

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS, GEOLOGÍA Y
CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
**APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE SAINT
VENANT AL MODELAMIENTO
BIDIMENSIONAL DE CUENCAS Y RÍOS**

Elaborado por:
VLADIMIR AQUISE OBREGON

Asesor:
MSc. Ing. CRISTIAN CASTRO PEREZ

AYACUCHO-PERÚ

2017

Resumen

La necesidad de prevenir y evitar las consecuencias de fenómenos naturales asociados a episodios extraordinarios de lluvia y su solución a la gran variedad de problemas de ingeniería hidráulica y dinámica fluvial, requieren de tener el conocimiento del funcionamiento hidrológico de una cuenca e hidráulico de un río.

Ya que la geometría irregular de éstos condicionan las características hidráulicas del flujo que se producen en ellas, y representarlas solamente puede hacerse mediante modelos físicos a escala reducida o mediante la modelación numérica.

Por ello el objetivo de esta investigación es estudiar adecuadamente el proceso de transformación de lluvia en escorrentía para una cuenca hidrográfica y el tránsito hidráulico en canales con el fin de encontrar los parámetros hidráulicos correctos mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel bidimensional.

Y como parte de la aplicación el uso de dos programas libres Hec-Ras 5.0.3 y El Programa Iber 2.3.2 para la modelación de la cuenca y el tránsito hidráulico en 1.5km del río Entaz ubicado en el departamento de Pasco-Villa Rica.

Además es mostrar las bondades y las deficiencias de estos modelos bidimensionales para tener presente en futuros trabajos aplicados al diseño hidráulico de canales y cuencas hidrográficas.

A mi amada madre Hilda I. Obregón y mi querido padre Moisés Aquire, por ser las personas más maravillosas que tengo en mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH), Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Civil.

A los docentes e ingenieros involucrados en mi formación profesional con quienes quedo agradecido por sus enseñanzas y buenos consejos.

A mi asesor de tesis Cristian Castro Pérez, por siempre disponer de su valioso tiempo para brindarme la información correcta.

A Jaime Bendezú P. y Edward León P. por sus recomendaciones en este trabajo de investigación.

Agradezco sobretodo la orientación y dedicación de mi co asesor de tesis Joel Oré Iwanaga, el verdadero autor de las ideas a partir de las cuales se ha desarrollado todo el trabajo de esta tesis.

Y a todas esas personas que me exigieron con mi formación tanto personal y profesionalmente, siempre tendré presente sus buenos deseos, Dios les bendiga.

Índice general

Resumen	
Dedicatoria	I
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	IX
Lista de Símbolos	X
Introducción	XIII
Capítulo I: Generalidades	1
1.1. Formulación del problema	1
1.1.1. Problema principal	1
1.1.2. Problemas específicos	1
1.2. Necesidad o motivación de la investigación	2
1.3. Justificación e importancia de la investigación	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
1.5. Hipótesis	4
1.5.1. Hipótesis General	4
1.5.2. Hipótesis Específicas	4
1.6. Unidad de análisis	4
1.7. Variables e indicadores	4
1.8. Tipo y nivel de investigación	5
1.9. Fuentes de Información e instrumentos utilizados	5
1.9.1. Fuentes de información	5
1.9.2. Instrumentos utilizados	6
1.10. Organización de la tesis	6

Capítulo II: Marco Teórico y Conceptual	8
2.1. Descripción General	8
2.2. Ecuación de Saint-Venant	8
2.3. Ecuación de continuidad	9
2.4. Ecuación de Momentum	9
2.5. Clasificación de los modelos de tránsito distribuido	10
2.5.1. Onda Cinemática	10
2.5.2. Onda de Difusión	11
2.5.3. Onda Dinámica	11
2.6. Ecuaciones de Saint-Venant en 1D	12
2.7. Ecuaciones de Saint-Venant en 2D	12
2.8. Modelos Hidráulicos Bidimensionales	15
2.8.1. Iber	15
2.8.2. Hec-Ras 2D	15
2.8.3. River 2D	16
2.8.4. CCHE2D	16
Capítulo III: Materiales y Métodos	17
3.1. Descripción General	17
3.2. Solución de las ecuaciones de Saint Venant	17
3.2.1. Procesos de discretización	17
3.2.2. Discretización del dominio	18
3.3. Métodos Numéricos	21
3.3.1. Método de las características	21
3.3.2. Método de Diferencias Finitas	23
3.3.3. Método de elementos finitos	26
3.4. Método de volúmenes finitos	26
3.4.1. Condición de estabilidad	34
Capítulo IV: Resultados y Discusión	36
4.1. Descripción General	36
4.2. Aplicación 2D al modelamiento de Cuencas	37
4.2.1. Características generales de la cuenca	37
4.2.2. Características Físicas de la Cuenca	37
4.2.3. Características Morfológicas de la Cuenca	38
4.2.4. Información Meteorológica	47
4.3. Hietograma de Precipitación de Exceso	49
4.3.1. IILA-SENAMHI-UNI	49
4.4. Aplicación de las herramientas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2 para la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz	55

4.4.1.	Condiciones de borde y datos de flujo	55
4.4.2.	Parámetros característicos de la cuenca del río Entaz	56
4.4.3.	Análisis y Comparación de Resultados	57
4.4.4.	Incidencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los resultados	62
4.5.	Aplicación 2D al transito hidráulico en canales	63
4.5.1.	Características generales del río	63
4.5.2.	Parámetros característicos del río	64
4.5.3.	Análisis 1D	67
4.5.4.	Análisis 2D	70
4.5.5.	Análisis y comparación de resultados	74
4.6.	Incidencia del número de Cuorant en los resultados	80
4.7.	Incidencia del coeficiente de rugosidad de Maning en los resultados . . .	81
Conclusiones y recomendaciones		82
	Conclusiones	82
	Recomendaciones	84
Referencia Bibliográfica		85
	Libros	85
	Artículos	86
	Normas y Manuales	87
	Estudios	87
	Fuente Electrónica	87
A. Análisis unidimensional		89
	A.1. Resultados del análisis 1D del río Entaz	89
B. Pasos para modelar mediante los programas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2		92
	B.1. Guía para la modelación mediante Hec-Ras 5.0.3	92
	B.1.1. Importación de los Datos Espaciales	92
	B.1.2. Generación de la malla 2D	93
	B.1.3. Asignación de Condiciones de Borde y Datos de Flujo	94
	B.1.4. Asignación de los coeficientes de rugosidad (n)	94
	B.1.5. Corrida del modelo 2D y sus parámetros	94
	B.2. Guía para la modelación mediante Iber 2.3.2	94
	B.2.1. Preparación de los archivos	95
	B.2.2. Discretización del Modelo Digital de Terreno a RTIN	95
	B.2.3. Hidrodinámica – Condiciones de Contorno	95
	B.2.4. Asignación de mapa de uso de suelo y coeficientes de rugosidad de Manning(n)	96

B.2.5. Cálculo del modelo 2D y sus parámetros	96
C. Errores Hec-Ras	97
C.1. Errores-Análisis bidimensional	97
C.1.1. Errores de configuración	97
D. Fotografías de visita al proyecto: Defensa Ribereña Villa Rica	99

Índice de figuras

2.1. Sección del dominio del flujo en un plano vertical y representación de variables H y h	14
3.2. Procesos de discretización	18
3.3. (a) Mallado estructurado, (b) Mallado no estructurado	19
3.4. Mallado no estructurado - Triangulación de Delaunay	20
3.5. Fuente: Elaboración propia	20
3.6. Líneas características unidimensionales en el espacio $x-t$	21
3.7. Malla de diferencias finitas	24
3.8. Malla bidimensional de volúmenes finitos, (a) formulación centrada en la celda y (b) formulación centrada en el vértice	27
3.9. Esquema general para la construcción de volúmenes finitos centrada en los vértices	28
4.10. Delimitación de la Cuenca del río Entaz	39
4.11. Clasificación de la cobertura vegetal - cuenca del río Entaz	41
4.12. Características del tipo de cobertura que compone la cuenca del río Entaz	41
4.13. Mapa de cobertura vegetal y usos de suelos	42
4.14. Modelo Conceptual	43
4.15. Mapa temático: Número de curva para condiciones normales, secas y húmedas	44
4.16. Número de curva para condiciones normales-cuenca del río Entaz	45
4.17. Curvas IDF IILA-SENAMHI-UNI-Villa Rica	51
4.18. Hietograma de precipitación total	51
4.19. Hietograma de precipitación de exceso	52
4.20. Hidrograma unitario adimensional del NRCS	52
4.21. Hidrograma de máximas $T=50, 100, 200$ y 500 años	53
4.22. Hidrograma de máximas avenidas - modelo agregado del SCS - $T=100$ años	53
4.23. Hidrograma de máximas avenidas - modelo distribuido de onda cinemática - $T=100$ años	54
4.24. Hidrograma de máximas avenidas - modelo agregado del SCS y distribuido de Onda Cinemática - $T=100$ años	54

4.25. Asignación automática de los coeficiente de rugosidad de Manning de la cuenca del río Entaz en el programa Hec-Ras e Iber desde un Raster . . .	57
4.26. Simulación de la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz con la herramienta Hec-Ras	58
4.27. Resultados de hidrogramas para diferentes tamaños de enmallado-programa Hec-Ras	58
4.28. Simulación de la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz con la herramienta Iber 2.3.2	59
4.29. Resultado de Hidromagramas para diferentes tamaños de enmallado-modelo bidimensional Iber	60
4.30. Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 100x100m	60
4.31. Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 50x50m	61
4.32. Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 25x25m	61
4.33. Resultados de hidrogramas para diferentes variaciones de coeficientes de rugosidad de Manning	62
4.34. Ubicación del río Entaz	63
4.35. Imágenes de la granulometría de las partículas sobre el lecho del río Entaz	64
4.36. MDE de canal natural y canal con estructura de protección lateral . . .	65
4.37. Clasificación de los usos de suelo para la asignación de los coeficientes de rugosidad Manning	66
4.38. Análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3-secciones en planta y vista isométrica del canal	68
4.39. Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 perfil de la superficie libre del agua	69
4.40. Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 sección natural del río	69
4.41. Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 sección con estructura de gaviones	70
4.42. Modelo conceptual del procedimiento a seguir en el programa Iber . . .	71
4.43. Resultados del modelamiento bidimensional del canal con el programa Hec-Ras 5.0.3, (a) y (b) representan la altura libre del agua (m) y (c) y (d) las velocidades en ((m/s))	72
4.44. Resultados del modelamiento bidimensional del canal con el programa Iber 2.3.2, (a) y (b) representan la altura libre del agua (m) y (c) y (d) las velocidades en ((m/s))	73
4.45. Secciones de análisis río Entaz	74

4.46. Comparación de tirantes máximos en las secciones 01, 02, 03 y 04 utilizando los programas Hec.Ras 1D, 2D e Iber 2D	75
4.47. Fotografías de la crecida del río Entaz en su máximo caudal	77
4.48. Fotografías de la crecida del río Entaz en su máximo caudal	78
4.49. Comparación de esfuerzos cortantes con Hec-Ras e Iber en las secciones 02 y 04	79
4.50. Estabilidad y inestabilidad de resultados para diferentes valores del CFL	80
4.51. Estabilidad e inestabilidad de resultados	80
4.52. Comparación de tirantes máximos para diferentes valores del coeficiente de Manning	81
C.1. HDF ERROR	97
C.2. Configuración de Idioma	98
D.1. Fotografía del inicio del proyecto: Defensa Ribereña Villa Rica	99
D.2. Armado de gaviones caja en obra	100
D.3. Movimiento de suelo para instalación del muro de gaviones	100

Índice de tablas

1.2. Variables e indicadores	5
3.3. Comparación del tipo de Mallado	20
4.4. Parámetros climáticos promedio de Villa Rica	37
4.5. Parámetros morfométricos de la Cuenca del Río Entaz	38
4.6. Clasificación del grupo hidrológico del suelo	40
4.7. Variación de CN para diferentes condiciones	43
4.8. CN ponderado para las tres condiciones	46
4.9. Tiempo de concentración (T_c) por diferentes métodos	47
4.10. Relación de estaciones meteorológicas cercanas al área en estudio . . .	48
4.11. Parámetro regional b	49
4.12. Guía para la selección de los periodos de retorno	50
4.13. Resumen de caudales máximos	55
4.14. Hietograma de precipitación total - T=100 años	56
4.15. Coeficientes de rugosidad de Manning	56
4.16. Relación entre el número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo	59
4.17. Caudales máximos para diferentes valores de coeficiente de rugosidad de Manning n	62
4.18. Coeficientes de rugosidad de Manning del río Entaz	64
4.19. Resultados análisis 1D del río Entaz	68
4.20. Tabla comparativa de las diferencias entre tirantes para los 3 casos de análisis 1D y 2D	76
4.21. Comparación de las velocidades máximas y sus diferencias	79
A.1. Principales parámetros de simulación hidráulica 1D	89

Lista de símbolos

A	Área
α, β	Componentes del vector unitario normal a la arista
B	Vector del independiente o fuente
C	Coefficiente de Chézy
C	Número de Courant
C^+, C^-	Líneas características
CFL	Número de Courant-Friedrich-Levy
CN_w	Número de curva
CN_w	Número de curva ponderado
c	Celeridad de onda
F	Vector o tensor de flujo
f	Es la expresión simbólica de los términos F y G
G	Vector o tensor de flujo
g	Aceleración de la gravedad
h	Profundidad de flujo/ tirante
I	Intensidad de precipitación
k	Coefficiente empírico
L	Longitud
L	Perdida de precipitación
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Autovalores de la matriz jacobiana
Δt	Intervalo de tiempo
$ \Lambda $	Matriz diagonal de autovalores
Δx	Intervalo de espacio
S_f	Pendiente de fricción
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
η_{ij}	Vector normal a $\Gamma_{i,j}$
Q	Caudal
S_0	Pendiente del fondo del cauce
S_{0x}	Pendiente del fondo en la dirección x
S_{0y}	Pendiente del fondo en la dirección y
S_f	Pendiente del fricción del cauce

S_{fx}	Pendiente del fricción en la dirección x
S_{fy}	Pendiente del fricción en la dirección y
S_{t1}, S_{t2}	Término turbulento
$\Gamma_{i,j}$	Lado común al volumen de control
T	Periodo de retorno
θ_x, θ_y	Ángulos que forman la dirección del viento con el eje
τ_{sx}, τ_{sy}	Tensiones tangenciales en la superficie debidos al viento
τ_{bx}, τ_{by}	Tensiones de fondo
U	Vector de variables de flujo
u	Componente de la velocidad en la dirección x
u_L, u_R	Valor de la variable u a la izquierda y derecha de una discontinuidad
V	Velocidad Media
v	Componente de la velocidad en la dirección y
∇	Divergencia de un campo vectorial
x, y, z	Ejes coordenados
W	Velocidad del viento
w	Variable de Scoffier
X	Matriz de autovectores
z_b	Cota de fondo

Introducción

Para el dimensionamiento de estructuras hidráulicas inmersas en el lecho de un río o en las riberas de éste, se requiere analizar la transformación de lluvia en escorrentía adecuadamente, en una cuenca hidrográfica hasta el punto de aforo, donde se prevea el inicio de la instalación de una Defensa Ribereña, una represa de almacenamiento o derivación, un puente u otra estructura, la misma que necesita del hidrograma de diseño.

En la presente investigación se hace uso de las ecuaciones de Saint-Venant, que permiten el modelamiento del proceso de transformación de lluvia en escorrentía para el caso de la *modelación bidimensional de cuencas hidrográficas*, y también el *transito hidráulico a nivel bidimensional en un tramo de río*, para determinar las características hidráulicas.

La transformación de lluvia en escorrentía es un proceso fundamental, que permite finalmente el cálculo del hidrograma de máximas avenidas de diseño en un determinado punto de aforo de la cuenca hidrográfica, para lo cual en primer lugar es necesario determinar adecuadamente el hietograma de precipitación total, del mismo que se obtiene el hietograma de precipitación de exceso, teniendo en cuenta las tasas de infiltración en la cuenca hidrográfica en función a la cobertura, grupo hidrológico de suelo, condición hidrológica, etc.

El hietograma de precipitación de exceso es transitado en la cuenca hidrográfica, con la ayuda de funciones transferencia, mediante un modelo agregado (SCS) y distribuidos (Onda Cinemática, Onda de Difusión y Onda Dinámica), lo mismo que en la presente investigación se desarrolló a partir de modelos unidimensionales (1D) con la ayuda del programa Hec-Hms 3.5 y bidimensionales (2D) con la ayuda de los programas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2.

De igual forma el transito hidráulico del hidrograma obtenido del análisis bidimensional de la cuenca hidrográfica, se realizó a partir de modelación 1D y 2D, teniendo en cuenta la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a partir de flujo no permanente para aguas poco profundas, con la ayuda de los programas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2.

Fue necesario investigar el desarrollo de las ecuaciones de Saint-Venant, mediante diferentes técnicas numéricas de solución, teniendo en cuenta: método de las características, diferencias finitas, elementos finitos en forma general y por último el más importante que corresponde a volúmenes finitos, que fue investigado con mayor detalle, como técnica numérica que permite la solución adecuada de las ecuaciones de Saint-Venant, como aplicación a cuencas y ríos.

