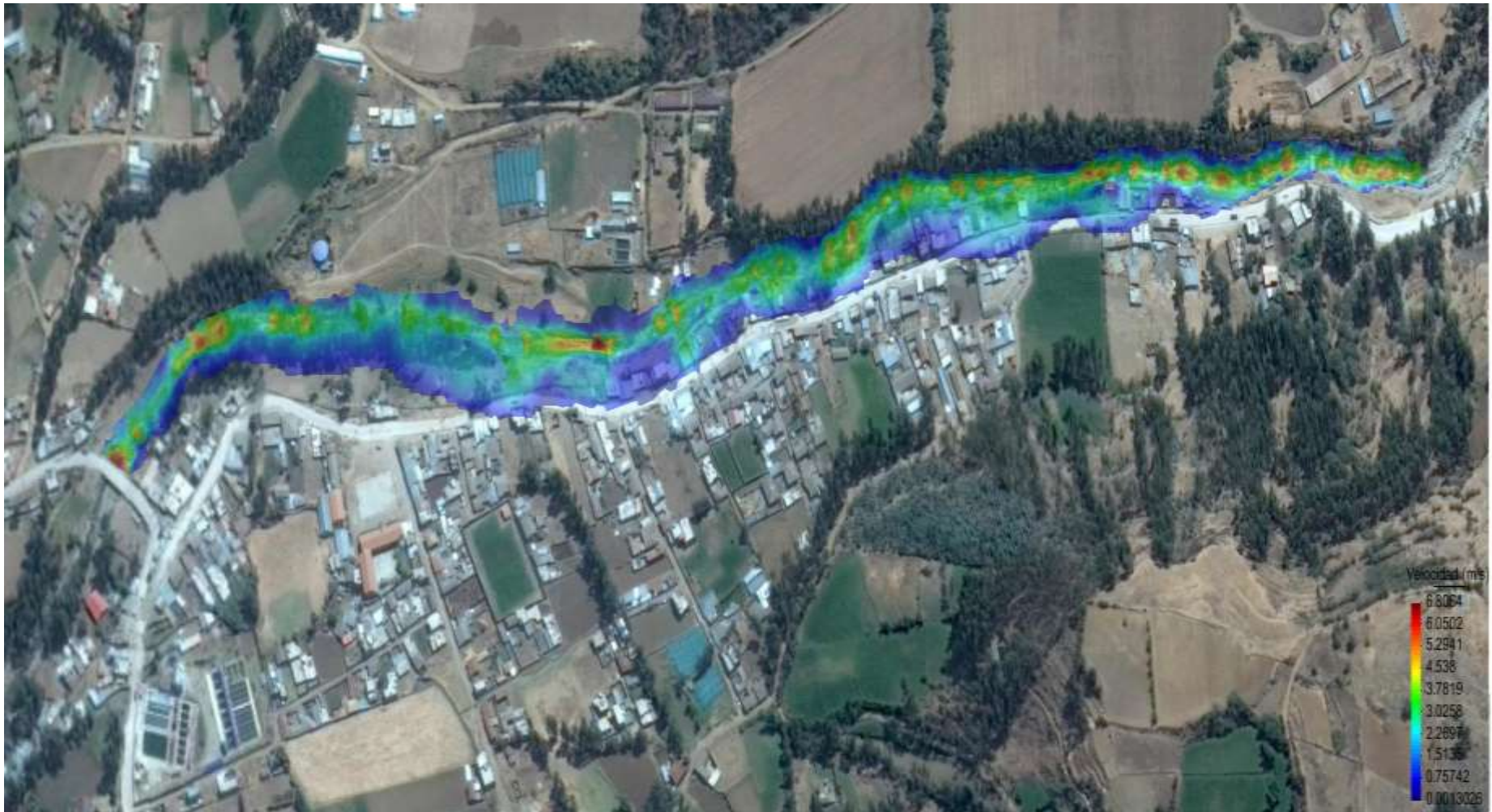


Imagen 5. 2: Tirantes máximos. $Q_p(I+s)=72.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_v=0.22-0.35$)



Mapas de Máximos, paso 18000
 Relleno coloreado suave (Medio) de Velocidad (m/s).

Imagen 5. 3: Velocidades máximas. $Q_p(I+s)=72.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_v=0.22-0.35$)

5.1.4. Análisis para Q max = 66.90 m3/s (CN=75 – CURVA EXTREMA)

Se realizara el análisis de una avenida, de un caudal líquido máximo de 66.90 m3/s adicional a esto se considerara una concentración volumétrica de sedimentos (Cv) de 22 % a 30% en la rama ascendente del hidrograma y de valor máximo de 35 % en el intervalo anterior al caudal pico líquido, luego disminuye hasta un 30 %, permaneciendo constante hasta el final del hidrograma líquido, en la Figura 5.4 se muestra el hidrograma líquido + solido (Qp(l+s)= 86.97 m3/s) en el cual se realizó la distribución de la concentración de sedimentos según lo mencionado anteriormente, utilizada como condición de borde en el modelo.

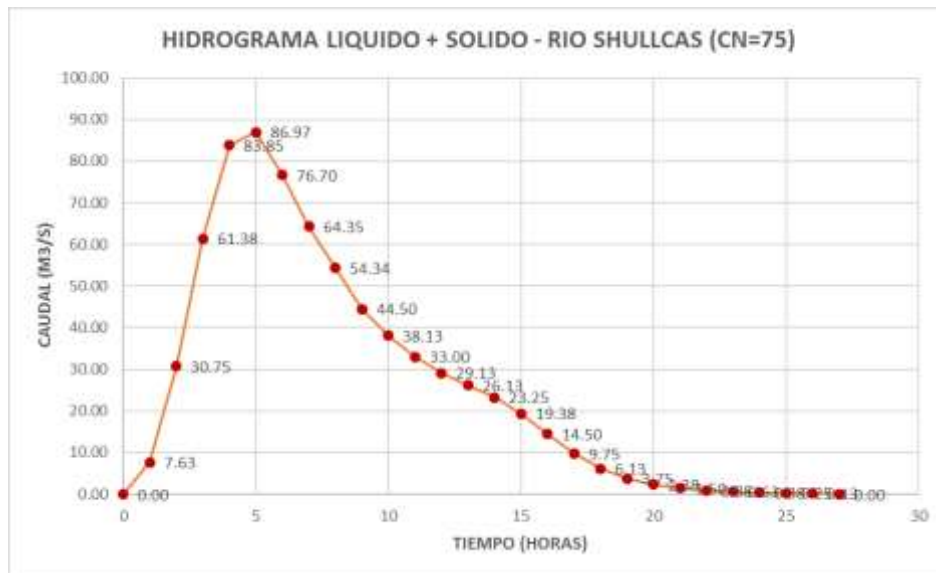


Imagen 5. 4: Hidrograma líquido y sólido. Qp (l+s) =86.97 m3/s (Cv=0.22-0.30).

Tabla 5. 2: Salida de datos del programa IBER V 2.4.2 (Qp(l+s) =86.97 m3/s).

FLUJO (M3)	AGUA (M3)	BULKED WITH SEDIMENT (M3)
Hidrograma de entrada (Inflow)	1336195.35	1894710.28

La cantidad total de volumen para la creciente simulada es de 2.59 millones de m3, de los cuales 2.1 millones de m3 corresponden al volumen liquido (agua) y 0.58 millones de m3 corresponden al volumen de los sólidos (sedimentos).