La aplicación práctica fue realizada en la cuenca hidrográfica del río Entaz en lo que respecta a transformación de lluvia en escorrentía, así como en un tramo de 1.5 Km del mismo río que discurre adyacente a la ciudad de Villa Rica, para transitar el hidrograma de máximas avenidas.

Capítulo I: Generalidades

El principal interés de la presente investigación radica en la interpretación correcta de la solución de las ecuaciones de Saint Venant, y su aplicación a la transformación de lluvia en escorrentía para el caso de cuencas hidrográficas, así como el tránsito de un hidrograma de un punto a otro dentro de un río, para el caso de tránsito en canales. La discusión teórica correspondiente a la esquematización de las ecuaciones de Saint Venant se desarrolla para una primera aproximación de onda cinemática, luego onda de difusión y finalmente onda dinámica, y como repercute en los resultados a nivel unidimensional y bidimensional no permanente en cuencas y ríos.

1.1. Formulación del problema

1.1.1. Problema principal

¿La modelación numérica de cuencas y ríos para transformar la lluvia en escorrentía por un lado y por el otro para transitar el hidrograma de máximas avenidas en un tramo de estudio en un río, es suficiente mediante la solución de las ecuaciones de Saint Venant a nivel de la modelación bidimensional?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿La transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca hidrográfica mediante la solución de la ecuación de Saint Venant a nivel 1D con el modelo distribuido de Onda cinemática permite la obtención de resultados adecuados en comparación con modelo agregado del SCS?
- ¿La discretización de la ecuación de momentum a través de su forma de difusión y dinámica permiten un mejor acercamiento de los resultados en lo que respecta a obtención de hidrograma en un punto de aforo de una cuenca y posterior tránsito a través de un canal?

- ¿Las características hidráulicas en una cuenca y canal se determinan adecuadamente con el método de volúmenes finitos?
- ¿La inadecuada selección de los coeficientes de rugosidad de Manning tiene una alta incidencia en la transformación de lluvia en escorrentía de una cuenca hidrográfica y en el tránsito hidráulico de un río?

1.2. Necesidad o motivación de la investigación

En la actualidad se vienen difundiendo a nivel mundial, con bastante énfasis los modelos bidimensionales tanto para transformación de lluvia en escorrentía (modelación de cuencas) como para tránsito de hidrogramas en ríos a nivel bidimensional, a través de dos programas: Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2, los mismos que son gratuitos.

Fue de interés particular investigar el estado del arte de la solución de las ecuaciones de Saint-Venant desde su solución a nivel de flujo no permanente 1D mediante técnica de diferencias finitas explícitas e implícitas a nivel de onda cinemática, difusión y dinámica, hasta la solución actual, mediante la técnica de volúmenes finitos en 2D, que se encuentra inmersa dentro de los programas comerciales mencionados líneas arriba, con el objetivo de actualizar conocimientos a nivel personal en el área de Hidráulica y dejar una bibliografía para que futuros tesisistas puedan contar con un referente que les permita seguir la investigación en modelación bidimensional aplicado a cuencas y canales.

1.3. Justificación e importancia de la investigación

Hoy en día la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel de 2D, permite un mejor acercamiento en la determinación del hidrograma de diseño a partir de la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca, así como también permite el tránsito de hidrogramas en canales.

La discretización de una cuenca hidrográfica en una malla de volúmenes de control o volúmenes finitos con una resolución aceptable que permita su modelación 2D, permite un mejor acercamiento en lo que respecta al tránsito del hidrograma de precipitación de exceso, generando de esta manera las tasas de transporte de sedimentos lo que finalmente repercute en el dimensionamiento del volumen muerto aguas arriba de una represa, así mismo tiene aplicaciones en el transporte de flujo de detritos (huaycos), cálculo del volumen de escorrentía para el dimensionamiento de una presa de almacenamiento, entre otros.

En el caso del tránsito hidráulico de hidrogramas en canales a nivel 2D, permite determinar adecuadamente las características hidráulicas de diseño, fundamentalmente velocidad y tirante, a partir de las cuales se pueden determinar tasas de erosión, variable importante en el diseño de estructuras fluviales de protección contra avenidas, dimensionamiento de estribos de puentes, barrajes fijos y móviles de una represa derivadora, entre otros.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Estudiar el proceso de transformación de lluvia en escorrentía dentro de una cuenca hidrográfica, así como el tránsito hidráulico de flujo no permanente en canales, mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel bidimensional, con la ayuda de los programas Hec-Ras e Iber.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Comparar el modelo distribuido de onda cinemática mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel de 1D, con el modelo agregado del SCS, para realizar la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca hidrográfica.
- Interpretar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación de momentum mediante la aproximación de onda de difusión y onda dinámica en la determinación del hidrograma en un punto de aforo de una cuenca y el tránsito a través de un tramo de canal, contando con la ayuda de los programas Hec-Ras e Iber.
- Investigar el método de volúmenes finitos y su aplicación a la solución de las ecuaciones de Saint-Venant.
- Discutir los resultados a partir de la incidencia del coeficiente de rugosidad de Manning, en la determinación del hidrograma obtenido en el punto de aforo de una cuenca y los parámetros hidráulicos determinados a lo largo de un tramo de canal.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis General

El hidrograma obtenido a la salida de una cuenca hidrográfica, así como el tránsito hidráulico de los pulsos del hidrograma en un tramo de estudio de un canal, son obtenidos en forma confiable y segura mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel bidimensional con la ayuda de programas comerciales y gratuitos Hec-Ras e Iber.

1.5.2. Hipótesis Específicas

- La solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel 1D, teniendo en cuenta simplificar la ecuación de momentum al nivel de Onda Cinemática, permite la obtención de resultados adecuados en comparación con el modelo agregado del SCS, en lo que respecta a la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca hidrográfica.
- La aplicación de la onda de difusión y onda dinámica permiten un mejor acercamiento de los resultados en lo que respecta a hidrograma en un punto de aforo y al tránsito en canales, a partir de los programas Hec-Ras e Iber.
- El método de volúmenes finitos permite la solución de las ecuaciones de Saint-Venant en forma estable y consistente, a través del ajuste del número de Courant.
- El coeficiente de rugosidad de Manning permite calibrar adecuadamente las características hidráulicas en una cuenca y tramo de un canal.

1.6. Unidad de análisis

La unidad de análisis es la modelación bidimensional de cuencas y ríos asociados a la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel de 2D con la finalidad de obtener los parámetros hidráulicos correctos.

1.7. Variables e indicadores

Las variables e indicadores se resumen en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Variables e indicadores

Variables	Indicadores
Directas Hidrogramas de crecidas y transito hidráulico en canales	Directas Intensidad, precipitación, número de curva, caudal y coeficientes de rugosidad de Manning
Indirectas Transformación de lluvia en escorrentía Parámetros hidráulicos del río	Indirectas Ecuaciones bidimensionales de Saint Venant (modelos distribuidos)
Intervinientes Solución numérica	Intervinientes Aplicación de modelos bidimensionales (software: Hec-Ras e Iber)

1.8. Tipo y nivel de investigación

De acuerdo a los propósitos de investigación el trabajo de tesis se basa en un enfoque cuantitativo y el alcance o nivel se define como descriptivo y correlacional.

1.9. Fuentes de Información e instrumentos utilizados

1.9.1. Fuentes de información

La documentación bibliográfica utilizada a nivel de libros y artículos se obtuvo de las diferentes direcciones de publicaciones académicas asociados al modelamiento bidimensional de cuencas y ríos y técnicas numéricas para la solución de las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant.

Los datos cartográficos y topográficos tanto de la cuenca y del río para los análisis desarrollados fueron obtenidos del Sistema de Información Geográfica (GIS) y el proyecto: “ Defensa ribereña del río Entaz”, ubicado en el distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa del departamento de Pasco.

1.9.2. Instrumentos utilizados

Para llegar a los objetivos de este trabajo de investigación fueron necesarios el uso de los diversos programas:

Civil 3D : Software para generación de superficies, secciones transversales, edición de ensambles, corredores u estructuras lineales y exportación de archivo DEM (Modelos de Elevación Digital).

Global Mapper : Es una aplicación GIS asequible y fácil de usar que ofrece acceso a una variedad incomparable de conjuntos de datos espaciales.

QGIS : Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Útil para la generación de mapas en formatos vectoriales y rasters.

Hec-Hms 3.5 : Conocido como el sistema de modelamiento hidrológico es un programa diseñado para simular el proceso de precipitación- escurrimiento en cuencas.

Hec-Ras 5.0.3 : programa desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hec-Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers), permite simular el flujo de agua en 1D, 2D.

Iber 2.3.2 : Conocido como un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre, régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. Iber en su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Saint-Venant 2D.

L^AT_EX : Sistema de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica. Para el desarrollo y presentación de informes finales.

1.10. Organización de la tesis

La tesis esta estructurada en 5 capítulos, los mismos que a continuación se describen en forma general:

- Capítulo I [Pag.1] Describe el planteamiento del problema, los objetivos, las hipótesis, variables e indicadores, tipo y nivel de investigación de la tesis.
- Capítulo II [Pag.8] Corresponde al marco teórico y conceptual, donde se describen las diferentes formas de expresión de las ecuaciones de Saint-Venant, en lo que respecta a continuidad y momentum, así como la descripción de algunos programas comerciales de solución bidimensional.

- Capítulo III [Pag.17] Este capítulo describe el desarrollo de las ecuaciones de Saint-Venant siguiendo un esquema de discretización del dominio, de las ecuaciones y la descripción de la solución numérica.
- Capítulo IV [Pag.36] En este capítulo se analiza el proceso de transformación de lluvia en escorrentía a nivel bidimensional aplicado a la cuenca del río Entaz, en el que se describe todos los procedimientos desde su delimitación hasta la determinación del hidrograma de salida para el tránsito hidráulico en un tramo de 1.5 Km del río Entaz que pasa adyacente a la ciudad de Villa Rica, permitiendo de esta manera comparar los resultados de las características hidráulicas más importantes con la ayuda de los programas Hec-Ras e Iber.
- Conclusiones y Recomendaciones [Pag.82] Corresponde a las conclusiones que responden las hipótesis planteadas en este trabajo de investigación.

Capítulo II: Marco Teórico y Conceptual

2.1. Descripción General

El presente capítulo trata de la descripción teórica de las ecuaciones de Saint-Venant, su composición (ecuación de continuidad y ecuación de momentum), clasificación de modelos distribuidos, representación unidimensional y bidimensional de las ecuaciones, descripción de los parámetros que los componen y sobre la descripción de los modelos bidimensionales más comerciales utilizados actualmente.

2.2. Ecuación de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant son un conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan los cambios de caudal en el espacio y en el tiempo, y cuya denominación recibe el nombre en honor al matemático e ingeniero francés del siglo XIX Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant¹. Es conocido también como un conjunto de ecuaciones hiperbólicas que dependen del número de Courant para su estabilidad (Mirzazadeh y Akbari, 2012). Estas ecuaciones puede ser utilizado en múltiples contextos como en la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para luego ser transitada o trasladada a través de una corriente de agua como un río, también puede ser utilizada para transitar flujos de agua superficiales (poco profundas) como en los sistemas de irrigación a través de un sistema de canales o de ríos.

El sistema de ecuaciones de Saint-Venant está compuesto por dos conjuntos de ecuaciones: las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento o momentum.

¹Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797-1886) fue un matemático y científico mecánico francés que contribuyó al nacimiento de la mecánica de medios continuos, tanto en la mecánica de sólidos deformables como en la mecánica de fluidos. Aunque su apellido completo era Barré de Saint-Venant, es conocido en la bibliografía no francesa simplemente como Saint-Venant.

2.3. Ecuación de continuidad

Se denota como la ecuación de conservación de masa sobre un volumen de control, el principio indica que la entrada neta de masa por unidad de tiempo debe ser igual al cambio de almacenamiento dentro de dicho volumen. Que en su forma conservativa se puede representar en términos del caudal y área (R. Szymkiewicz, 2010).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

Forma no conservativa

$$V \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

La diferencia entre la forma conservativa y la no conservativa radica en que ésta última, considera a la velocidad del flujo (V) como variable independiente en vez del caudal (Q), lo que es útil para algunos métodos de solución.

2.4. Ecuación de Momentum

Forma conservativa

$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}$	+	$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)$	+	$g \frac{\partial y}{\partial x}$	-	$g(S_0 - S_f)$	= 0
Término de aceleración local		Término de aceleración convectiva		Término de de fuerza de presión		Término de de fuerza gravitacional	Término de de fuerza fricción

La fuerza de gravedad y de fricción representan en conjunto la onda cinemática, si a esta ecuación se le adiciona el término de la fuerza de presión representa a la onda de difusión y si a la última le adicionamos los términos de aceleración local y aceleración convectiva se convierte en la ecuación de onda dinámica.

$$\underbrace{\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right)}_{\text{onda de difusión}} + \underbrace{g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f)}_{\text{onda cinemática}} = 0$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\text{onda dinámica}}$

Forma no conservativa (Elemento de ancho unitario)

$$\underbrace{\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x}}_{\text{onda dinámica}} + \underbrace{g \frac{\partial y}{\partial x}}_{\text{onda de difusión}} - \underbrace{g(S_0 - S_f)}_{\text{onda cinemática}} = 0$$

2.5. Clasificación de los modelos de tránsito distribuido

Las ecuaciones de Saint-Venant tienen diferentes formas simplificadas para definir el tránsito de avenidas del flujo en una dimensión. En estas ecuaciones es despreciado el efecto del flujo lateral, la resistencia por viento y pérdidas por vórtices (corrientes de Eddy) (Chow y R. Larry W., 1994).

(Shultz y McEnery, 2008) caracteriza a los modelos distribuidos por su gran potencial y mayor precisión en las simulaciones hidrológicas. Mientras (Bladé Castellet, 2005) afirma que estos métodos tenían sentido cuando la capacidad y velocidad de las computadoras era limitada, pero por lo general lo han ido perdiendo a lo largo del tiempo, tan solo los métodos de Muskingum y la onda cinemática siguen utilizándose en estudios hidrológicos.

2.5.1. Onda Cinemática

Conocido como el modelo distribuido mas simple porque no considera los términos de aceleración local, convectiva y la fuerza de presión en la ecuación de momentum (Chow y R. Larry W., 1994).

$$S_0 = S_f \tag{2.3}$$

La derivada del caudal Q con respecto al tiempo puede ser transformada como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \left(\frac{\partial Q}{\partial A} \right) \frac{\partial A}{\partial t} \tag{2.4}$$

Por lo tanto la ecuación de continuidad 2.1 se convierte en :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{\partial Q}{\partial A} \right) \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \tag{2.5}$$

reescribiendo la ecuación 2.5 queda:

$$\frac{dx}{dt} = \left(\frac{\partial Q}{\partial A} \right)_{x=const} \quad (2.6)$$

Es decir, la descarga es constante a lo largo de la trayectoria característica definida por la ecuación conocido también como velocidad de onda cinemática (Chanson, 2004).

El modelo de onda cinemática bidimensional para simular la escorrentía superficial y la concentración de flujo mediante un experimento con lluvias artificiales sobre una superficie irregular desarrollado por (Q.Q. y Chen, 2004), concluye que un modelo unidimensional no es capaz de generar la escorrentía y la concentración de flujo en pendientes irregulares debido a la delgada profundidad del agua y los límites superficiales de un terreno irregular, además concluyen que la concentración del flujo en superficies irregulares mostró que la pendiente de la superficie controla las líneas de dirección del flujo.

2.5.2. Onda de Difusión

La aproximación de ondas difusivas de las ecuaciones de Saint-Venant se utiliza comúnmente en modelos hidrológicos para describir procesos de flujo superficial (Sylvain, di Chiara-Roupert, y Ackerer, 2014), conocido también como cero inercia, este modelo considera muy importante las fuerzas inerciales y de presión como en el movimiento de una gran onda de creciente en un río ancho, sin embargo su exactitud es deficiente para hidrogramas que aumentan de manera muy rápida, por eso no es aplicable a rotura de presas (Chávarri Velarde, 2008; Montoya, D, y Toro, 2006).

$$\frac{\partial y}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2.7)$$

La ecuación resultante determina que la pendiente de la superficie de agua es igual a la pendiente de fricción. Para resolver la ecuación (2.7) y la ecuación de continuidad, en (Chávarri Velarde, 2008) se menciona que las técnicas de diferencias finitas han sido ampliamente utilizadas.

2.5.3. Onda Dinámica

La onda dinámica es el término utilizado para describir la ecuación unidimensional de Saint-Venant. De acuerdo con (Montoya et al., 2006) es recomendado para casos de

ríos de baja pendiente

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.8)$$

2.6. Ecuaciones de Saint-Venant en 1D

Las ecuaciones de Saint Venant unidimensionales para canal no prismático también se representa de la siguiente forma, ver ecuación(2.9).

$$\frac{\partial}{\partial t} U + \frac{\partial}{\partial x} F = H \quad (2.9)$$

donde:

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{pmatrix}; H = \begin{pmatrix} 0 \\ gI_2 + gA(S_0 - S_f) \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Su desarrollo se puede encontrar también en (Akan, 2006; Stoker, 1957; Toro, 2009; Vázquez-Cendón, 2015).

2.7. Ecuaciones de Saint-Venant en 2D

Las ecuaciones bidimensionales de Saint Venant son las siguientes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial (uvh)}{\partial y} = ghS_{0x} - ghS_{fx} + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + h\zeta v \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t} + \frac{\partial (uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = ghS_{0y} - ghS_{fy} + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - h\zeta u \quad (2.13)$$

Donde h es la profundidad del agua, u y v son las velocidades promediadas en profundidad en las direcciones x y y respectivamente, ρ es la densidad del agua, τ_{wx} y τ_{wy} son los esfuerzos cortantes superficiales por efectos de viento, ζ es el parámetro de Coriolis. S_{0x} y S_{0y} son pendientes de fondo en las direcciones x y y ; S_{fx} y S_{fy} son las pendientes de fricción (D. Salas y S. Govindaraju, 2014).

Si no se considera la fuerza de Coriolis, que para cauces de ríos no suele ser significativa, ni las tensiones efectivas, que tienen poca importancia con respecto a los otros términos, ni las tensiones producidas por el viento en la superficie libre, se pueden escribir las

ecuaciones de Saint Venant bidimensionales como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial (uvh)}{\partial y} = gh (S_{0x} - S_{fx}) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t} + \frac{\partial (uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = gh (S_{0y} - S_{fy}) \quad (2.16)$$

La forma vectorial de la ecuación de Saint-Venant se expresa como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = B \quad (2.17)$$

Donde

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

y

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ Cvh + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh (S_{0x} - S_{fx}) + S_{t1} \\ Cuh + \frac{\tau_{sy}}{\rho} + gh (S_{0y} - S_{fy}) + S_{t2} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Las tensiones tangenciales en la superficie τ_{sx} , τ_{sy} debidas al viento, se suelen despreciar a no ser que el tamaño de la superficie sometida a la acción del viento sea muy grande. En estos casos hay diferentes expresiones que por lo regular son de la forma:

$$\tau_{sx} = kW^2 \cos \theta_x \quad (2.20)$$

$$\tau_{sy} = kW^2 \cos \theta_y \quad (2.21)$$

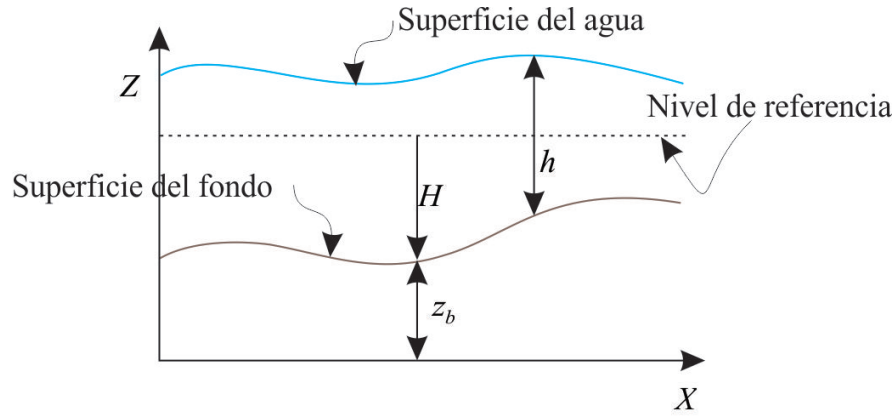
Donde k es un coeficiente empírico, W es la velocidad del viento y θ_x , θ_y son los ángulos que forma la dirección del viento con los ejes. Hay casos en que el exponente de W es distinto de 2 y se ajusta de manera experimental.

Se denomina pendiente geométrica S_0 según x o y a la derivada cambiada de signo de la cota del fondo respecto a x o y ; es decir, positiva si el fondo desciende en el sentido de las x ; crecientes y negativa en caso contrario y que están definidas en función de

la cota geométrica z_b , se expresan en función de H (ver Figura 2.1), que representa la distancia al fondo desde un nivel de referencia fijo, con sentido positivo hacia abajo, esto es:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (2.22)$$

Figura 2.1: Sección del dominio del flujo en un plano vertical y representación de variables H y h



Fuente: adaptado desde (Vázquez-Cendón, 2015)

Las tensiones en el fondo τ_{bx} , τ_{by} se calculan por medio de la fórmula de Chézy cuyo valor para las tensiones según x y y son:

$$\tau_{bx} = \rho g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2}, \quad \tau_{by} = \rho g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2} \quad (2.23)$$

El coeficiente C de Chézy depende del coeficiente de Manning n y está dado por:

$$C = \frac{R_h^{1/6}}{n} \quad (2.24)$$

R_h es el radio hidráulico, que suele tomarse igual a h . El coeficiente de rugosidad de Manning n se determina, en la práctica, a partir de medidas experimentales o se estima a partir de valores que ya han sido almacenados en tablas.

Se denominan como S_{fx} , S_{fy} a los términos (o pendientes) de fricción del agua con el fondo del cauce en cada una de las direcciones.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2.25)$$

Se denomina término turbulento a las siguientes expresiones:

$$S_{t1} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) \quad (2.26)$$

y

$$S_{t2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2v_t h \left[\frac{\partial v}{\partial y} \right] \right) \quad (2.27)$$

Las ecuaciones de Saint Venant son un caso concreto de sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólico, cuasi-lineal y con termino independiente. En su forma conservativa presentan grandes ventajas a la hora de plantear esquemas de resolución que permitan obtener soluciones con discontinuidades, una opción es recurrir a los métodos numéricos (Método de volúmenes finitos).

2.8. Modelos Hidráulicos Bidimensionales

A continuación se describen los diferentes programas de análisis bidimensional y los métodos numéricos que éstos utilizan internamente en sus cálculos.

2.8.1. Iber

Desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña, UDC) y el Instituto FLUMEN (Universitat Politècnica de Catalunya, UPC, y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE) Iber es un modelo matemático bidimensional, que en su módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Saint-Venant del flujo en lámina libre para aguas poco profundas por el método de volúmenes finitos en una malla no estructurada.

2.8.2. Hec-Ras 2D

Desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (Hec-Hydrologic Engineering Center) del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers) Hec-Ras 5.0.3 es una herramienta que ha venido evolucionando, y que a la fecha cuenta con una extensión que permite simular el flujo de agua en 1D, 2D y una combinación de ambas.

Hec-Ras en su nueva versión 5.0.3 resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en 2D mediante el método de los volúmenes finitos implícitos, para mallas estructuradas y no estructuradas que se describen a mayor detalle en el Capítulo ??.

2.8.3. River 2D

River 2D es un modelo hidrodinámico bidimensional creado específicamente para el modelamiento de ríos, es un modelo de elementos finitos basado en la formulación conservadora del método Petrov-Galerkin².

2.8.4. CCHE2D

Desarrollado por el Centro Nacional de Ingeniería Computacional e Hidrociencia (NC-CHE) de la universidad de Mississippi. CCHE es un modelo de flujo basado en las ecuaciones de Navier-Stokes. El conjunto resultante de ecuaciones se resuelve implícitamente utilizando el enfoque de volumen de control y método de los elementos eficiente.

²Es un método matemático utilizado para obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales que contienen términos con orden impar.

Capítulo III: Materiales y Métodos

3.1. Descripción General

Las ecuaciones de Saint-Venant, no disponen de una solución analítica, salvo para tipos de flujo y situaciones muy específicas (Chow y R. Larry W., 1994). Generalmente, la solución de estas ecuaciones se obtiene con el uso de los métodos numéricos, clasificados en cuatro grupos (Chaudhry, 2008): El método de las características, el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos.

Entre los métodos mencionados el de los volúmenes finitos es muy adecuado para sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólicos y no lineales como son las ecuaciones de Saint-Venant.

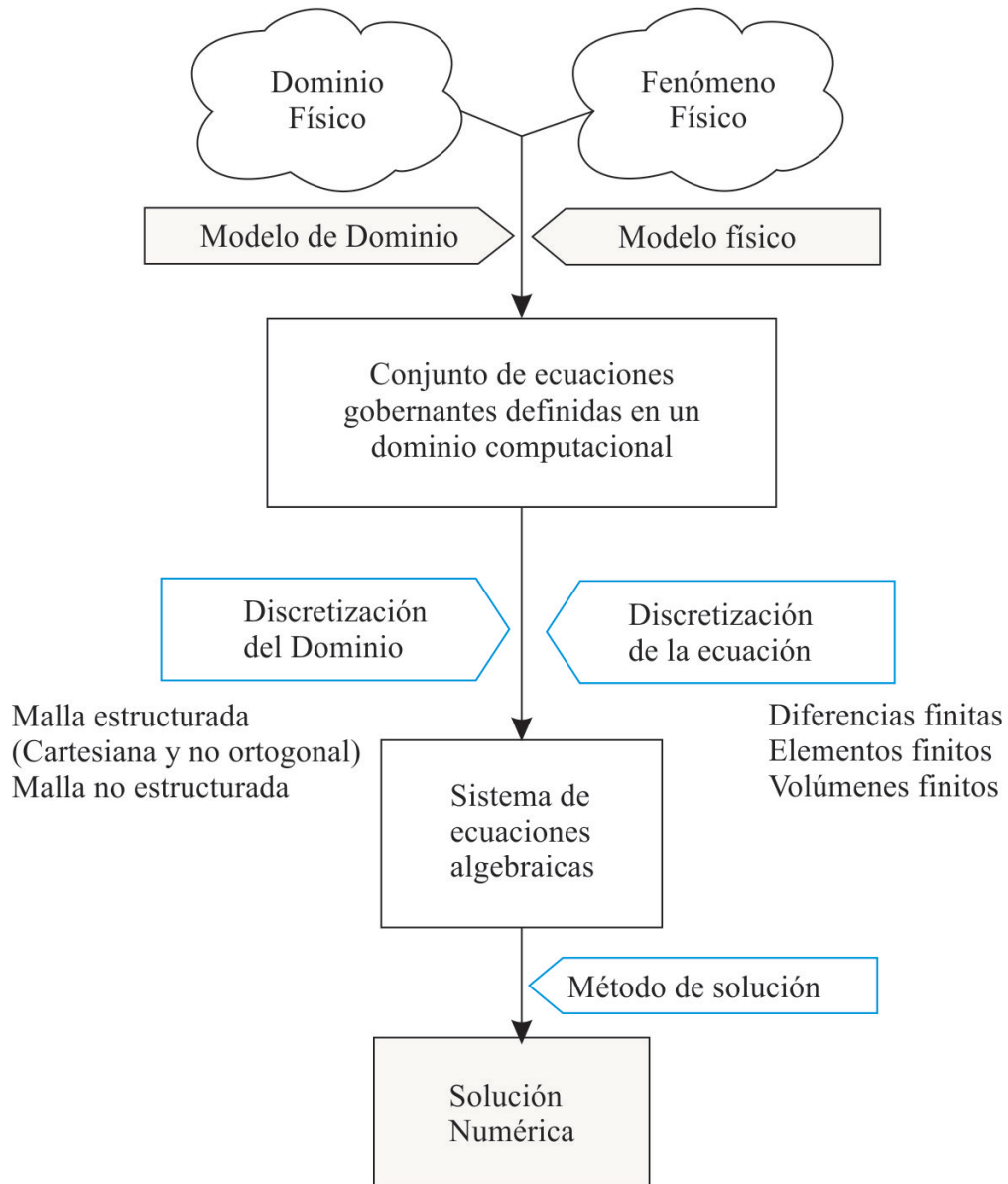
Este método es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para resolver problemas hidrodinámicos y es de interés en la presente investigación mostrar el desarrollo e interpretación, de tal forma se pueda aplicar en el modelamiento de cuencas y ríos con los programas Hec-Ras e Iber.

3.2. Solución de las ecuaciones de Saint Venant

3.2.1. Procesos de discretización

El proceso de discretización del dominio geométrico y los fenómenos físicos de interés siguen los procedimientos que se muestran en el siguiente esquema a continuación.

Figura 3.2: Procesos de discretización



Fuente: Adaptado desde (Moukalled, Mangani, y Darwish, 2016)

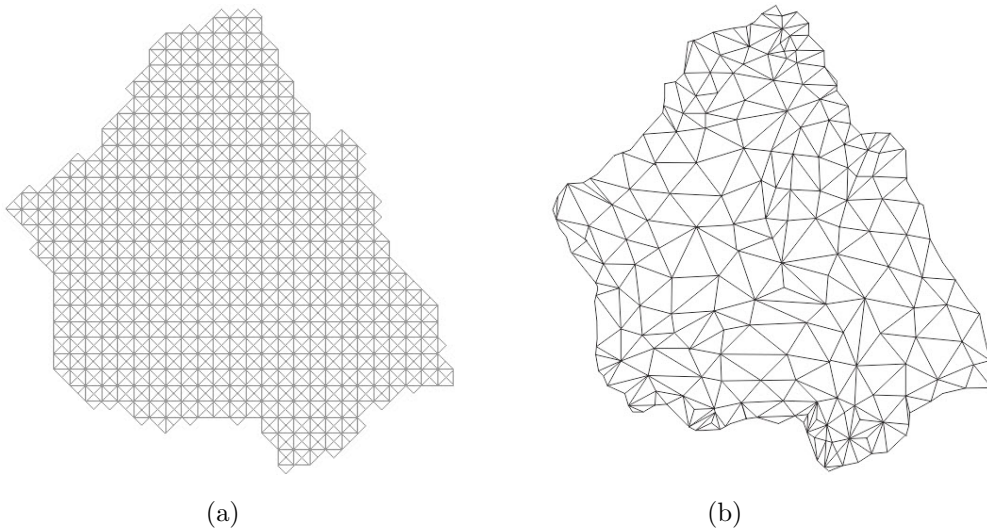
3.2.2. Discretización del dominio

La discretización geométrica consiste en transformar el dominio en una malla de nodos. Esto se logra mediante una variedad de técnicas que dan lugar a una amplia gama de tipos de malla. Estas mallas se clasifican de acuerdo con varias características: Estructura, ortogonalidad, bloques, forma de célula, disposición variable, etc. En todos los casos la malla se compone de elementos discretos definidos por un conjunto de vértices y delimitados por caras.

Características y tipos de mallado

La fase inicial para una simulación numérica comienza con la generación de una malla adecuada, esto es, decidir el tipo de malla para el dominio de interés, teniendo en cuenta las ventajas y limitaciones de cada una de ellas.

Figura 3.3: (a) Mallado estructurado, (b) Mallado no estructurado



Fuente: Elaboración propia

Mallas estructuradas

Es el tipo de malla mas simple y es equivalente a una malla cartesiana, comúnmente denominadas mallas de diferencias finitas, su mayor desventaja de este tipo de mallas es que no se adaptan muy bien en dominios con geometrías irregulares y acumulan puntos en regiones que no son de interés (Cardesa y Ignacio, 2014; Chapra y Canale, 2007; Nigro y Storti, 2007).

Mallas no estructuradas

Este tipo de mallas comprende triángulos generados a base de puntos aleatorios, como es el caso de la metodología de **triangulación de Delaunay** y es recomendado para dominios con geometría irregular (Chapra y Canale, 2007).

Triangulación de Delaunay: /dlo'ne/ Escrito fonéticamente “Deloné” denominado así por el matemático ruso Boris Nikolaevich Delone(1890 – 1980), consiste en una red de triángulos que cumple la condición de Delaunay.

Figura 3.4: Mallado no estructurado - Triangulación de Delaunay

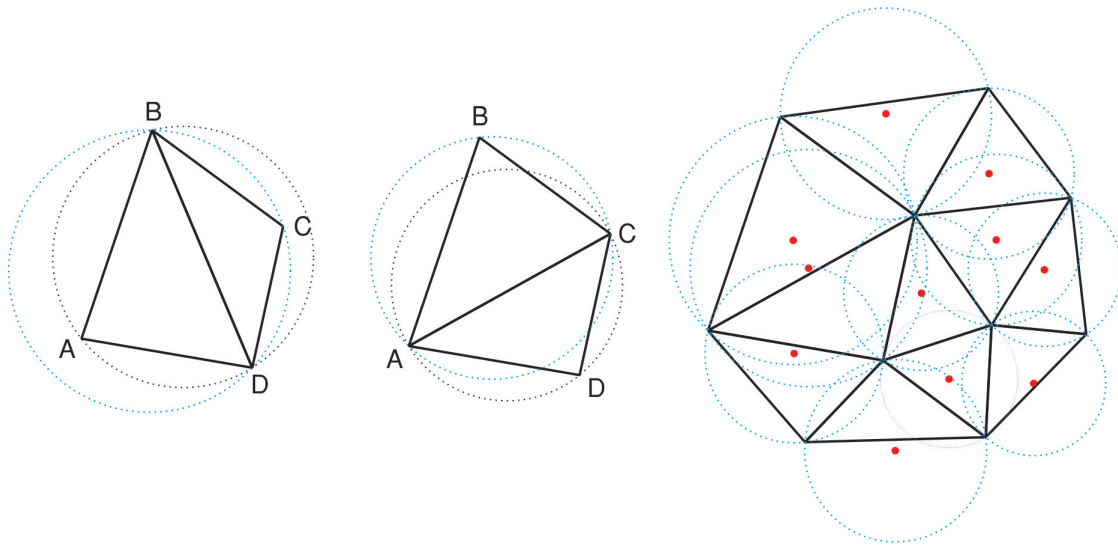


Figura 3.5: Fuente: Elaboración propia

Condición de Delaunay. De acuerdo a esta condición la circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red (ver Figura:3.5) no debe contener ningún vértice de otro triángulo, es decir, esta circunferencia circunscrita se denomina vacía si no contiene otros vértices aparte de los tres que la definen, y se denomina a una red de triángulos como triangulación de Delaunay si todas las circunferencias circunscritas de todos los triángulos son vacías, además esta condición asegura que los ángulos internos de los triángulos sean lo más grande. Es decir, maximiza la extensión del ángulo más pequeño de la red (Lee y Schachter, 1980; Rodríguez Tello, 2013).