La tirante máximo en el inicio del modelo varía entre 2.7 m y 2.9 m con velocidades máximas de 5.3 m/s; y tirantes que varían entre 1.4 m y 1.7 m con velocidades de 4.8 m/s en la parte final del modelo (Figuras 5.5 y 5.6).

También se ve en los resultados que para este modelo se tendrá un área de inundación de 44582.00 m² dentro del área en estudio simulada

5.1.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=75 / CURVA EXTREMA)

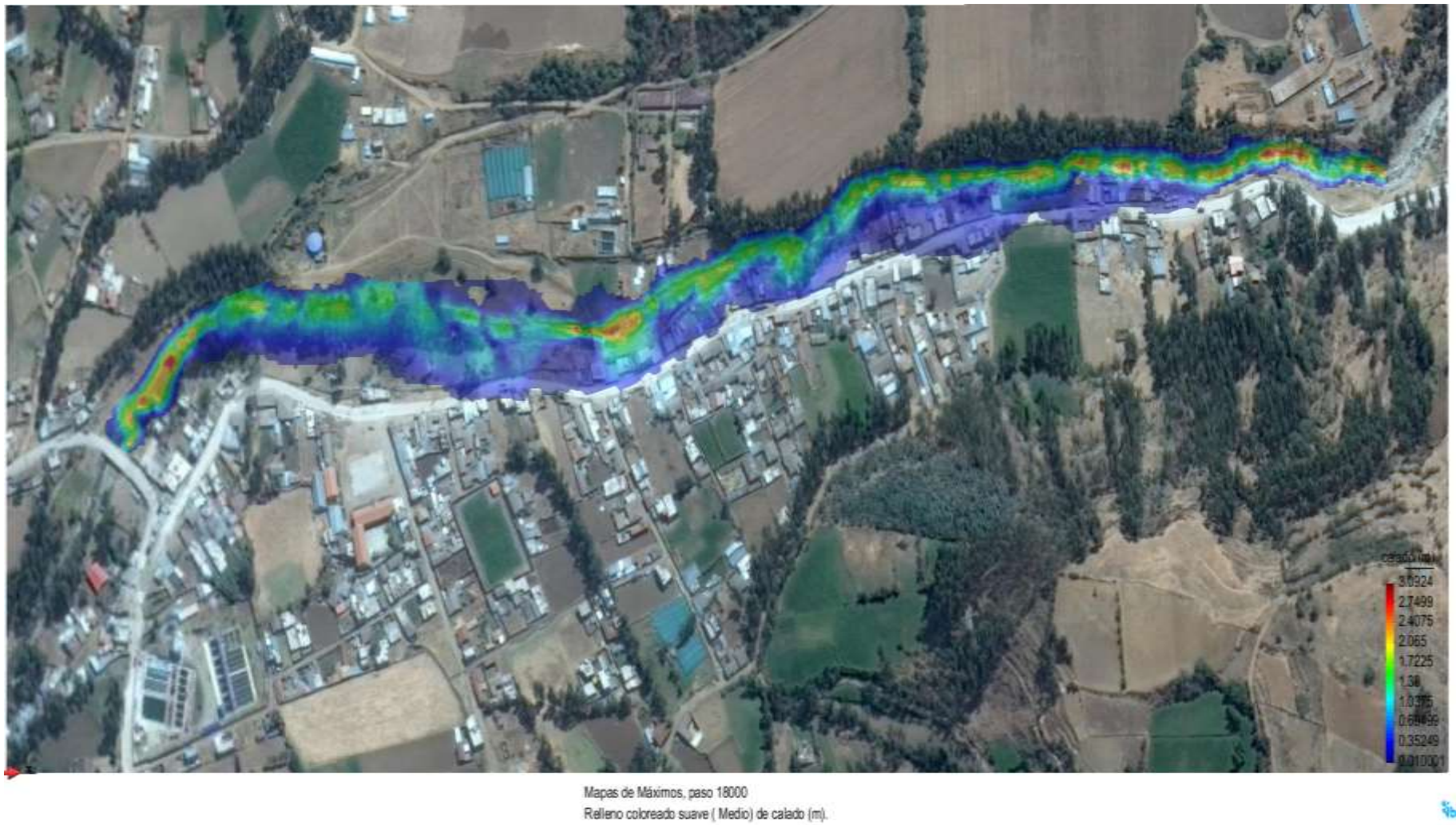


Imagen 5. 5: Tirantes máximos. $Q_p(I+s)=86.97 \text{ m}^3/\text{s}$ ($C_v=0.22-0.30$)



Mapas de Máximos, peso 18000
 Relleno coloreado suave (Medio) de Velocidad (m/s).

Imagen 5. 6: Velocidades máximas. Tirantes máximos. $Qp(l+s)=86.97 \text{ m}^3/\text{s}$ ($Cv=0.22-0.30$)

Se realizó la simulación de 02 escenarios para los caudales máximos líquidos de 55.40 m³/s (CN=73) y 66.90 m³/s (CN=75) en condiciones máximas además de considerar la concentración volumétrica de sólidos (sedimentos), que variaron desde el 30 % hasta el 34%.

Para el caso del primer escenario se pueden observar tirantes iniciales máximos de 2.6 m y velocidades máximas de 4.9 m/s en el cauce de la del río y tirantes de 1.3 m y velocidades de 4.5 m/s la parte final de la zona de estudio. Para el segundo escenario se pueden observar tirantes iniciales máximos de 2.9 m con velocidades máximas de 5.3 m/s en el cauce del río y tirantes de 1.7 m con velocidades máximas de 4.8 m/s la parte final de la zona de estudio.

Para los dos escenarios se puede concluir que, al incrementar el caudal líquido, se incrementa los tirantes y las velocidades del flujo de escombros. Así también se puede apreciar que en el segundo escenario se aprecian mayores velocidades en el cauce del río, a comparación con el primer escenario debido a que, al aumentar el caudal, el flujo se dirige con mayores rangos de velocidades en el cauce del río, impactando con la elevación de terreno existente (lecho del cauce y márgenes del río Shullcas) y con esto desplazando velocidades hacia aguas arriba del cauce.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. CONTRASTE DE RESULTADOS CON EVIDENCIA DE CAMPO Y CALIBRACIÓN.

Para la realización del contraste de los resultados, se utilizarán las evidencias encontradas en la visita de campo.

Uno de los eventos extraordinarios ocurrió en diciembre de 1990 el desembalse de 1'350,429 m³ de agua de la laguna Chuspicocha originó un aluvión que causo grandes daños, tanto en la población de las riberas del río Shullcas, áreas de cultivo entre otros, además también afecto a una parte de la ciudad de Huancayo (Fuente El Comercio, 1991), la misma que se encuentra sobre el cono de deyección del río Shullcas.

Se tomaron 3 puntos de control para la validación del modelo hidráulico.



Imagen 6.1: Tirante máximo de 2.40 m aguas arriba del río shullcas el cual da por tirante final ($y=2.30m$) por la sedimentación en el torrente y el eje central del río.



Imagen 6. 2: Tirante máximo de 1.65 m aguas arriba del río shullcas el cual da por tirante final ($y=1.81$ m) por la sedimentación en el torrente y el eje central del río.