Comparación de Mallado estructurado y no estructurado. En la Tabla 3.3 se muestra la comparación de las ventajas y desventajas que tienen las mallas estructuradas respecto a las mallas no estructuradas.

Tabla 3.3: Comparación del tipo de Mallado

Tipos de Malla	
Estructurada	No estructurada
Generación semi automática	Automática
Multibloque	Geometrias complejas
Alineación en contornos	Adaptabiliad
Menos memoria	Más memoria
Menos tiempo de cálculo	Más tiempo de cálculo

Fuente: Obtenido desde (Tizón Pulido, s.f.)

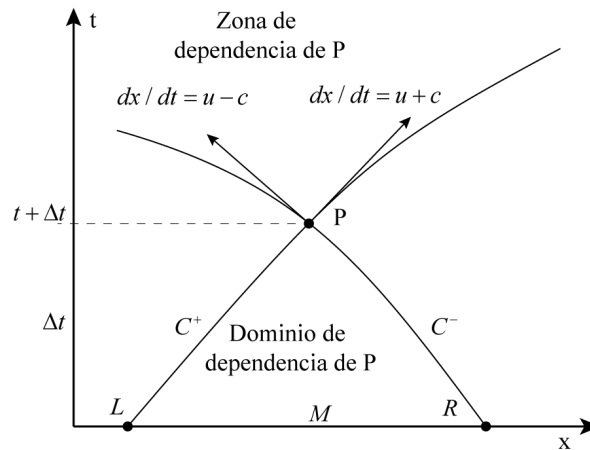
3.3. Métodos Numéricos

3.3.1. Método de las características

Desarrollado inicialmente como un método gráfico para la integración de ecuaciones diferenciales para analizar el comportamiento de oleadas en canales abiertos, propagación de ondas de inundación y otros problemas de flujo inestable (Chaudhry, 2008).

La transformación de las ecuaciones de flujo inestable en forma característica da lugar a dos familias de características que forman un tipo de coordenadas naturales cuyas ecuaciones se compone a lo largo de las direcciones características, C^+ y C^- (Sturm, 2001).

Figura 3.6: Líneas características unidimensionales en el espacio $x-t$



Fuente: Adaptado desde (Bladé Castellet, 2005; Sturm, 2001)

El significado de la forma característica están asociadas a las líneas representadas en la Figura 3.6, conocidas como líneas características o simplemente características. y es posible resolver las ecuaciones en el punto P donde se cruzan, que es la solución a las ecuaciones de Saint-Venant.

Las ecuaciones de Saint Venant para canal prismático (específicamente rectangular) en forma característica se representa como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (u \pm 2c) + (u \pm c) \frac{\partial}{\partial x} (u \pm 2c) = g(S_0 - S_f) \quad (3.28)$$

Produce una característica positiva (o hacia adelante):

$$C^+ : \frac{\partial}{\partial t} (u + 2c) + (u + c) \frac{\partial}{\partial x} (u + 2c) = g(S_0 - S_f) \quad (3.29)$$

y una característica negativa (o hacia atrás):

$$C^+ : \frac{\partial}{\partial t} (u - 2c) + (u - c) \frac{\partial}{\partial x} (u - 2c) = g(S_0 - S_f) \quad (3.30)$$

donde la celeridad o la velocidad de onda se describe como $c = \sqrt{gh}$.

La solución en el punto P para el instante $t + \Delta t$ se determina suponiendo que los dos puntos a la izquierda y a la derecha de P , L y R respectivamente son conocidos en el tiempo anterior t . Las derivadas parciales de las variables dependientes pueden escribirse como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_R - u_L}{\Delta x}, \quad \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{c_R - c_L}{\Delta x}, \quad \text{y} \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_p - u_M}{\Delta t}, \quad \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{c_p - c_M}{\Delta t}$$

En el que el punto medio M entre L y R , se pueden usar valores medios. Sustituyendo en la ecuación de momentum se tiene:

$$2c_M \frac{(c_R - c_L)}{\Delta x} + u_M \frac{(u_R - u_L)}{\Delta x} + \frac{(u_p - u_M)}{\Delta t} = g(S_0 - S_f)_M \quad (3.31)$$

esta ecuación es explícito en u_P

$$u_P = u_M + \frac{\Delta t}{\Delta x} (2c_M (c_R - c_L) + u_M (u_L - u_R) + g\Delta x (S_0 - S_f)_M) \quad (3.32)$$

similarmente para la ecuación de continuidad se tiene:

$$c_M \frac{(u_R - u_L)}{\Delta x} + 2u_M \frac{(c_R - c_L)}{\Delta x} + 2 \frac{(c_p - c_M)}{\Delta t} = 0 \quad (3.33)$$

esta ecuación es explícito en c_P

$$c_p = c_M + 0.5 \frac{\Delta t}{\Delta x} (2u_M (c_R - c_L) + c_M (u_L - u_R)) \quad (3.34)$$

Las expresiones del lado derecho de u_P y c_p permiten determinar la solución en el siguiente punto, ya que todas las variables de ese lado mencionado provienen de las condiciones ya conocidas en el instante del tiempo t y pueden usarse para calcular las soluciones en el tiempo $t + \Delta t$ moviéndose de un punto a otro usando cada uno de los puntos inferiores izquierdo y derecho, cuidando sin embargo de que la solución sea estable y precisa.

La estabilidad y la precisión se controlan mediante los valores Δt y Δx . Esta condición de estabilidad se refiere a menudo como el número Courant (C) o condición CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), este criterio de estabilidad es $\frac{\Delta x}{\Delta t} > 2(u + c)$, y $\Delta t <$

$\frac{\Delta t}{2(u+c)}$ y teniendo en cuenta la característica negativa, obtenemos el criterio de estabilidad como: $\frac{dx}{dt} < (u-c)$ ya que $dx = -\Delta x/2$, de donde $\frac{\Delta x}{\Delta t} > 2(c-u)$, lo cual es necesario porque $(c+u) > (c-u)$.

Para aplicar la condición CFL: $\Delta t < \frac{\Delta x}{2(c-u)}$, los valores de u y c deben ser conocidos.

Las ecuaciones características para canales naturales de las ecuaciones de Saint-Venant 1D se expresan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(u \pm \omega) + (u \pm c) \frac{\partial}{\partial x}(u \pm \omega) = g \left(\frac{I_2}{A} + S_0 - S_f \right) \quad (3.35)$$

donde

$$\omega = \int_0^A c \frac{dA}{A} = \int_0^y \sqrt{\frac{gA}{b}} b \frac{dy}{A} = \sqrt{\frac{gb}{A}} dy$$

ademas $c = \sqrt{g\frac{A}{b}}$; $u = \frac{Q}{A}$

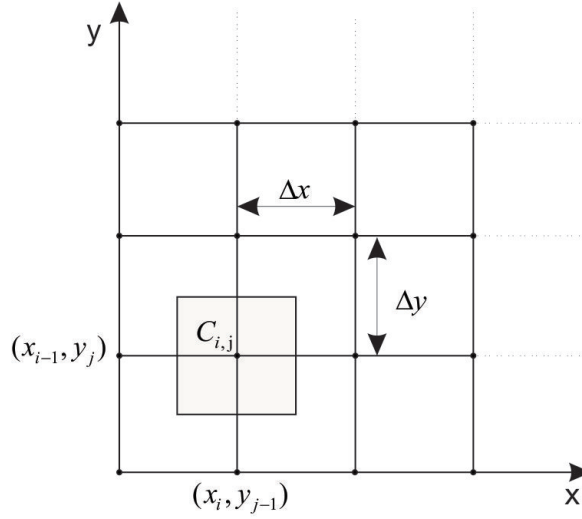
Las características de las ecuaciones de Saint Venant-bidimensionales no se describen en esta trabajo de investigación por las siguiente razón. El método de las características es útil para comprender la propagación de ondas y el desarrollo de condiciones de contorno para los métodos de diferencias finitas explícitas (Chaudhry, 2008; Sturm, 2001), sin embargo (Bladé Castellet, 2005; Chaudhry, 2008), describen que puede servir para canales prismáticos, pero su aplicación para canales no prismáticos y de geometría irregular es de una enorme complejidad y de resultados poco fiables, por lo que no son adecuados, ni han sido utilizados, para cauces fluviales.

Mayores detalles respecto al método de las características se pueden revisar en (Chaudhry, 2008, 2014; Fenton, 2010; R. Szymkiewicz, 2010).

3.3.2. Método de Diferencias Finitas

Este método es ampliamente utilizado debido a su simplicidad en la implementación. Sin embargo, es inadecuado para problemas con límites irregulares (Bailey, 2010). El desarrollo del método de diferencias finitas implica dividir el dominio geométrico en puntos nodales discretos.

Figura 3.7: Malla de diferencias finitas



Fuente: Adaptado desde (Rousseau, 2012)

Onda cinemática con un esquema de diferencias finitas

La forma vectorial de la ecuación de Saint-Venant para el modelo de transito distribuido de onda cinemática se reduce a la siguiente forma:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, F(U) = \begin{pmatrix} hu \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, G(U) = \begin{pmatrix} hv \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, B(U) = \begin{pmatrix} I - L \\ -gh(S_{0x} + S_{fx}) \\ -gh(S_{0y} + S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (3.36)$$

Para este modelo se utiliza un esquema centrado, previamente se calculan las descargas q_x y q_y ($q_x = hu$ y $q_y = hv$) y teniendo en cuenta la igualdad de la fricción y pendiente ecuación 2.3, se determina la altura de agua en el paso de tiempo $n + 1$ en la celda $C_{i,j}$ mediante la siguiente ecuación:

$$h_{i,j}^{n+1} = h_{i,j}^n - \Delta t \left(\frac{q_{x_{i+1},j}^{n+1} - q_{x_{i-1},j}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{q_{y_{i,j+1}}^{n+1} - q_{y_{i,j-1}}^{n+1}}{2\Delta x} \right) + I - L \quad (3.37)$$

El esquema de MacCormack de diferencias finitas, hasta ahora, es el mas utilizado y el mas conocido para las aplicaciones hidrológicas debido a sus simplicidad (Rousseau, 2012).

El esquema MacCormack con diferencias finitas consiste en un proceso de dos pasos (predictor-corrector) que permite la precisión de segundo orden.

Predictor

Se determina U en el momento $t + \Delta t$ usando valores conocidos en el tiempo t y diferencias hacia delante.

$$[U_{i,j}^{n+1}]_p = U_{i,j}^n + \Delta t \left(B(U_{i,j}^n) - \frac{F(U_{i+1,j}^n) - F(U_{i,j}^n)}{\Delta x} - \frac{G(U_{i,j+1}^n) - G(U_{i,j}^n)}{\Delta y} \right) \quad (3.38)$$

Corrector

$$\left(\frac{\partial U_{i,j}}{\partial t} \right)_{cor}^{n+1} = B([U_{i,j}^{n+1}]_p) - \frac{F([U_{i,j}^{n+1}]_p) - F([U_{i-1,j}^{n+1}]_p)}{\Delta x} - \frac{G([U_{i,j}^{n+1}]_p) - G([U_{i,j-1}^{n+1}]_p)}{\Delta y} \quad (3.39)$$

Entonces, tenemos la solución en el paso de tiempo $n + 1$ con un promedio entre el predictor y paso corrector.

$$U_{i,j}^{n+1} = \frac{U_{i,j}^n + [U_{i,j}^{n+1}]_p}{2} + \frac{\Delta t}{2} \left(\frac{\partial U_{i,j}}{\partial t} \right)_{cor}^{n+1} \quad (3.40)$$

Por otra parte, utilizamos un término de disipación con el fin de reducir las oscilaciones cerca de discontinuidades

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} - \left(\Delta x^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(D(x, y) \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \Delta y^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x, y) \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right) = B(U)$$

El coeficiente $D(x, y)$ (o viscosidad artificial), tiene que ser positivo y tomar valores entre $[0 - 10]$, para un valor constante y reescrito la ecuación anterior, se resuelve por un esquema centrado la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F^*(U)}{\partial x} + \frac{\partial G^*(U)}{\partial y} = B(U) \quad (3.41)$$

con $F^*(U) = F(U) - D\Delta x^2 \frac{\partial U}{\partial x}$, y $G^*(U) = G(U) - D\Delta y^2 \frac{\partial U}{\partial y}$

Una investigación de la simulación de ondas dinámicas de inundación en cauces naturales usando solución numérica de flujos inestables realizado por (Mirzazadeh y Akbari, 2012), concluye que el esquema de Preissmann es ventajosa sobre el método de diferencias finitas y considera que el modelo implícito de Preissmann tiene mayor estabilidad respecto al modelo explícito de Mc Cormack ya que su estabilidad de éste último de-

pende de la elección de pasos de tiempo pequeños.

3.3.3. Método de elementos finitos

La ventaja de este método es que se puede aplicar fácilmente a dominios con límites irregulares. El método de los elementos finitos se utiliza generalmente para problemas estructurales y mecánicos, ya que estos problemas pueden aproximarse bastante bien con menos celdas (mallas). Por otro lado, los problemas de fluido tienden a necesitar un número mucho mayor de celdas para obtener una buena aproximación, por lo que son preferibles otros métodos.

3.4. Método de volúmenes finitos

Conocido también como método de volumen de control y método de volumen integral, es un camino alternativo para la aproximación numérica de las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) (Chapra y Canale, 2007; Versteeg y Malalasekera, 2007). Fue inicialmente introducido por investigadores como McDonald (1971) y MacCormack y Paullay (1972) para la solución de las ecuaciones bidimensionales de Euler dependientes del tiempo, y posteriormente fue extendido a flujos tridimensionales por Rizzi e Inouye (1973) (Tu, Yeoh, y Liu, 2008).

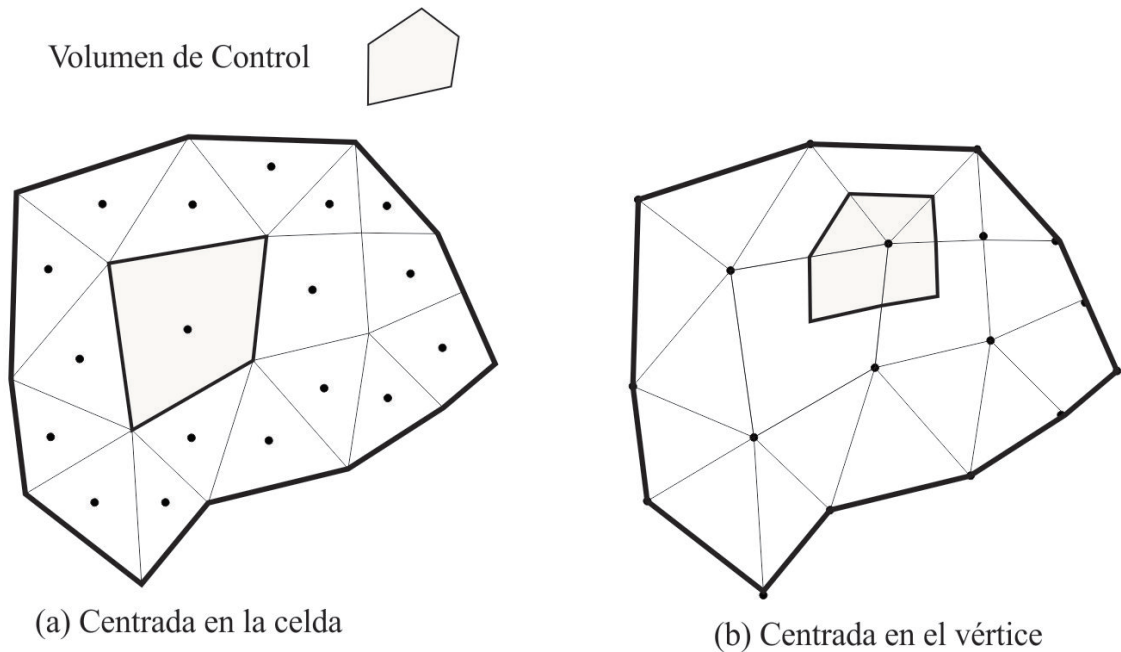
Una característica importante de este método es que se puede usar una malla de tipo “elemento finito”, en la que la malla puede estar formada por la combinación de triángulos o cuadriláteros en el caso de dos dimensiones.

Arreglo de variables

La discretización en volúmenes finitos para el caso 1D cuyo dominio representa la longitud se divide en n celdas o volúmenes finitos de tamaño irregular.

Mientras para la generación o construcción de los volúmenes finitos en 2D, existen diferentes metodologías para definir la forma y posición del volumen de control con respecto a la malla. La más sencilla consiste en utilizar la discretización espacial y ubicar el nodo de la celda o volumen finito en el centroide de cada elemento, conocida como generación de volúmenes finitos tipo celda. Otra opción es la generación de volúmenes de control tipo vértice donde el nodo se ubica en la misma.

Figura 3.8: Malla bidimensional de volúmenes finitos, (a) formulación centrada en la celda y (b) formulación centrada en el vértice



Fuente: Adaptado desde (Moukalled, Mangani, y Darwish, 2016; A. Szymkiewicz, 2013)

Formulación centrada en la celda: Los volúmenes finitos tipo celda tienen la ventaja de que se utiliza la discretización inicial como malla, con el inconveniente de que los valores de las variables se almacenan en el centro de la celda, lo que le resta claridad a la hora de imponer condiciones de contorno.

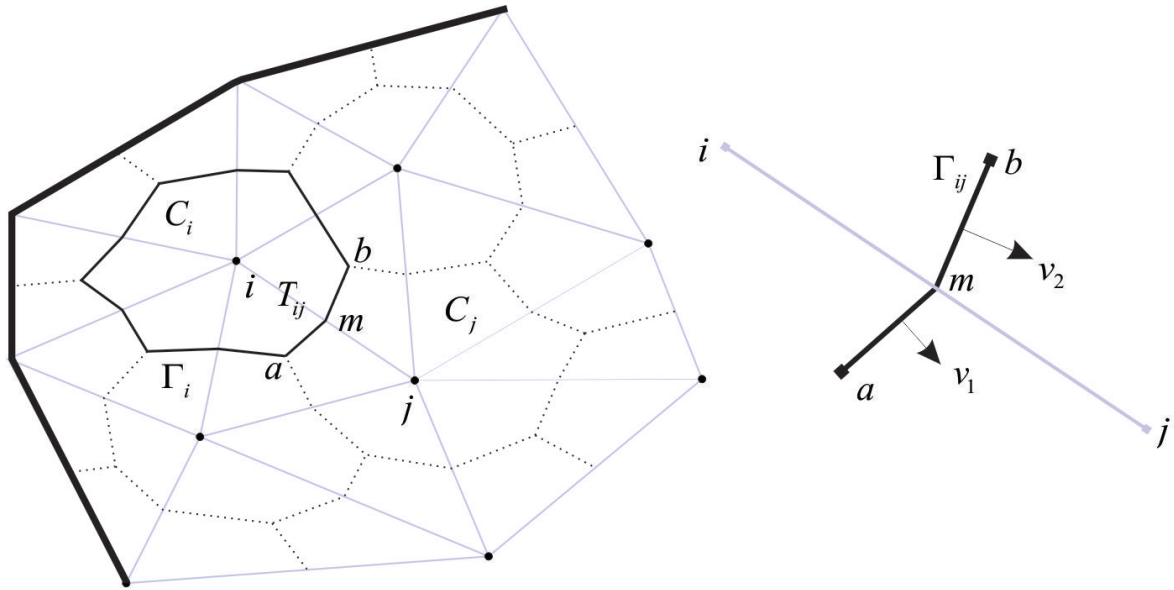
Formulación centrada en los vértices: En este caso las variables de flujo representan los valores en los vértices o los puntos de la malla.

Modelos numéricos implícitos versus explícitos

Los esquemas de soluciones numéricas son a menudo referidos como explícitos o implícitos. Un método numérico explícito es aquel en el que las variables dependientes son calculados directamente a través de valores ya conocidos. En este caso, cualquier operador de discretización puede ser evaluado directamente sobre la base de los valores reales de la variable. Por otro lado, se dice que un método numérico está implícito cuando las variables dependientes se tratan como incógnitas y se ensamblan para formar un conjunto acoplado de ecuaciones que luego se resuelven mediante herramientas numéricas especiales usando un algoritmo de solución directa o iterativa (Moukalled, Mangani, y Darwish, 2016; Szydłowski, 2004). Las ecuaciones de conservación tratadas en la dinámica de fluidos computacional son no lineales y el enfoque implícito es más

frecuentemente preferido que el método explícito para resolverlos.

Figura 3.9: Esquema general para la construcción de volúmenes finitos centrada en los vértices



Fuente: adaptado desde (Bermúdez y Dervieux, 2006)

En la figura 3.9 se tienen dos celdas C_i y C_j donde se denota por Γ_{ij} el lado común a ambas celdas, Γ_{ij} es lado cuyos segmentos son am y bm , donde a y b son baricentros de los triángulos que comparten el lado ij cuyo punto medio se representa con m . El conjunto de todos los nodos vecinos al nodo i se denota por κ_i . El vector normal a Γ_{ij} dirigido hacia el exterior de la celda C_i se define como

$$\eta_{ij} = \begin{cases} v_1 & \text{en el lado } am \\ v_2 & \text{en el lado } mb \end{cases}$$

donde $\tilde{\eta}_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{\|\eta_{ij}\|} = (\alpha, \beta)^T$, y las áreas de los triángulos que comparten el lado común en T_{ij} se determina como $A_{ij1} = \frac{\|v_1\| d_{ijam}}{2}$ y $A_{ij2} = \frac{\|v_1\| d_{ijmb}}{2}$ donde d_{ij} es la altura de cada uno.

Integración y discretización de las ecuaciones

El sistema de ecuaciones 2.17 se puede expresar de una forma mas compacta como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot f = B \quad (3.42)$$

Siendo ∇ el operador $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ y $\nabla \cdot f$ la divergencia de f

donde f es la expresión simbólica de los términos F y G .

$$f(U) = (F(U), G(U)) \quad (3.43)$$

La integral de superficie de cada volumen de control esta definido por:

$$\iint_{C_i} \frac{\partial U}{\partial t} dA + \iint_{C_i} \nabla \cdot f dA = \iint_{C_i} B dA \quad (3.44)$$

Al termino de flujo (segundo sumando) de la ecuación 3.44, se aplica el teorema de la divergencia, convirtiendo la integral de superficie en otra de linea sobre Γ_i , frontera de la celda C_i .

$$\iint_{C_i} \frac{\partial U}{\partial t} dA + \int_{\Gamma_i} f \cdot \tilde{\eta} dl = \iint_{C_i} B dA \quad (3.45)$$

La explicación de esta ecuación es que en cada volumen de control C_i , la variación de las variables conservativas de U en el tiempo se debe al flujo neto del vector f hacia dentro de la celda más la variación producida debido al término fuente B . Se detalla mejor este procedimiento en (Bermúdez y Dervieux, 2006; Alain Dervieux y Desideri, 1992).

Discretización de la derivada temporal

La solución de 2.17 se aproxima mediante unos valores de U_i^n constantes para cada celda C_i y cada instante de tiempo t_n .

La derivada temporal se discretiza mediante el método de Euler hacia adelante

$$\left. \frac{\partial U}{\partial \tau} \right|_{C_i, t_n} \approx \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} \quad (3.46)$$

reemplazando la ecuación 3.46 en 3.45 se tiene

$$\iint_{C_i} \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} dA + \int_{\Gamma_i} f \cdot \tilde{\eta} dl = \iint_{C_i} B dA \quad (3.47)$$

como U_i^{n+1} , U_i^n y Δt toman valores constates se tiene lo siguiente

$$\iint_{C_i} \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} dA = \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} A_i \quad (3.48)$$

Integración del término Flujo y el término Fuente

Del segundo sumando de la ecuación 3.47, se descompone la integral sobre el contorno de la celda en una sumatoria de integrales en cada una de las aristas $\Gamma_{i,j}, j \in \kappa_i$

$$\int_{\Gamma_i} f \cdot \tilde{\eta} dl = \sum_{j \in \kappa_i} \int_{\Gamma_{i,j}} f \cdot \tilde{\eta} dl \quad (3.49)$$

a su vez el termino fuente se descompone en una suma de integrales sobre su celda $T_{i,j}, j \in \kappa_i$

$$\iint_{C_i} B dA = \sum_{j \in \kappa_i} \iint_{T_{i,j}} B dA \quad (3.50)$$

reemplazando las ecuaciones 3.48, 3.49 y 3.50 en 3.47, se tiene

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} A_i + \sum_{j \in \kappa_i} \int_{\Gamma_{i,j}} f \cdot \tilde{\eta} dl = \sum_{j \in \kappa_i} \iint_{T_{i,j}} B dA \quad (3.51)$$

Discretización del flujo

La diferencia entre utilizar un esquema en volúmenes finitos u otro es como se discretizan los flujos numéricos.

El producto escalar $f \cdot \tilde{\eta}$ expresado en la ecuación 3.51 se denomina flujo 2D a través de un segmento longitud unidad

$$Z = f \cdot \tilde{\eta} = \tilde{\alpha} F + \tilde{\beta} G \quad (3.52)$$

$\tilde{\alpha}$ y $\tilde{\beta}$ son las componentes del vector unitario normal a la arista.

Para discretizar el flujo se utiliza el Q-esquema de Van Leer (Van Leer, 1977), esquema descentrado Upwind en los que el flujo numérico se obtiene de la siguiente forma:

$$\Phi(U_i^n, U_j^n, \tilde{\eta}_{ij}) = \frac{Z(U_i^n, \tilde{\eta}_{ij}) + Z(U_j^n, \tilde{\eta}_{ij})}{2} - \frac{1}{2} |Q(U_Q^n, \tilde{\eta}_{ij})| (U_j^n - U_i^n) \quad (3.53)$$

U_i^n y U_j^n representan los valores del vector de variables en los nodos i y j , Q es la matriz jacobiana del flujo.

$$Q = \frac{dZ}{dU} = \tilde{\alpha} \frac{dF}{dU} + \tilde{\beta} \frac{dG}{dU} \quad (3.54)$$

La matriz $|Q|$ se determina como:

$$|Q| = X |\Lambda| X^{-1} \quad (3.55)$$

Donde $|\Lambda|$ representa la matriz diagonal de los valores absolutos de los autovalores de Q , y X es la matriz cuyas columnas son los autovectores de Q . En el Q-esquema de Van Leer, $|Q|$ se evalúa en el estado intermedio.

$$U_Q^n = \frac{U_i^n + U_j^n}{2} \quad (3.56)$$

La expresión 3.53 que discretiza el flujo en 2D en un punto intermedio entre i y j se obtiene como la semisuma en ambos puntos más un término de descentrado.

Si observamos la ecuación 3.54 notamos que las derivadas de F y G respecto al vector de variables U son los factores que aparecen en la ecuación 2.17 en su forma no conservativa.

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{dF}{dU} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{dG}{dU} \frac{\partial U}{\partial y} = B \quad (3.57)$$

Es importante observar que las ecuaciones Saint Venant constituyen un sistema estrictamente hiperbólico; es decir, que la matriz jacobiana del flujo tiene tres autovalores distintos y tres autovectores linealmente independientes por lo que siempre existirá X^{-1} , en efecto.

$$\frac{dF}{dU} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -u^2 + gh & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{pmatrix}$$

$$\frac{dG}{dU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -uv & v & u \\ -v^2 + gh & 0 & 2v \end{pmatrix}$$

Reemplazando en la ecuación 3.54 resulta:

$$\frac{dZ}{dU} = \begin{pmatrix} 0 & \tilde{\alpha} & \tilde{\beta} \\ \tilde{\alpha}(-u^2 + gh) + \tilde{\beta}(-uv) & 2\tilde{\alpha}u + \tilde{\beta}v & \tilde{\beta}u \\ \tilde{\alpha}(-uv) + \tilde{\beta}(-v^2 + uv) & \tilde{\alpha}v & \tilde{\alpha}u + 2\tilde{\beta}v \end{pmatrix} \quad (3.58)$$

Los autovalores de la matriz jacobiana son:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \tilde{\alpha}u + \tilde{\beta}v \\ \lambda_2 &= \lambda_1 + c \\ \lambda_3 &= \lambda_1 - c\end{aligned}$$

Donde c es la celeridad de onda, $c = \sqrt{g\bar{h}}$ y los autovectores resultantes son:

$$\nu_{\lambda_1} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\tilde{\beta}c \\ \tilde{\alpha}c \end{pmatrix}, \nu_{\lambda_2} = \begin{pmatrix} 1 \\ u + \tilde{\alpha}c \\ v + \tilde{\beta}c \end{pmatrix} \text{ y } \nu_{\lambda_3} = \begin{pmatrix} 1 \\ u - \tilde{\alpha}c \\ v - \tilde{\beta}c \end{pmatrix}$$

Por lo tanto

$$\begin{aligned}|\Lambda| &= \begin{pmatrix} |\lambda| & 0 & 0 \\ 0 & |\lambda_2| & 0 \\ 0 & 0 & |\lambda_3| \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -\tilde{\beta}u & u + \tilde{\alpha}c & u - \tilde{\alpha}c \\ \tilde{\alpha}c & v + \tilde{\beta}c & v - \tilde{\beta}c \end{pmatrix} \\ X^{-1} &= \frac{1}{2c} \begin{pmatrix} 2\tilde{\beta}u - 2\tilde{\alpha}v & -2\tilde{\beta} & 2\tilde{\alpha} \\ c - \tilde{\alpha}u - \tilde{\beta}v & \tilde{\alpha} & \tilde{\beta} \\ c + \tilde{\alpha}u + \tilde{\beta}v & -\tilde{\alpha} & -\tilde{\beta} \end{pmatrix}\end{aligned}\tag{3.59}$$

Reemplazamos $\Phi(U_i^n, U_j^n, \tilde{\eta}_{ij})$ de la ecuación 3.53 por $\Phi_{i,j}^n$ y la sumatoria de integrales de línea de 3.51 se discretiza como:

$$\sum_{j \in \kappa_i} \int_{\Gamma_{ij}} f \cdot \tilde{\eta} dl \cong \sum_{j \in \kappa_i} \int_{\Gamma_{ij}} \Phi_{ij}^n dl = \sum_{j \in \kappa_i} \Phi_{ij}^n \int_{\Gamma_{ij}} dl,\tag{3.60}$$

de donde

$$\sum_{j \in \kappa_i} \int_{\Gamma_{ij}} f \cdot \tilde{\eta} dl \cong \sum_{j \in \kappa_i} \|\eta_{ij}\| \Phi_{ij}^n\tag{3.61}$$

Discretización del término fuente

Representamos B como $B = B_0 + B_f$ donde

$$B_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{0x} \\ ghS_{0y} \end{pmatrix} \text{ y } B_f = \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix}, \quad (3.62)$$

la fuente discreta en cada sub celda T_{ij} se define como

$$\psi = X (I - |\Lambda| \Lambda^{-1}) X^{-1} \widehat{B}_0 + \widehat{B}_f \quad (3.63)$$

donde $X,^{-1},|\Lambda|$ y Λ^{-1} dependen de $(U_Q^n, \tilde{\eta}_{ij})$ por lo que $\psi = \psi(N_i, N_j, U_i^n, U_j^n, \tilde{\eta}_{ij})$, $\widehat{B}_0 = \widehat{B}_0(N_i, N_j, U_i^n, U_j^n, \tilde{\eta}_{ij})$ y $\widehat{B}_f = \widehat{B}_f(U_i^n)$

las matrices $|\Lambda|$, X y X^{-1} son las mismas presentadas en las ecuación 3.59 y

$$\Lambda^{-1} = \begin{pmatrix} 1/\lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/\lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\lambda_3 \end{pmatrix}$$

$$\widehat{B}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ g \frac{h_i^n + h_j^n}{2} \frac{H_j - H_i}{d_{ij}} \tilde{\alpha} \\ g \frac{h_i^n + h_j^n}{2} \frac{H_j - H_i}{d_{ij}} \tilde{\beta} \end{pmatrix}$$

$$\widehat{B}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ gh_i^n (-S_{fx})_i^n \\ gh_i^n (-S_{fy})_i^n \end{pmatrix}$$

reemplazando a $\psi(N_i, N_j, U_i^n, U_j^n, \tilde{\eta}_{ij})$ por ψ_{ij}^n se tiene

$$\sum_{j \in \kappa_i} \iint_{T_{i,j}} B dA \cong \sum_{j \in \kappa_i} \iint_{T_{i,j}} \psi_{ij}^n dA = \sum_{j \in \kappa_i} \psi_{ij}^n \iint_{T_{i,j}} dA$$

por lo tanto

$$\sum_{j \in \kappa_i} \iint_{T_{i,j}} B dA \cong \sum_{j \in \kappa_i} A_{ij} \psi_{ij}^n \quad (3.64)$$

La ecuación 3.45 discretizada pasa a tomar la forma

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} A_i + \sum_{j \in \kappa_i} \|\eta_{ij}\| \Phi_{ij}^n = \sum_{j \in \kappa_i} A_{ij} \psi_{ij}^n \quad (3.65)$$

de donde

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\Delta t}{A_i} \left(\sum_{j \in \kappa_i} A_{ij} \psi_{ij}^n - \sum_{j \in \kappa_i} \|\eta_{ij}\| \Phi_{ij}^n \right) \quad (3.66)$$

Esta ecuación proporciona un método iterativo explícito en el tiempo para calcular el valor del vector de variables:

$$U_i^{n+1} = \begin{pmatrix} h_i^{n+1} \\ (hu)_i^{n+1} \\ (hv)_i^{n+1} \end{pmatrix}$$

Entradas y abstracciones en la adaptación de las ecuaciones de Saint-Venant

Dentro de la ecuación de Saint-Venant 2D, la inclusión de (I-L) que hace referencia a las entradas (intensidad) y abstracciones, específicamente componentes de lluvia, evapotranspiración e infiltración, se representan de la siguiente manera.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = I - L \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial (uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial (uvh)}{\partial y} = gh (S_{0x} - S_{fx}) \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial (vh)}{\partial t} + \frac{\partial (vvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = gh (S_{0y} - S_{fy}) \quad (3.69)$$

y la solución obedece a los mismos pasos mostrados anteriormente.