Para poder realizar la calibración se tiene que tratar de hacer coincidir los tirantes del modelo con las marcas dejadas por las avenidas máximas de flujo encontradas en campo. También se debe de realizar el ajuste del volumen reportado de al final de la modelación con el volumen estimado de campo. La variable que será modificada en el modelo IBER V 2.4.2 será la concentración volumétrica de sedimentos (C.V.) para la realización del hidrograma líquido y sólido.

Entonces, teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas anteriormente, se determina el hidrograma líquido y sólido calibrado para el río shullcas, con un caudal máximo líquido de $55.40 \text{ m}^3/\text{s}$ y un C.V. variable de 30% a 34%, el cual se muestra en las tomas realizadas en campo. Por lo tanto, se tiene que el hidrograma hallado se aproxima a los resultados de tirantes de las marcas observadas en vistas de campo en cada uno de los puntos de control.

Para la calibración, el tipo de muestra que se utilizará será la de Aspen Pit1, ya que es la que mejor describe al material existente (esta elección se realizó teniendo en cuenta los ensayos de mecánica de suelos, ver Anexo A). Los parámetros reológicos y otros parámetros que serán utilizados.

El hidrograma del caudal líquido + sólido utilizado en la calibración es:

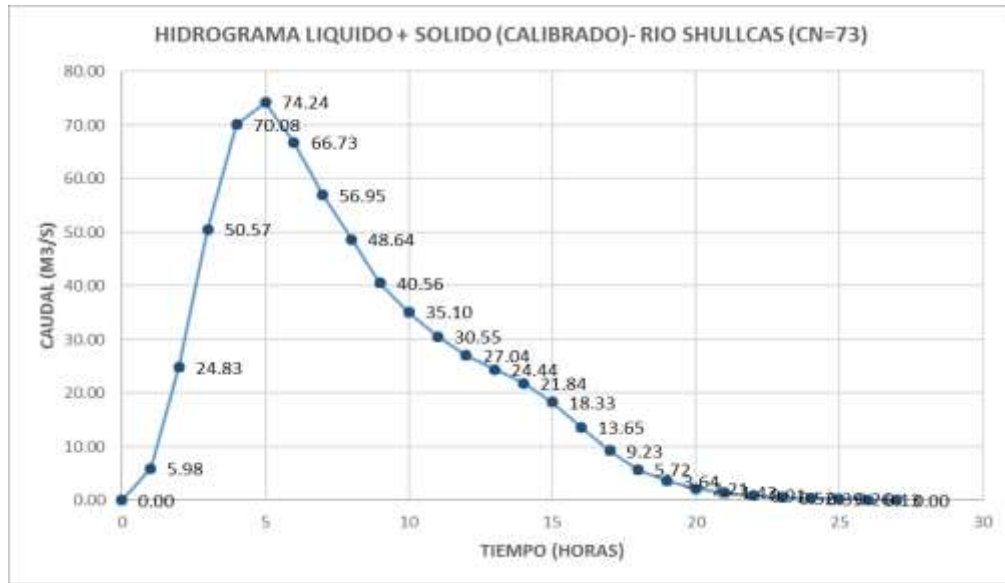


Imagen 6. 3: Hidrograma líquido y sólido (CALIBRADO). $Q_p(l+s)=74.24 \text{ m}^3/\text{s}$. ($C_v=0.30-0.34$)

Tabla 6. 1: Salida de datos (Calibrado) del programa IBER V 2.4.2 ($Q_p(l+s)=74.24 \text{ m}^3/\text{s}$).

FLUJO (M3)	AGUA (M3)	BULKED WITH SEDIMENT (M3)
Hidrograma de entrada (Inflow)	1729440.00	552859.20

La cantidad total de volumen para la creciente simulada es de 2.28 millones de m^3 , de los cuales 1.72 millones de m^3 corresponden al volumen líquido y 0.56 millones de m^3 corresponden al volumen de los sólidos (sedimentos).

Así también para el modelo ya calibrado se tienen los resultados en los cuales se aprecian tirantes máximos de 2.80 m con velocidades 5.2 m/s al inicio del modelo y tirantes de 1.60 m con velocidades de hasta 4.5 m/s en la parte final del modelo (Ver Figura 6.3 y 6.4).

RESULTADOS CALIBRADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=73 / CURVA CALCUALDA)