3.4.1. Condición de estabilidad

La estabilidad y la exactitud pueden ser alcanzadas seleccionando un paso del tiempo que satisfaga la condición del número de Courant, conocido también como (CFL) descrito por Richard Courant, Kurt Friedrich y Hans Lewy en 1928, es el cociente entre el espacio, velocidad y el tiempo. Su condición es de convergencia en ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (Brunner, 2016).

$$C = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta x}{u}} = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 \quad (3.70)$$

Este valor es usado para incrementar el tiempo de simulación que da inicio al próximo paso $t + \Delta t$, de esta manera se optimiza el incremento en el tiempo de cada paso, obteniéndose una mayor eficiencia computacional (Fe Marqués, 2005).

Otra manera de representar la condición de estabilidad es.

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{U + \sqrt{g \cdot h}} \quad (3.71)$$

Siendo Δx el tamaño de celda, U la velocidad del agua, g la aceleración de la gravedad, h la altura de agua y CFL un parámetro que debe estar entre 0 y 1.

Capítulo IV: Resultados y Discusión

4.1. Descripción General

El propósito de este capítulo es la transformación de la lluvia o precipitaciones netas en escorrentía (Hidrogramas) para distintas variaciones de tiempo mediante diferentes métodos y herramientas de cálculo, así mismo el tránsito hidráulico de flujo no permanente en un tramo de 1.5 km del río Entaz ubicado en Villa Rica, departamento de Pasco.

El hietograma de precipitación empleado en los modelos bidimensionales para el caso de aplicación de la cuenca del río Entaz son determinados en base al método de IILA-SENAMI-UNI para una duración de 3 horas, esto debido a la escases de estaciones que ofrecen información de registros pluviómetros en el área de influencia de la cuenca.

En el caso del río se analiza teniendo en cuenta las características naturales de la secciones y considerando una protección lateral con muros en los últimos 500 m del canal, el propósito de estos dos análisis es ver el comportamiento del flujo en condiciones normales del canal y cuando se realiza una modificación de la sección natural con estructuras de protección (muro de gaviones de 4 metros de alto). Además La finalidad de este proceso es comparar los parámetros hidráulicos del flujo con dos herramientas de análisis a nivel 1D y 2D Hec-Ras y 2D Iber.

Finalmente se realiza una evaluación de estabilidad e inestabilidad de los modelos bidimensionales, así como la incidencia en los resultados del coeficiente de rugosidad de Manning tanto para el análisis de cuencas y ríos.

4.2. Aplicación 2D al modelamiento de Cuencas

4.2.1. Características generales de la cuenca

Localización

La cuenca del río Entaz se encuentra localizada geográficamente en la Zona 18L del sistema WGS84 entre las coordenadas UTM Este 464000-478000m y coordenadas UTM norte 8812000-8826000 m, políticamente pertenece al distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa del departamento de Pasco.

Clima

Considerada como una cuenca media situada en una altitud entre 630 m.s.n.m. y 2400 m.s.n.m. tiene una temperatura promedio de $17.7^{\circ}C$, una precipitación pluvial promedio anual de 1500mm con una humedad relativa media de 89 % (Portal turístico Selva Central, 2017)

Tabla 4.4: Parámetros climáticos promedio de Villa Rica

Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T. máx. ($^{\circ}C$)	27.5	28	28	26.5	23	20	19	19	20	21.5	23	25
T. min. ($^{\circ}C$)	18.5	19	18.5	17	15.5	14	13.5	13	14	14	15.5	16.5

Fuente: <http://www.accuweather.com/es/pe/peru-weather>

En la tabla 4.4 se muestran las temperaturas promedio de Villa Rica máximos y mínimos promedios mensuales.

4.2.2. Características Físicas de la Cuenca

De acuerdo con el inventario de Evaluación e Investigación de los Recursos Naturales de la zona Villa Rica y puerto Pachitea, realizado en agosto de 1970 por el Instituto Nacional de Planificación-Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN), en base a un estudio foto interpretativo, delimita los siguientes seis paisajes característicos que guardan estrecha relación con su forma y constitución litológica como: Paisajes de tierras aluviales, de colinas bajas, de Pie de Monte, de Cerros Bajos, de Penillanura Disectada y paisajes Montañosos.

En general la superficie de la cuenca del río Entaz presenta una compleja geomorfología con topografía irregular cubierta de una vegetación abundante y heterogénea, clasificándose como Bosque Húmedo Sub Tropical-BHST y conformado mayormente por arcillas y areniscas con potenciales de fertilidad natural pobre, así mismo por terrenos aluviales en las riberas de los ríos (ONERN, 1970).

4.2.3. Características Morfológicas de la Cuenca

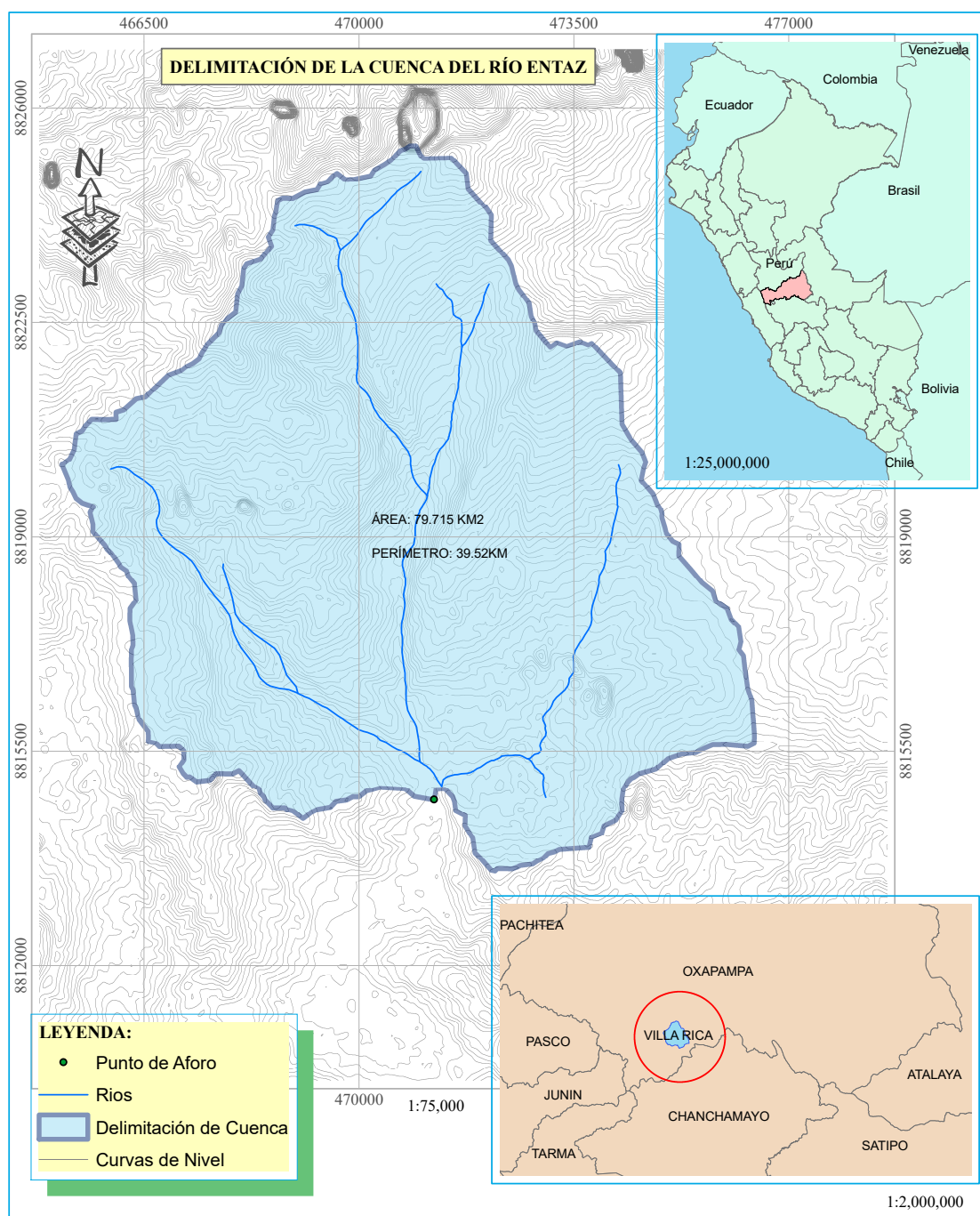
En la Tabla 4.5 se describen las características morfométricas de la cuenca en la Figura 4.34, determinados mediante el uso de los programas Global Mapper v17.1 y ArgGis 10.2 (Canchari G., 2013).

Tabla 4.5: Parámetros morfométricos de la Cuenca del Río Entaz

Descripción	Und.	Valor
Área	km2	79.715
Perímetro de la cuenca	km	39.52
Cotas		
Cota Máxima	msnm	3008
Cota Mínima	msnm	1500
Centroide (WGS 1984 UTM Zona 18S)		
X Centroide	m	470775.55
Y Centroide	m	8819271.93
Z Centroide	msnm	2212.89
Altitud		
Altitud Media	msnm	2212.89
Altitud mas frecuente	msnm	1813.16
Altitud de frecuencia media (1/2)	msnm	2123.97
Pendiente		
Pendiente promedio de la cuenca	%	6.973
Parámetros de la red hidrica		
Longitud del curso principal	km	13.059
Orden de la red hídrica	Und	5
Longitud de la red hídrica	km	230.57
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1.07
Parámetros Generados		
Tiempo de concentración	horas	1.10
Pendiente del cauce principal	m/km	115.48

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10: Delimitación de la Cuenca del río Entaz



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos (Aguirre, 2007), la clasificación de cuencas según el área se considera como una micro-cuenca para ($7970.05 < 10000\text{ha}$), así mismo por el tipo de escurrimiento se clasifica en tipo vertiente y de caudal permanente.

Las coordenadas UTM del punto de aforo son E:471304 y N:8814714 ubicado exactamente en el puente conocido como el Colorado.

Uso y Cobertura de Suelo

Las condiciones de superficie de drenaje tienen un impacto significativo en la escorrentía directa, por ello es necesario su correcta clasificación en uno de los cuatro grupos hidrológicos existentes. Estos grupos son A, B, C y D, donde el grupo A representa un potencial de escurrimiento mínimo y el grupo D un potencial de escurrimiento alto. Para asignar a un suelo un grupo determinado hay que considerar su composición, su textura y la profundidad del nivel freático. La siguiente tabla 4.6 muestra los rangos de tasas de infiltración y texturas asociadas con cada grupo de suelos hidrológicos.

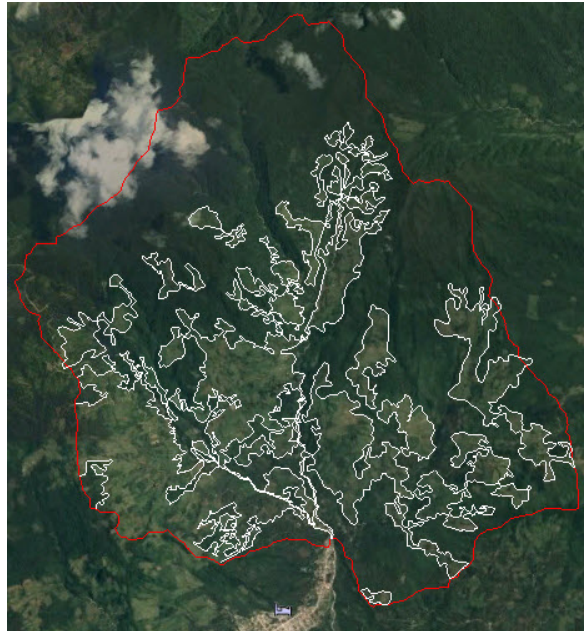
Tabla 4.6: Clasificación del grupo hidrológico del suelo

Tipo de Grupo	Tasa de Infiltración	Textura
A	0.30–0.45 in/hr	Arenas y gravas, son suelos que tienen un alto índice de infiltración (bajo potencial de escorrentía), Estos suelos presentan una tasa elevada de transmisión de agua.
B	0.15–0.30 in/hr	Suelos poco profundos, tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
C	0.05–0.15 in/hr	Son suelos con bajo contenido orgánico, altos contenidos de arcilla, de textura moderadamente fina o muy fina. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua lenta.
D	<0.05 in/hr	Suelos que tienen un índice de infiltración muy lento (alto potencial de escorrentía) cuando están completamente húmedos, se expanden significativamente cuando se mojan, son arcillas altamente plásticas con alto nivel freático.

Fuente: Adaptado desde (Durrans, 2003)

De acuerdo con (Portal turístico Selva Central, 2017), el suelo de la cuenca del río Entaz tiene una ligera capa agrícola con presencia de bosques densos cuyos árboles llegan a medir hasta más de 30 m de altura, parte de estas zonas están generalmente cubiertas de neblinas, que dan al ambiente una alta humedad.

Figura 4.11: Clasificación de la cobertura vegetal - cuenca del río Entaz



Fuente: Elaborado en Google Earth

En cuanto al uso de suelo se tiene que el 67.65 % de la cuenca del río Entaz esta cubierta de bosque, 32 % es de pastizales y áreas de cultivo con presencia de abundante vegetación y un porcentaje mínimo esta conformada de ríos y áreas urbanas.

Para una mejor visualización de la cobertura que compone la cuenca en estudio, se muestra una imagen satelital acompañada de las fotografías del sitio (Figura 4.12).

Figura 4.12: Características del tipo de cobertura que compone la cuenca del río Entaz



(a) Imagen Satelital Cuenca del río Entaz

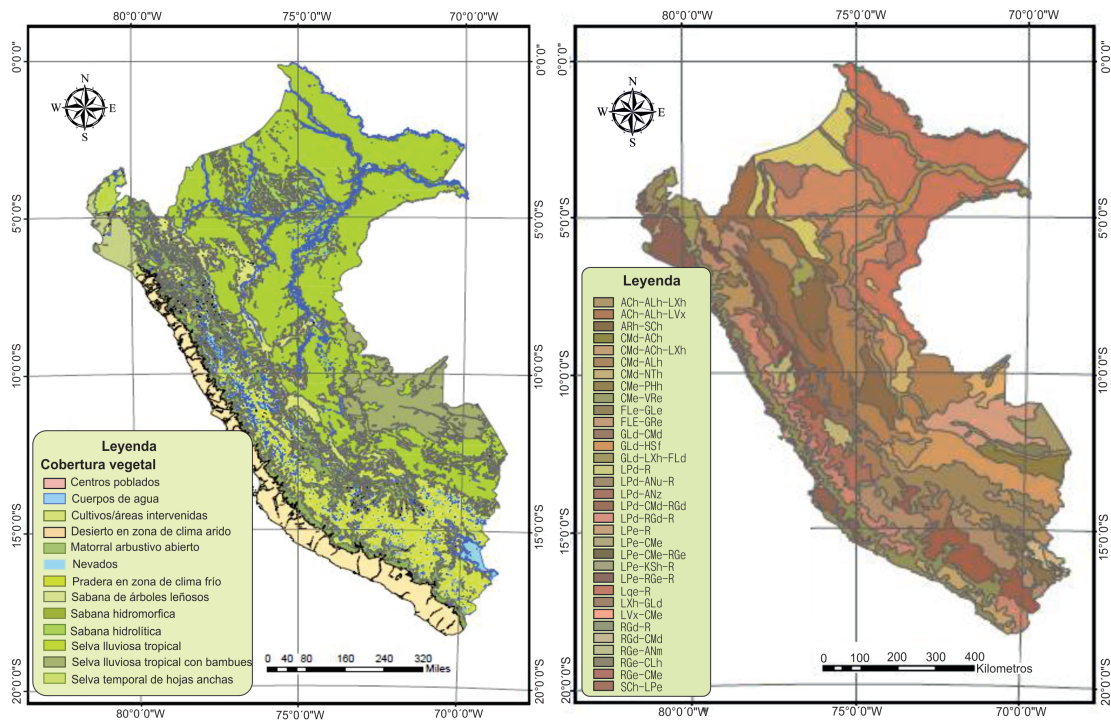
(b) Bosque Sollet,2010

(c) Bosque Sollet,2010

Fuente: Obtenido desde Google Earth

Otra manera práctica es la clasificación a partir del Sistema de Información Geográfica (SIG) que se pueden obtener desde las paginas del Ministerio del Ambiente (MINAM) y la (ONERN), mapas en formato shapefile de cobertura vegetal y usos de suelo del Perú, el mismo que utilizó la Autoridad Nacional del Agua (ANA) para la clasificación de números de curva (CN) a nivel del territorio nacional.