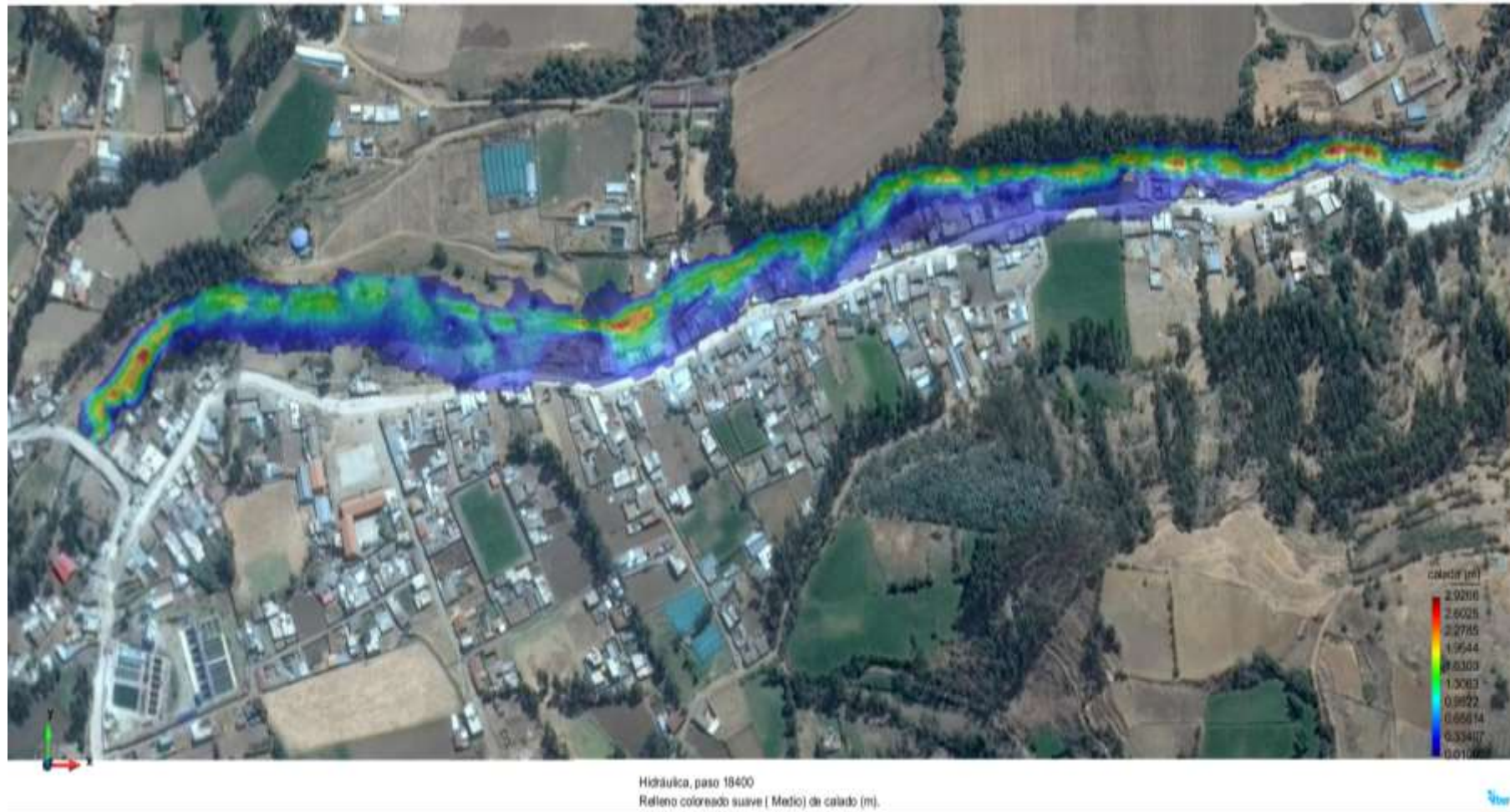
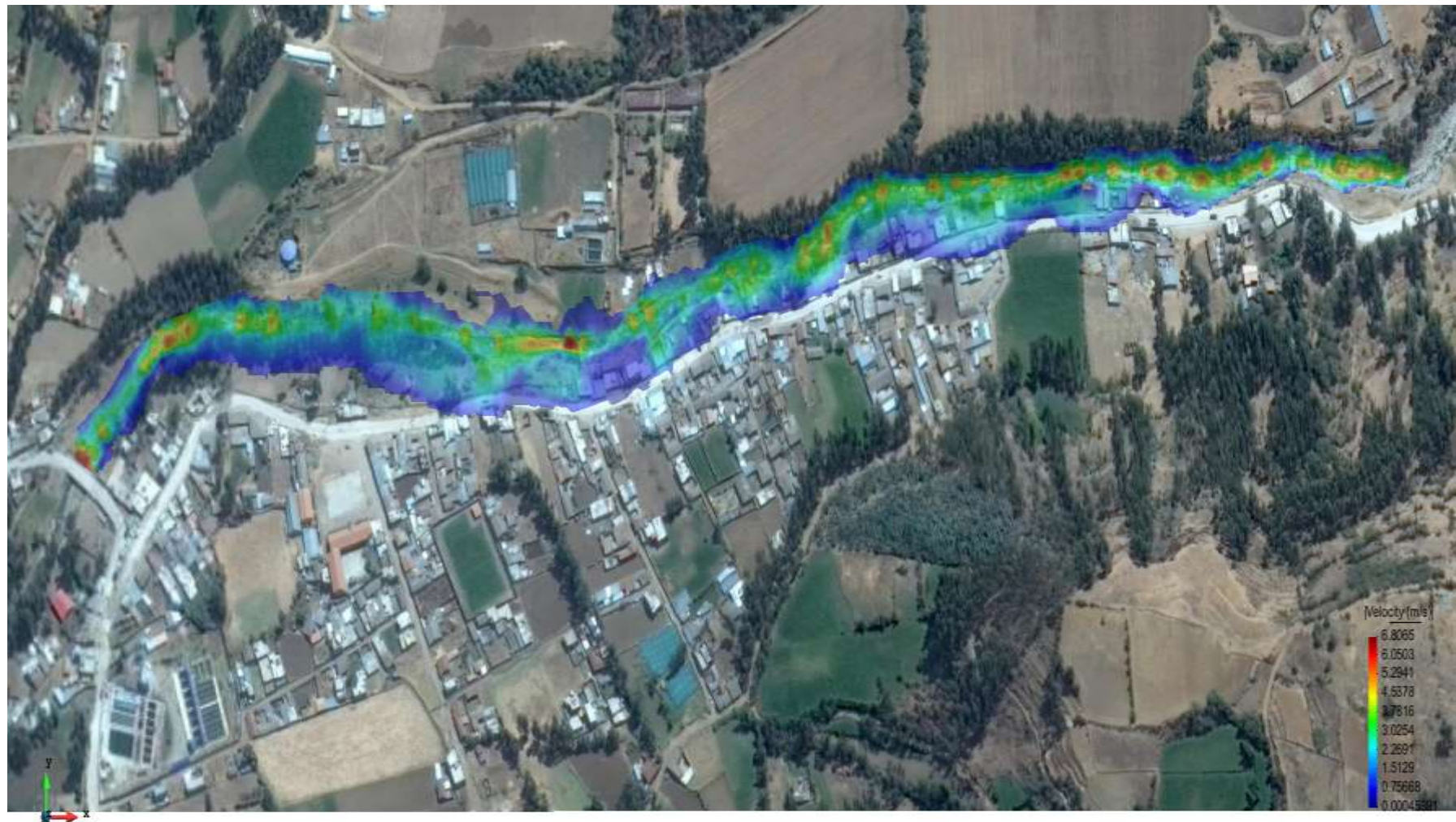


Imagen 6. 4: Tirantes máximos. $Q_p(l+s) = 74.24 \text{ m}^3/\text{s}$. ($C_v = 0.30-0.34$)



Hidráulica, paso 18400
 Relleno coloreado suave | Medio) de Velocidad (m/s), [Velocity (m/s)].

Imagen 6. 5: Velocidades máximas. $Q_p(I+s) = 74.24 \text{ m}^3/\text{s}$. ($C_v=0.30-0.34$)

6.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El volumen de escombros que fue ocasionado por el evento que ocurrió en el mes de diciembre del año de 1990 el desembalzamiento de 1'350,429 m³ de agua de la laguna Chuspicocha originó un aluvión que afectó a las poblaciones, áreas de cultivo entre otros en las márgenes del río Shullcas y parte de la ciudad de Huancayo (Fuente El Comercio, 1991), la cual se asienta sobre el cono de deyección del río Shullcas. Para el caso de la simulación se obtuvo un volumen total de la creciente simulada de 2.28 millones de m³ de los cuales 1.72 millones de m³ corresponden al volumen líquido y 0.56 millones de m³ corresponden al volumen sólido (sedimento).

En consecuencia, a este evento se obtuvo para el caso del volumen sólido, se tiene, que 28256.14 m³ de sedimento son depositados en el área de simulación y 2.28 millones de m³ salen del área de simulación. Se puede ver que para el caso del volumen difieren. Pero cabe mencionar que en los parámetros de alturas de flujo coincide con lo asumido y observado en campo como se puede observar en la figura 6.3.

Se ha realizado el ajuste y calibración del modelo con las observaciones de campo en el cauce del río Shullcas debido a que es un parámetro posible de medir y observar in-situ. Pero cabe tener en cuenta que el volumen estimado en campo tiene cierta incertidumbre, debido a la gran cantidad de material fino que produce la el río Shullcas lo que en consecuencia se tiene un mayor volumen de sedimento posible para ser arrastrado aguas abajo del río Shullcas.

Además de esto se tiene que tener en cuenta que el fenómeno de flujo de barro y escombros es sumamente complejo y un modelo matemático es solo una aproximación al problema. Por ejemplo, en un alud torrencial en la vida real, pueden pasar ciertos eventos como el caso de represamientos ocasionados por acumulaciones de troncos y rocas, sobre los cuales se acumula el fluido ocasionado altas presiones.

Para un caudal generado por una de estas roturas puede ser varias veces mayor que el caudal pico predicho por un análisis hidrológico convencional de crecientes. Debido a la incertidumbre en cuanto a la ubicación y tiempo en que pueden ocurrir este tipo de eventos de roturas de presas, el modelo IBER V 2.4.2

simula este tipo de fenómenos, pero eso es tema para otro tipo de análisis e investigación.

6.3 SIMULACIÓN DE FLUJO EN EL ANEXO VILCACOTO

Una vez realizado la determinación de los parámetros reológicos característicos del cauce en estudio provenientes de la calibración del modelo se procede a simular bajo estas condiciones el posible flujo en el anexo de Vilcacoto. Para este caso de simulación se utilizará la topografía obtenido del levantamiento topográfico realizado por la tesista y una imagen satelital Landsat de 25m x 25m de resolución espacial.

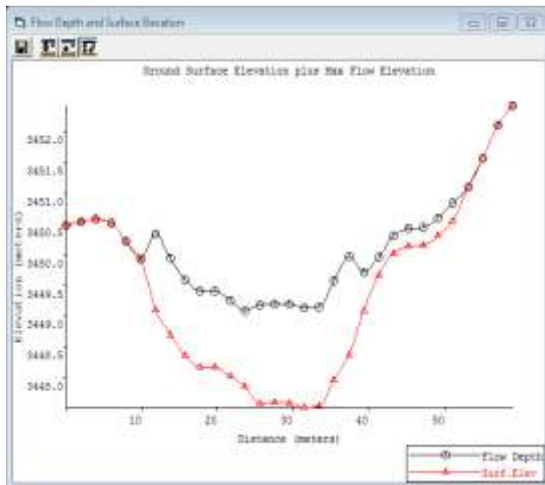
Las grillas utilizadas para la simulación del modelo serán de 1.5 m x 1.5 m. Los parámetros de entrada para la simulación serán los mismo de la etapa de calibración para un caudal liquido pico de 66.90 m³/s y un Cv variable de 30%-34% la longitud de la quebrada simula es de 800 ml. El cual servicio de muestra para la elaboración del estudio.

Para este caso de la simulación se incluirá el caudal del rio Shullcas calculado para un CN=75 (Curva Extrema) con un caudal extraordinario liquido de Q=66.90 m³/s. la estimación de este caudal liquido en Vilcacoto se basa en la interpretación de datos hidrológicos, intensidad de lluvia máxima para 24 horas (P24=53.98 mm), tipo se suelo y la elaboración de un modelo hidrológico en el software HEC-HMS.

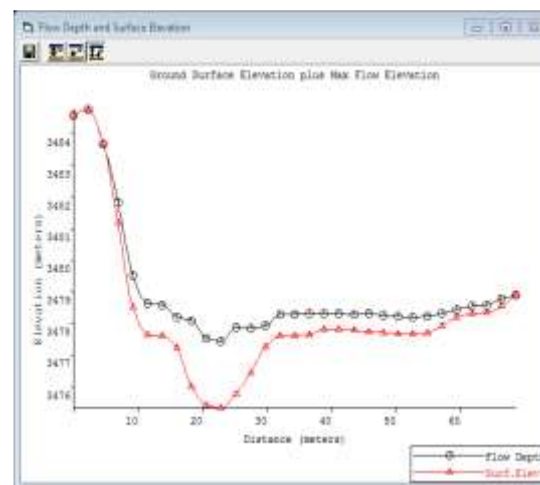
RESULTADOS CALIBRADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=75 / CURVA EXTREMA)



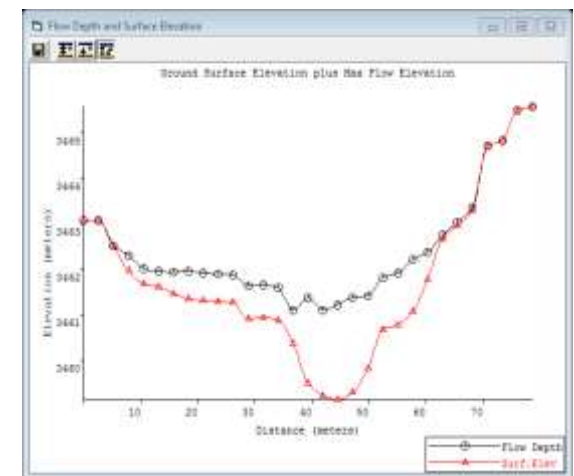
Imagen 6. 6: Tirantes máximos. $Q_{lp}=66.90 \text{ m}^3/\text{s}$. $C_v=0.30-0.34$



SECCION 1-1



SECCION 2-2



SECCION 3-3

Imagen 6. 7: Secciones Transversales Del Rio Shullcas. $Q_{lp}=66.90 \text{ m}^3/\text{s}$. $C_v=0.30-0.34$

RESULTADOS CALIBRADOS DE LA SIMULACIÓN EN IBER V 2.4.2 PARA (CN=75 / CURVA EXTREMA)