Figura 4.13: Mapa de cobertura vegetal y usos de suelos



(a) Mapa de cobertura vegetal

(b) Mapa de usos de suelo

Fuente: Obtenido desde (ANA, 2015)

Número de Curva (CN)

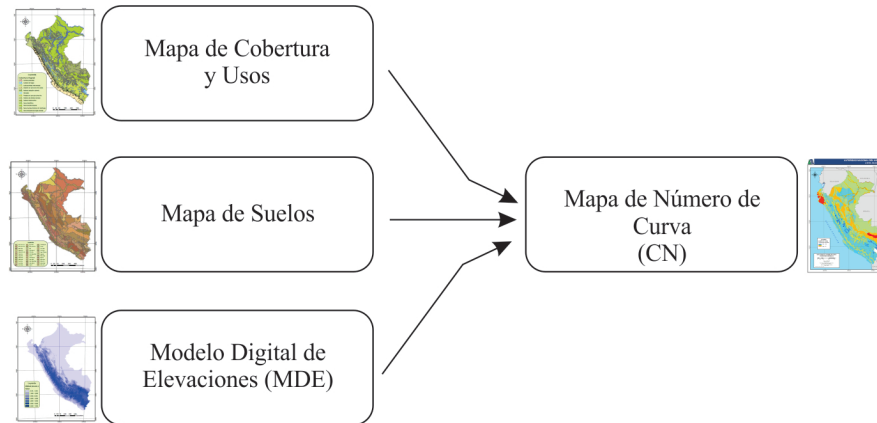
El número de curva es un parámetro empírico, desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS), ahora denominado Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los EE.UU. (NRCS). Es un valor adimensional que varía de 0 a 100, donde una superficie con $CN=0$ no tiene escurrimiento y con $CN=100$ es impermeable y toda la precipitación genera escorrentía.

Los números de curva se aplican para condiciones antecedentes de humedad normales (Condición II); para condiciones secas (Condición I) o condiciones húmedas (Condición III)

Con información de mapas temáticos de cobertura y uso, mapa temático de suelo y MDE, y en base a valores para cada grupo hidrológico de suelos teóricos, la ANA

generó el mapa de número de curva a escala del territorio nacional siguiendo el modelo conceptual mostrado en la Figura 4.14 para tres condiciones (Normal, seca y húmedo), diferenciándose estas condiciones de la siguiente manera, ver Tabla 4.7.

Figura 4.14: Modelo Conceptual



Fuente: Adaptado desde (ANA, 2015)

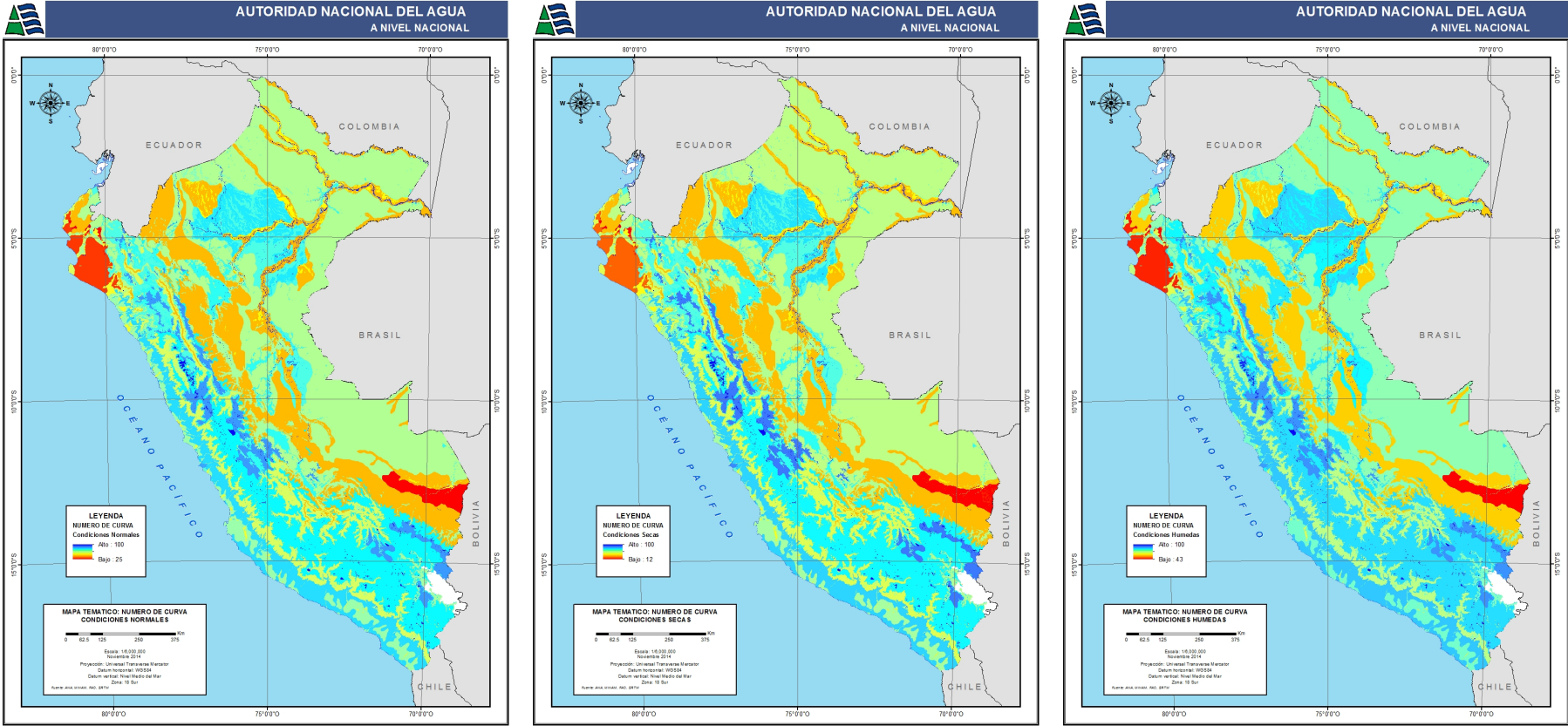
Tabla 4.7: Variación de CN para diferentes condiciones

Condición	Rango CN
Normal	25-100
Seca	12-100
Húmedo	43-100

Fuente: Adaptado desde (ANA, 2015)

En la Figura 4.15 se muestran las mapas para las tres condiciones mencionadas

Figura 4.15: Mapa temático: Número de curva para condiciones normales, secas y húmedas



(a) Número de curva, condiciones normales

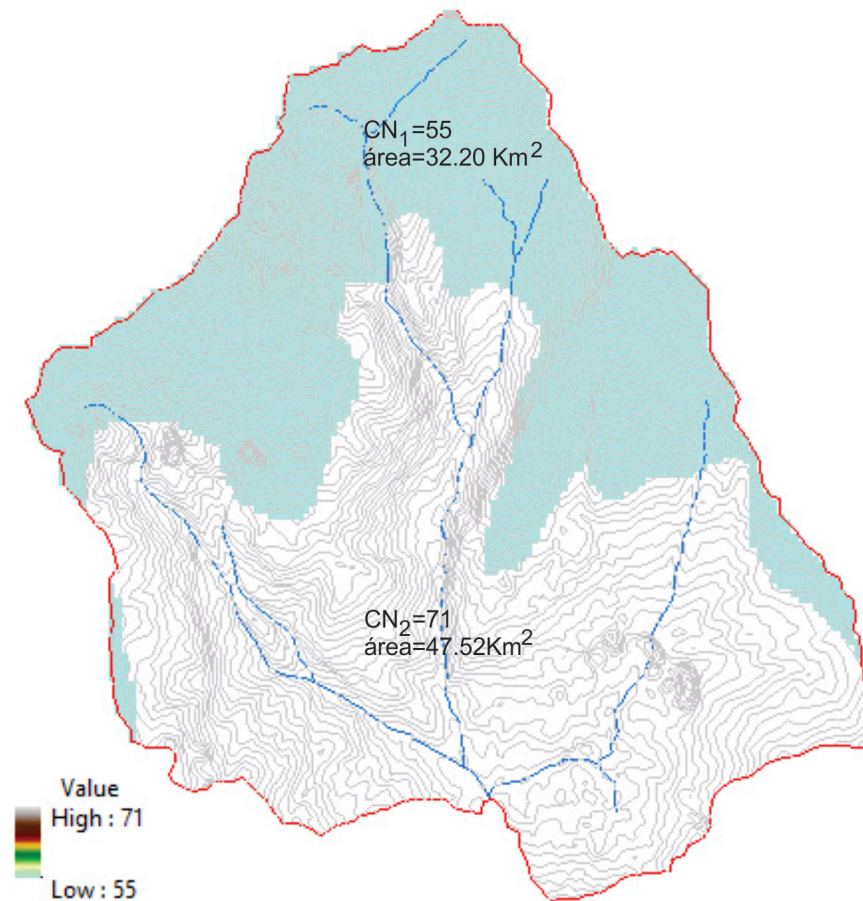
(b) Número de curva, condiciones secas

(c) Número de curva, condiciones húmedas

Fuente: <http://geo.ana.gob.pe/geohidrov2/>

Como recomendaciones del uso de estos datos se especifica que, debido a que el mapa de cobertura es una de las variables mas vulnerables, ya sea por las actividades que el hombre realiza día a día y estos cambios de uso altera directamente a los valores adimensionales del número de curva que se hayan generado, es necesario que en todo estudio hidrológico sean ajustados estos valores.

Figura 4.16: Número de curva para condiciones normales-cuenca del río Entaz



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.16 se muestra la selección del número de curva correspondiente a la cuenca del río Entaz obtenido desde la información del mapa temático mostrado en la Figura 4.15, del cual se observa que la cuenca analizada se subdivide en 2 grupos de CN, dato importante para el uso en modelos hidrológicos de precipitación escorrentía.

Para determinar el número de curva ponderado se utiliza la siguiente ecuación obtenido desde (TR-55, 1986; McCuen, 1998).

$$CN_w = \frac{\sum_{i=1}^n CN_i \cdot A_i}{A_t} \quad (4.72)$$

Tabla 4.8: CN ponderado para las tres condiciones

Condición	CN	Area(Km2)	CNw
Normal	$CN_1=55$	32.20	65
	$CN_2=71$	47.52	
Seca	$CN_1=34$	32.20	44
	$CN_2=51$	47.52	
Húmeda	$CN_1=74$	32.20	80
	$CN_2=85$	47.52	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4.8 se muestra el CN ponderado para una condición normal, seca y húmeda de la Cuenca del río Entaz. Teniendo presente que la humedad del suelo constituye uno de los principales condicionantes de la respuesta al escurrimiento, es fundamental obtener estimaciones más precisas a través de un ajuste adecuado de la humedad para las predicciones del proceso lluvia escorrentía (ANA, 2015).

Tiempo de Concentración

Definido como el tiempo que tarda el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado en llegar a la salida de la cuenca.

Se entiende también como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de la superficie de una cuenca contribuyan agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida, representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante.

En la literatura existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración propuestas por diferentes autores como: Témez, William, Kirpich, California Culvert Practice, etc. Para el caso de la aplicación se utilizaron algunos de estas expresiones que se muestran a continuación en la tabla 4.9.

Tabla 4.9: Tiempo de concentración (T_c) por diferentes métodos

Descripción	Ecuación	Tc (horas)
Kirpich (1940)	$T_c = 0.4(L)^{0.77}(s)^{-0.385}$	1.37
California Culvert Practice	$T_c = \left(\frac{0.87L^3}{H}\right)^{0.385}$	1.101
Témez	$T_c = 0.30\left(\frac{L}{S_0^{0.25}}\right)^{0.75}$	1.303
Bransby Williams	$T_c = \frac{0.243L}{A^{0.1}s^{0.2}}$	1.389

Fuente: Elaboración propia

Donde:

T_c	Tiempo de concentración	[horas]
L	Distancia máxima a la salida	[km]
A	Área de la cuenca	[km ²]
s	Pendiente promedio de la Cuenca	[%]
H	Diferencia entre las elevaciones extremas de la Cuenca	[m]
S_0	Pendiente del cauce principal	[%]

Los valores de datos descritos anteriormente se encuentran en la Tabla 4.5.

4.2.4. Información Meteorológica

La red meteorológica existente consta de cuatro estaciones, una automática (estación Oxapampa) y las otras pluviométricas convencionales (Meza Pata, La Granja y San Miguel de Bocaz). La medición climática y pluviométrica de estas estaciones tiene una escasa densidad e incompleto periodo de registros, tres de estas estaciones no funcionan tal como se describe en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Relación de estaciones meteorológicas cercanas al área en estudio

Nombre	Tipo	Long.	Lat.	Altitud m.s.n.m.	Provincia	Distrito	Año de Operación	Estado
Oxapampa	Automática	75°23´	10°35´	1850	Oxapampa	Huancabamba	2011-2016	Funcionando
Meza Pata	Convencional	75°23´	10°43´	2310	Oxapampa	Oxapampa	1998-2003	No Funciona
La Granja	Convencional	75°13´	10°43´	1480	Oxapampa	Villa Rica	1974-1982	No Funciona
San Miguel de Bocaz	Covencional	75°9´	10°38´	250	Oxapampa	Villa Rica	1969-1974	No Funciona

Fuente: http://www.senamhi.gob.pe/main_mapa.php?t=dHi

La información meteorológica disponible para la estación Oxapampa que está en funcionamiento contiene periodos de registros muy cortos (2011-2016) por tanto los resultados de los estudios climatológicos y pluviómetros solo tienen un nivel de estimaciones, no pudiendo tomarse como definitivos.

4.3. Hietograma de Precipitación de Exceso

Como se mencionó anteriormente, escasas son las estaciones que ofrecen información automatizada de registros pluviales en el área de influencia de la cuenca de estudio, por lo que a partir de la información cartográfica y estudio hidrológico del Perú (IILA-SENAMHI-UNI), se determinan las intensidades máximas de precipitación para diferentes periodos de retorno.

4.3.1. IILA-SENAMHI-UNI

Las curvas Intensidad-Duración-frecuencia (IDF) para un área específico del territorio peruano se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

Para $t \leq 3$

$$i_{t,T} = a (1 + K \log T) (t + b)^{n-1} \quad (4.73)$$

Para $3 \leq t \leq 24$

$$i_{t,T} = a (1 + K \log T) t^{n-1} \quad (4.74)$$

Donde:

- $i_{t,T}$: Intensidad de la lluvia en (mm/hora)
- a : Parámetro de intensidad (mm)
- K : Parámetro de frecuencia (adimensional)
- b : Parámetro (horas)
- n : Parámetro de duración(adimensional)
- t : Duración(hora)
- T : Periodo de retorno en años

Mayores detalles de este método se describen en (MTC, 2008; OS.060, 2006).

Tabla 4.11: Parámetro regional b

Región	Parámetro b
Costa, Centro y Sur	0.50
Sierra	0.40
Costa Norte y Selva	0.20

Fuente: Obtenido desde (OS.060, 2006)

Los parámetros regionales utilizados para la cuenca en estudio, corresponden a la zona 123₃, $a = 37.85 - 0.0083Y = 19.48$, considerando una altitud promedio de la cuenca hidrográfica igual a 2212.89 msnm, $K = 0.553$, $n = 0.405$ y $b = 0.4$ horas (Sierra) (OS.060, 2006).

La selección de periodo de retorno depende de varios factores, entre los cuales se incluyen el tamaño de la cuenca, la importancia de la estructura, y el grado de seguridad deseado, esta selección debe considerar una estimación adecuada de riesgo. En la Tabla 4.12 se muestra una guía de selección de los periodos de retorno.