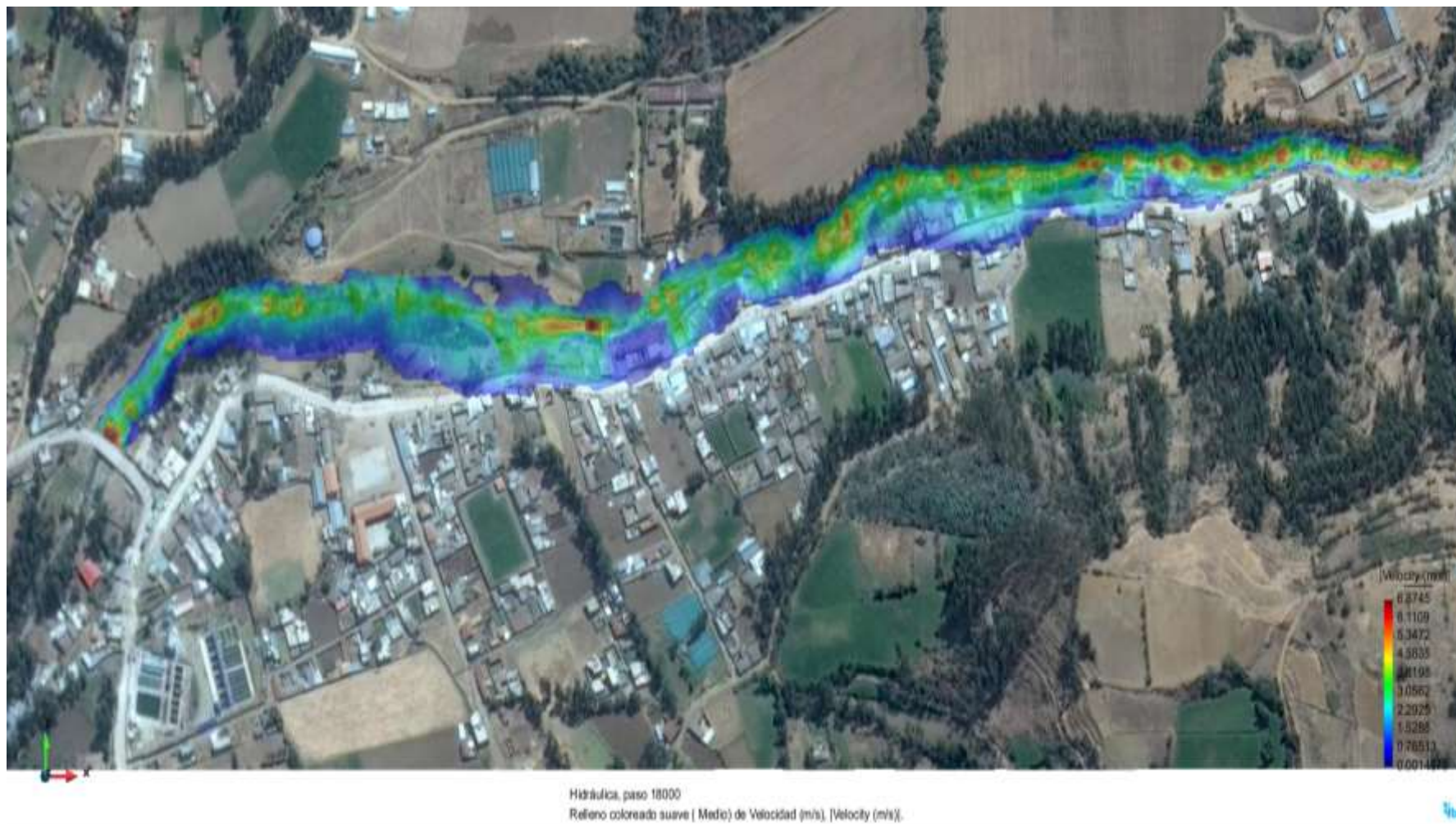
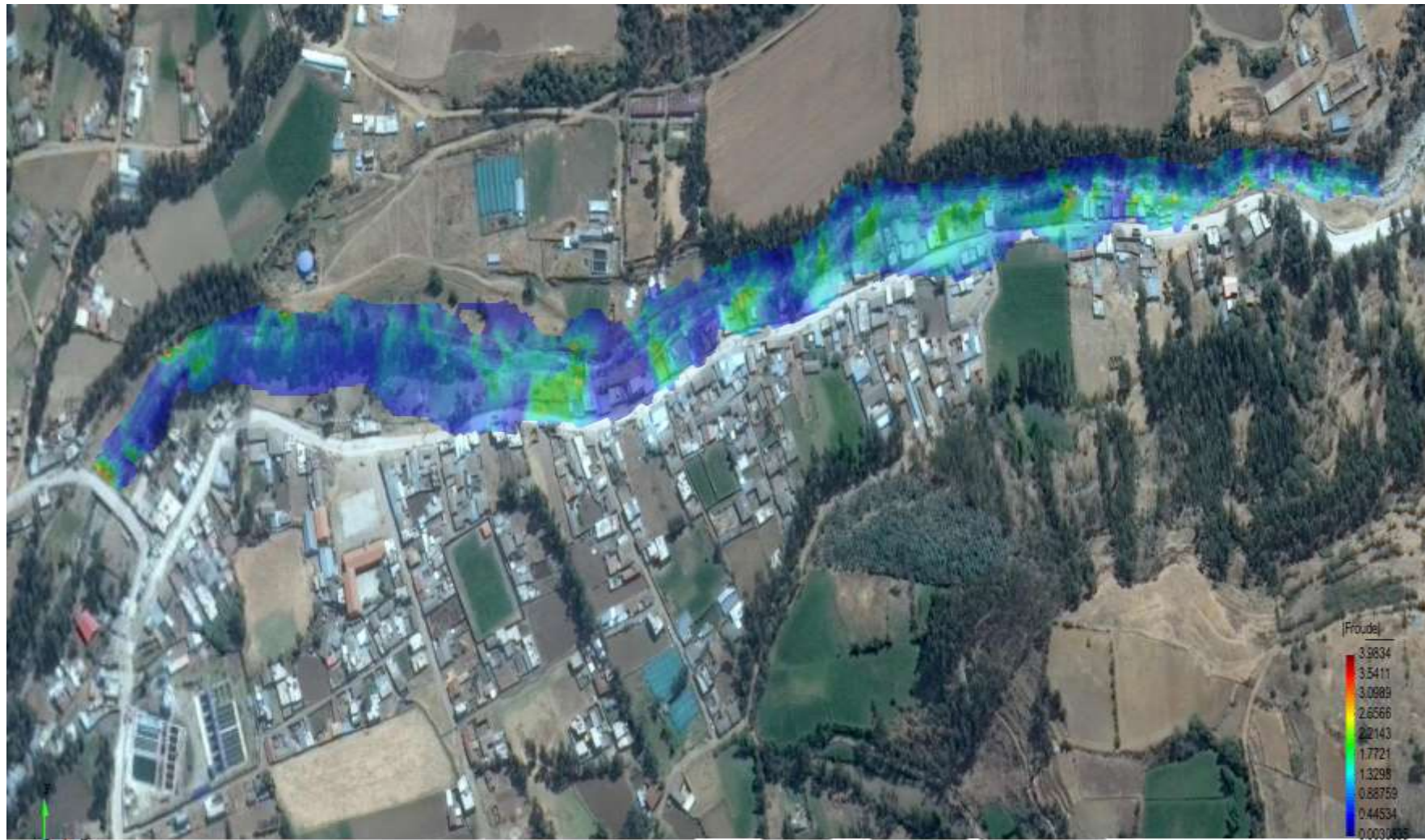


Imagen 6.8: Velocidades máximas. $Q_{lp}=66.90 \text{ m}^3/\text{s}$. $C_v=0.30-0.34$.



Hidráulica, paso 18000
 Relleno coloreado suave (Medio) de Froude, [Froude].

Imagen 6. 1: Numero de Froude. $Qlp=66.90 \text{ m}^3/\text{s}$. $Cv=0.30-0.34$

6.4 ELABORACIÓN DEL MAPA PRELIMINAR DE AMENAZA.

Para poder realizar un mapa preliminar de amenaza, se describirá una metodología en función de los resultados de tirantes de agua y velocidades de flujos del programa IBER V 2.4.2. El mapa que se obtiene permitirá representar la amenaza potencial que existe en cada punto de la zona urbanizada, debido al un hipotético caso de un alud torrencial. Las zonas con diferentes amenazas se diferencian entre sí mediante los colores rojo, naranja y amarillo según la amenaza sea alta, media o baja. Cada tipo de amenaza corresponde a una serie de daños a personas, edificaciones y áreas de cultivos entre otros, de acuerdo con la metodología propuesta en el proyecto PREVENE, (Basabe, 2001), como se explica a continuación:

Amenaza Alta (Color Rojo). - Las personas están en peligro eminente tanto dentro como fuera de las viviendas o edificaciones. La zona de amenaza alta debe ser una zona sujeta a reglamentación.

Amenaza Media (Color Naranja). - Las personas están en peligro eminente, pero en este caso fuera de las viviendas o edificios. Las edificaciones pueden sufrir daños estructurales entre otros, pero no la destrucción repentina, siempre y cuando su estructura sea adaptada a las condiciones del lugar. La zona de amenaza media debe ser una zona sujeta a reglamentación.

Amenaza Baja (Color Amarillo). - El peligro para las personas es débil o en la mayoría de los casos no existe. Las edificaciones pueden sufrir daños leves, pero puede haber daños graves en el interior. La zona de amenaza baja es de sensibilización.

Debido a la alta concentración de rocas y escombros, un alud torrencial es más destructivo que un flujo de agua. Por lo tanto, para aludes torrenciales se han propuesto las siguientes relaciones:

Tabla 6. 2: Tabla de amenaza para alud torrencial

Intensidad Alta	$H > 1 \text{ mts}$ o' $v_{xh} > 1 \text{ m}^2/\text{s}$
Intensidad Media	$H < 1 \text{ mts}$ o' $v_{xh} < 1 \text{ m}^2/\text{s}$
Intensidad Baja	No existe para este fenomeno (mud/deris flow)

Bajo los criterios de la tabla 6.8 se procede a crear el mapa preliminar de amenaza para el anexo de Vilcacoto que se encuentra dentro de la zona de

estudio. Se ha utilizado el pre-proceso (PELIGROSIDAD PERSONALIZADA), incluido del IBER V 2.4.2 para la realización de la Figura 6.12. Que se enfoca principalmente el anexo de Vilcacoto.

Casi el 80% de las edificaciones que están a la margen izquierda del cauce del río (PARTE ALTA). Ya sean las edificaciones tanto de albañilería confinada o en otro caso las construcciones tradicionales de adobe y tapial, áreas de cultivo se encuentran en la zona de AMENAZA ALTA. Las edificaciones que se encuentran al borde derecho de la carretera se encuentran en una zona de AMENAZA MEDIA – BAJA.

Estas áreas mencionadas son las posibles zonas críticas ante un hipotético caso de un evento de flujo de Escombros.

Para poder reducir los daños causados ante un eventual evento de flujo de escombros en el Anexo de Vilcacoto, se tendría que proteger las zonas de Alto riesgo (color rojo). Por lo tanto, como condición que salvaguarda los sectores que están frente al impacto directo del flujo del cauce del río es la construcción de defensas ribereñas de una altura mayor a los 3-4 metros (altura simulada de cauce de río) a lo largo del río Shullcas o el reasentamiento de las viviendas aledañas a la margen izquierda del cauce del río para evitar la pérdida de vidas humanas o posible daños materiales como ocurrido en los año 1990, ante un hipotético caso de evento de flujo de escombros.



Imagen 6. 10. Casi el 80% de las edificaciones que están a la margen izquierda del cauce del río (PARTE ALTA). Ya sean las edificaciones tanto de albañilería confinada o en otro caso las construcciones tradicionales de adobe y tapial, áreas de cultivo se encuentran en la zona de AMENAZA ALTA. tapial, áreas de cultivo se encuentran en la zona de AMENAZA ALTA.



Imagen 6. 11. Las edificaciones que se encuentran al borde derecho de la carretera se encuentran en una zona de AMENAZA MEDIA – BAJA.

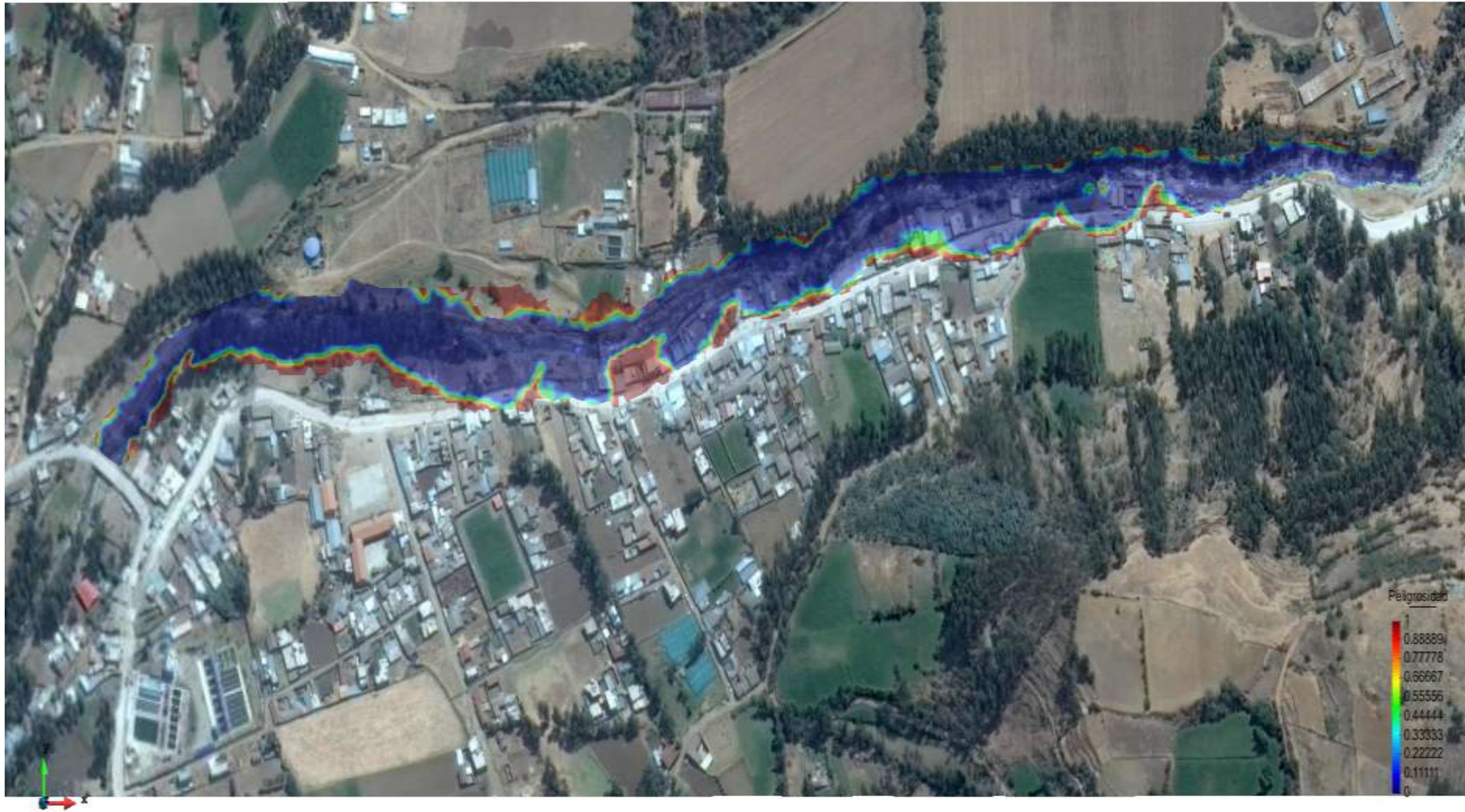


Imagen 6. 2: Mapa de Peligrosidad para un caudal de $Q_{lp}=66.90 \text{ m}^3/\text{s}$. y una concentración de sedimentos de $C_v=0.30-0.35$

CONCLUSIONES

1. Para definir los tramos vulnerables se tuvo en cuenta los siguientes parámetros: hidrograma líquido, la distribución de la concentración de sedimentos y los parámetros reológicos de la mezcla. Además, la topografía utilizada debe ser la más detallada posible con curvas de nivel cada un metro en el cono de deyección, en el cauce empinado de la quebrada se puede ser menos exigente y elegir una discretización adecuada, de acuerdo la precisión que se desea obtener.
2. El modelo IBER v 2.4.2, considera un fluido homogéneo de concentración variable, significa que internamente no se hace distinción de los tamaños de sedimento. Transita flujos de sedimentos escombros y lodos (hiperconcentrados), como un fluido continuo prediciendo el movimiento del fluido viscoso.
3. De los análisis realizados llegamos a un flujo de lodo, viscoso, con gran porcentaje de material fino de arcillas (flujo no newtoniano). El flujo que se presenta en el cauce es del tipo de flujo de lodo o Mudflow, según el criterio de Julien y Lan (1991) principalmente denotado por la gran cantidad de finos que forman los taludes altos del cauce.
4. Se determinó el caudal líquido de 55.40 m³/seg con una concentración de sedimentos (Cv) variable de 30% a 35% ha sido utilizado para la calibración. El modelo calibrado nos proporciona tirantes similares a los observados en campo y un volumen del mismo orden de magnitud, pero no igual. El volumen total de agua predicha por el modelo fue de 1.7 millones de m³ y el volumen de escombros con sedimento igual a 0.5 millones de m³ (un 80%, de este volumen es igual al volumen estimado de campo). La profundidad máxima varía entre 1.1 y 2.60 m con velocidades máximas calculadas de 4.9 m/s en el cauce del río Shullcas.

5. Se analizó las zonas más vulnerables ante una avenida máxima que ocasionarían un flujo de lodo y escombros son las zonas de las progresivas (0+090 - 0+310) y (0+620 - 0+880). Ocasionando grandes pérdidas de terreno, edificaciones rurales y vidas humanas. Debido a la simulación hidráulica el puente que conecta cochas chico con Vilcacoto no sufriría daños de acuerdo con los tirantes máximos arrojados por el modelo hidráulico. Que estarían por debajo de la súper estructura del puente.

RECOMENDACIONES

1. Los sectores que están frente al impacto directo de flujo de escombros del río Shullcas como medida de protección es necesario la construcción de un muro de contención de altura mayor a los 3-4 metros a lo largo del río Shullcas o la evacuación de las viviendas aledañas a la margen izquierda del río Shullcas para evitar la pérdida de vidas humanas o posibles daños materiales como ocurrido en los años 1990, ante un evento de flujo de escombros.
2. El modelo Bidimensional IBER v 2.4.2. es útil y necesario para trabajar con movimientos de masas complejos como son los flujos de detritos. Experiencias anteriores y el presente trabajo han demostrado su eficacia y ha pasado satisfactoriamente la prueba de la comparación con mapas de peligros reales realizados mediante métodos que demandan mayor tiempo y meses de trabajo de campo, fotointerpretación, sedimentología.
3. Cuando el material de fondo no es muy granular, se producirá una socavación a gran escala y por ello es recomendable usar enrocados o barrajes para el control de socavación con la finalidad de que aumente el acorazamiento del lecho de socavación.
4. Las variaciones de los resultados del modelo respecto a los datos medidos en campo siempre van a existir, es difícil determinar con exactitud la profundidad de socavación, pero lo más importante es saber interpretarlo las variaciones, saber a qué se deben dichas variaciones y usar algunos criterios para poder estimar un valor más cercano.
5. Con el mapa de riesgo será más fácil crear un ambiente de prevención frente a los fenómenos naturales e informar a la población de manera fácil y técnica sobre las consecuencias de estos desastres.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GUARNIZ MUÑOZ, CARLOS KENYO, (2014), Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER).
2. MARISA ROSANA SILVA DÁVILA, (2012), Estudio y Modelamiento Matemático de los Procesos de Sedimentación y Purga de un Reservorio.
3. Santiago Aurelio Ochoa G. (2014), Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales.
4. ÁNGELO ENRIQUE PALAVECINO RAMOS (2015), Modelación bidimensional de flujo generado por la rotura de una presa de tierra, utilizando el programa IBER.
5. ABEL MUÑIZ, P. (2012). *Hidrología General*. Huancayo.
6. AGUSTIN, C. A. (2009). *Hidrología*. Bolivia.
7. ANA, A. N. (1997). *Microcuenca Shullcas- Junin*. Lima.
8. CAMPOS, A. D. (1987). *Procesos del ciclo hidrológico*. México.
9. CASTILLO NAVARRO (2006), Aplicación de un Modelo Numérico de flujos de Escombros y lodo en una quebrada del Perú.
10. GAMION F. (2014) , Modelo de Flujo de escombros y lodo.
11. COUSSOT, P. (1997). *Mudflow Rheology and Dynamics*. International Association for. Rotterdam.: Ediciones A.A Balkema.
12. CURRY, R. (1966). *Observaciones De Flujos De Lodo Alpinas En La Cordillera Tenmile*. Central Colorado: E.E.U.U.
13. Dr.ROCHA, F. (1998). *Introducción a la Hidraulica Fluvial*. Lima.
14. FERNÁNDEZ y VELA, A. (2011). *La Utilización De Modelos En Hidrología*. La Mancha. España.
15. HUNGR O. (1995). *Flujo De Escombros Y Avalanchas*.
16. IGP, I. G. (2011). *Manejo de riesgos de desastres ante eventos meteorológicos extremos en el valle del Mantaro*. huancayo.
17. VILLODAS, R. (2008). *Hidrología*. Argentina: Universidad Nacional de Cuyo.
18. IVERSON. (1997). *La Física De Los Flujos De Escombros*.
19. JAVIER, A. M. (2001). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Mexico D.F.: Limusa S.A.
20. JOHNSON Y RODINE. (1984). *Debris Flow*. New York: ed. D.
21. KHALIDOU, M. (2011). *Modelación hidrológica de caudales diarios*. Universidad Autónoma del Estado de México. México. DF.

22. CONCHA FLORES, A. (2011). *Plan de ordenamiento territorial del sub modelo biologico ecologico de la cuenca del rio shullcas*. Huancayo.
23. MEUNIER. (1991). *Elementos De Hidraulica Torrencial*. Grenoble: Francia.
24. MUÑIZ, P. A. (2012). *Hidraulica de transporte de sedimentos*. Huancayo.
25. OCAMPO Y GOMEZ. (2011). *Estudio geológico de aluviones en la subcuenca del rio Shullcas*. Huancayo.
26. PIERSON, T. C. (1981). *Dominante Mecanismo De Apoyo A Las Partículas En El flujo De Residuos En El Monte Thomas*. Nueva Zelandia.
27. PROF. DELGADILLO, S. A. (2011). *Hidrologia "Mofologia de Cuencas"*. Venezuela: Universidad De Los Andes.
28. R.L. SCHUSTER. (1996). *Los 25 deslizamientos más catastróficos del siglo 20*. Granada: España.
29. SAVAGE. (1984). *Estudio Sedimentologico Del Deposito De FLujo De Bloques y Cenizas*. Mexico.
30. SUAREZ, J. (2004). *Analisis Geotecnico (Deslizamientos)*. Colombia.
31. TAKAHASHI. (1994). *Flujo De Escombros*. Róterdam.
32. VEN TE CHOW. (1994). *Hidraulica De Canales Abiertos*.
33. VEN TE CHOW. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia.: Editorial Mcgraw-Hill Interamericana, S.A.
34. VILLON, B. M. (2002). *Hidrología*. Lima - Peru: Editorial Villon.
35. VILLON, B. M. (2008). *Hec - Hms*. Cartago: Costa Rica.