Tabla 4.12: Guía para la selección de los periodos de retorno

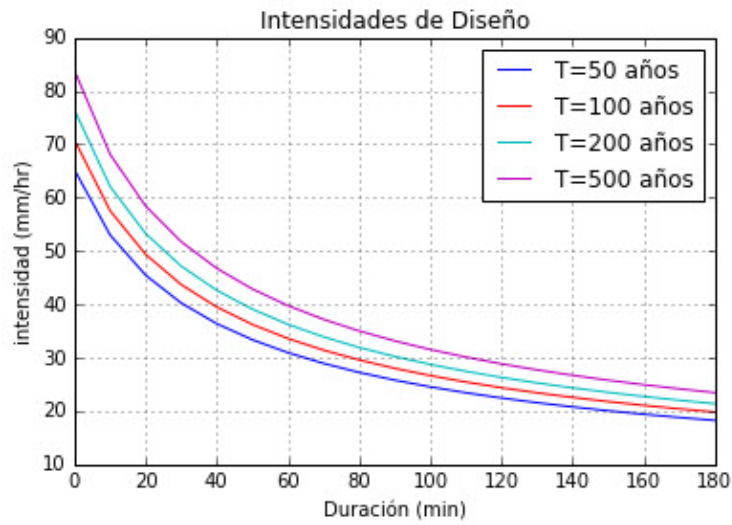
N°	Tipo de proyecto u obra	Periodo de retorno en años
1	Drenaje urbano [bajo riesgo] (hasta 100 ha)	5 a 10
2	Drenaje urbano [mediano riesgo] (más de 100 ha)	25 a 50
3	Drenaje vial	25 a 50
4	Aliviadero principal (presas)	25 a 100
5	Drenaje vial	50 a 100
6	Diques longitudinales [mediano riesgo]	50 a 100
7	Drenaje urbano [alto riesgo] (más de 1,000 ha)	50 a 100
8	Desarrollo de zona de inundación	100
9	Diseño de puentes (pilares)	100 a 500
10	Diques longitudinales [alto riesgo]	200 a 1000
11	Aliviadero de emergencia (presas)	100 a 10,000 (PMP*)
12	Hidrograma de borde libre [para una presa de clase (c)]	10,000 (PMP*)

(*) Precipitación máxima probable

Fuente: Obtenido desde (Ponce, s.f.)

Para las intensidades de diseño se ha considerado periodos de retorno de 50, 100, 200 y 500 años, los mismos que se muestran en la Figura 4.17.

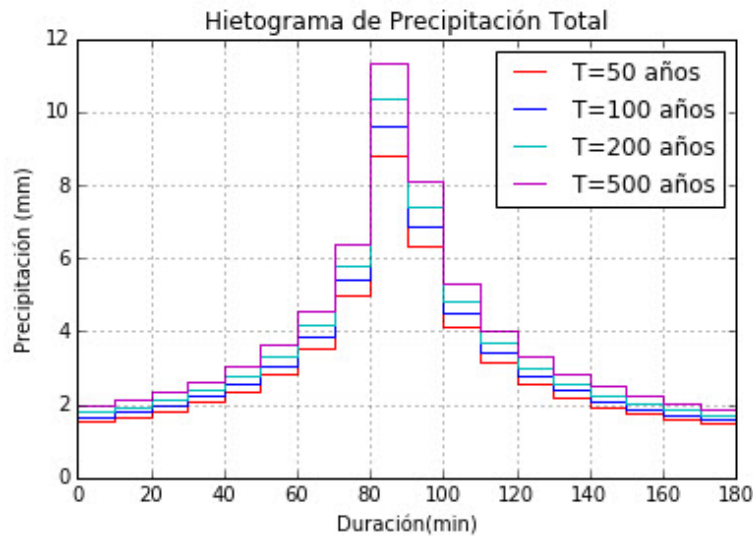
Figura 4.17: Curvas IDF IILA-SENAMHI-UNI-Villa Rica



Fuente: Elaboración propia

A partir de las curvas IDF se determina el hietograma de precipitación total de diseño mediante el uso del método de bloque alterno.³

Figura 4.18: Hietograma de precipitación total



Fuente: Elaboración propia

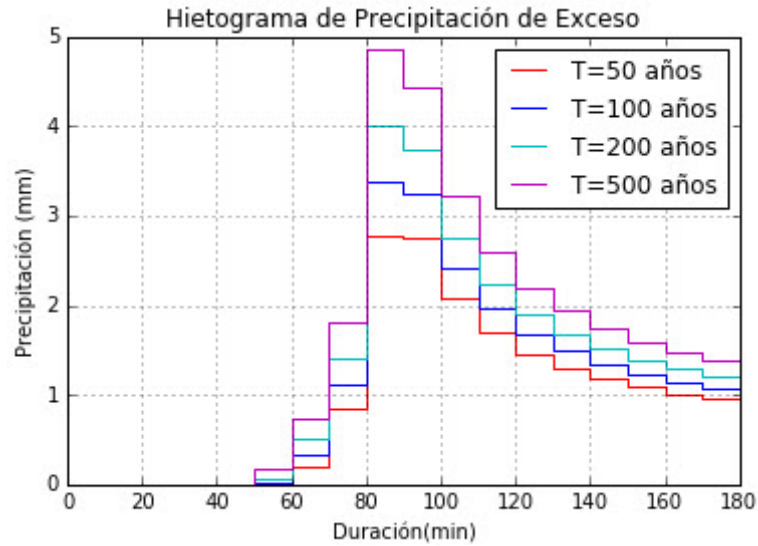
Teniendo en cuenta la aplicación posterior al tránsito hidráulico en canales con fines de diseño de la protección lateral de la misma y bajo las recomendaciones de la Tabla

³ “El método de bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurren en n intervalos de tiempo sucesivos de duración.” (Chow y R. Larry W., 1994)

4.12, se escoge como periodo de retorno de 100 años.

A partir del hietograma de precipitación total y el número de curva se obtiene el hietograma de precipitación de exceso.

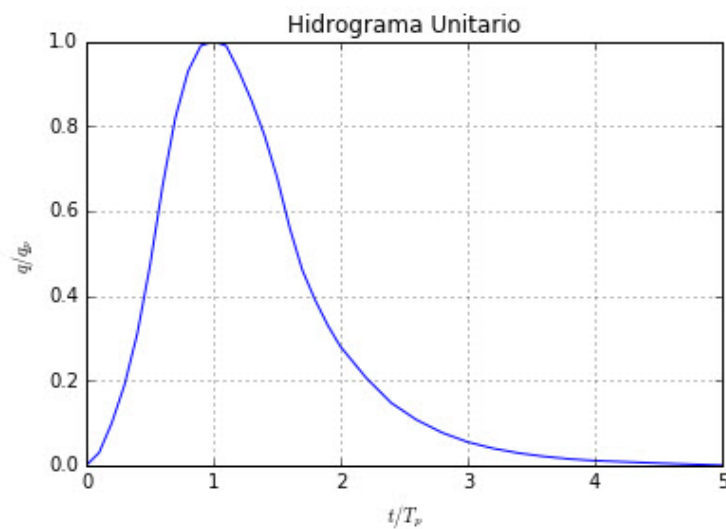
Figura 4.19: Hietograma de precipitación de exceso



Fuente: Elaboración propia

Para la distribución en el tiempo de la escorrentía se hace uso del hidrograma unitario adimensional desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos, cuya forma está predeterminada.

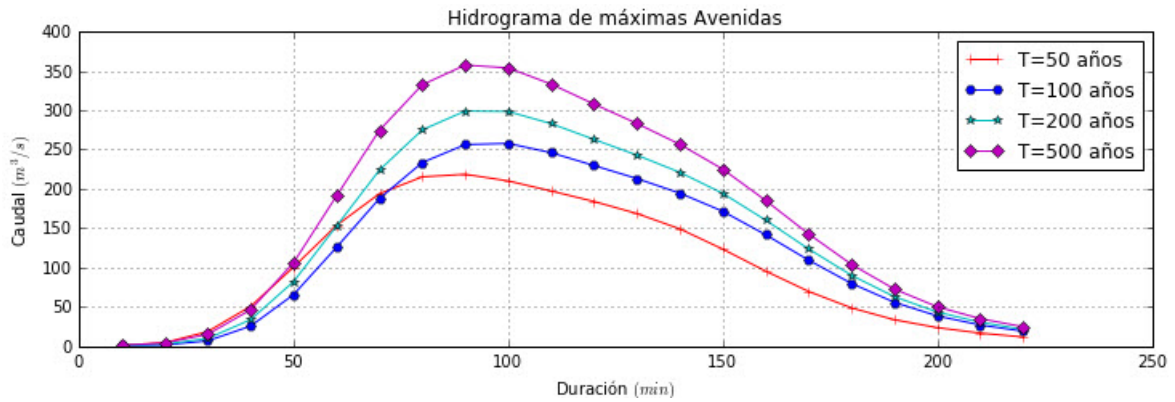
Figura 4.20: Hidrograma unitario adimensional del NRCS



Fuente: Elaboración propia

Mediante el método de la ecuación discreta de convolución y el hidrograma unitario del NRCS se determina el hidrograma para diferentes periodos de retorno.

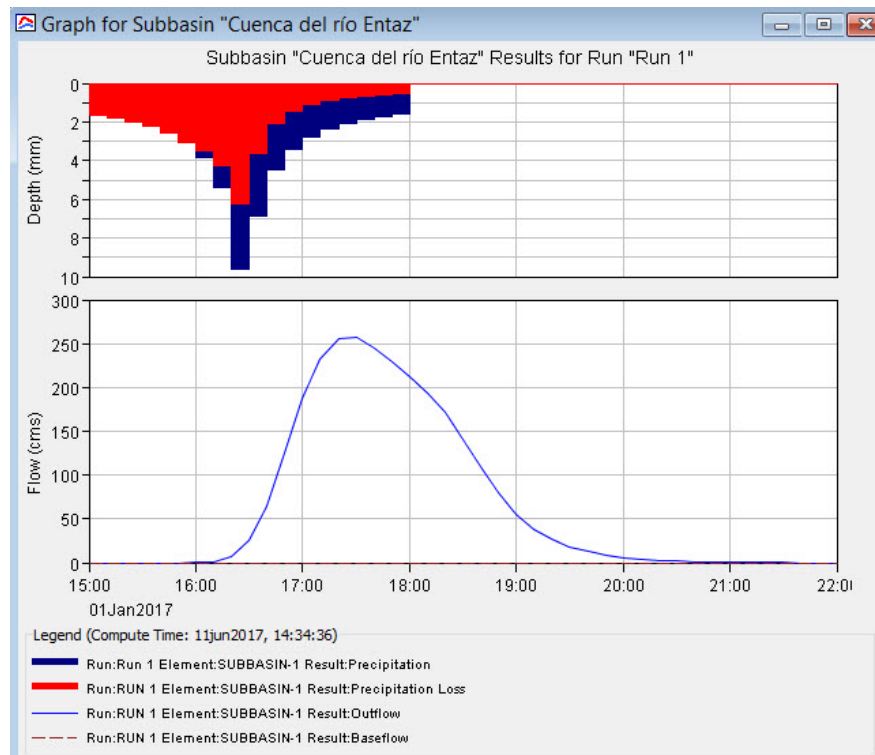
Figura 4.21: Hidrograma de máximas T=50, 100, 200 y 500 años



Fuente: Elaboración propia

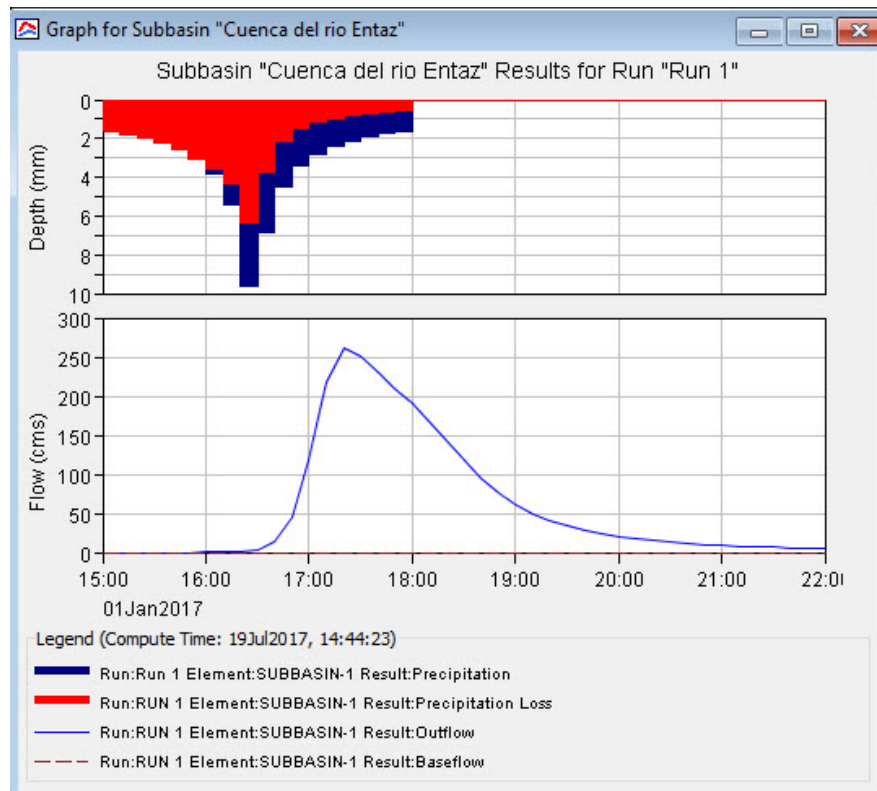
Igualmente la comprobación se realizó utilizando el programa Hec-Hms 3.5 del hidrograma para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 4.22: Hidrograma de máximas avenidas - modelo agregado del SCS - T=100 años



Fuente: Elaborado en Hec-Hms 3.5

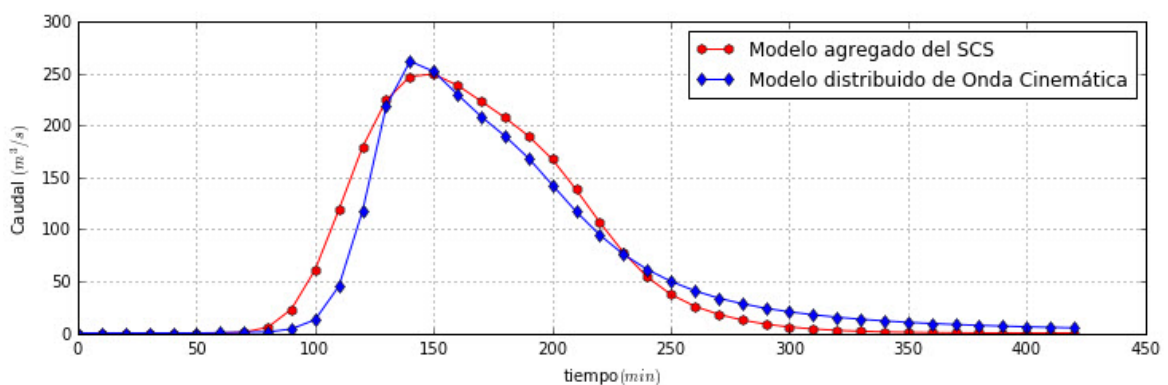
Figura 4.23: Hidrograma de máximas avenidas - modelo distribuido de onda cinemática - T=100 años



Fuente: Elaborado en Hec-Hms 3.5

Las dos figuras mostradas anteriormente se elaboró teniendo en cuenta las recomendaciones del manual de uso del programa Hec-Hms (Felman, 2000).

Figura 4.24: Hidrograma de máximas avenidas - modelo agregado del SCS y distribuido de Onda Cinemática - T=100 años



Fuente: Elaboración propia

De los hidrogramas obtenidos en ambos modelos se puede observar que la tendencia

del comportamiento del caudal en el tiempo es similar, al igual que el caudal pico.

La tabla mostrada a continuación contiene el resumen de los caudales máximos determinados con el modelo agregado del SCS para diferentes periodos de retorno que se muestra en la Figura 4.21.

Tabla 4.13: Resumen de caudales máximos

Periodos de retorno	$Q_{\max}(m^3/s)$
T=50 años	218.41
T=100 años	257.73
T=200 años	298.93
T=500 años	357.54

Fuente: Fuente: Elaboración propia

4.4. Aplicación de las herramientas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2 para la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz

En esta sección se realiza una descripción de como se aplica el modelo Hec-Ras e Iber para estimar hidrogramas de salida.

Es importante conocer las opciones de calculo que ambos modelos utilizan internamente para mostrar los resultados, Hec-Ras dentro de sus opciones de flujo 2D cuenta con la solución de 2 ecuaciones importantes para la transformación de lluvia en escorrentía, la ecuación de onda de difusión (diffusion wave) y la ecuación de impulso completo (full momentum), mientras el programa Iber se basa en el modelo bidimensional hidráulico en volúmenes finitos e incorpora modelos de perdida (Horton, Modelo Lineal, Green-Ampt y SCS), para el caso en estudio se utilizó la opción de onda de difusión en el programa Hec-RAs y onda dinámica para Iber.

4.4.1. Condiciones de borde y datos de flujo

Hietograma de precipitación total

Como condiciones iniciales necesarias para ambos programas es la asignación del hietograma de precipitación total. Estos deben tener unidades definidas de acuerdo a la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Hietograma de precipitación total - T=100 años

Hietograma de Precipitación Total		
Tiempo (<i>min</i>)	Hec-Ras Precipitación (<i>mm</i>)	Iber Intensidad (<i>mm/hr</i>)
0	0.000	0.00
10	1.660	9.96
20	1.808	10.85
30	1.994	11.96
40	2.237	13.42
50	2.571	15.42
60	3.061	18.36
70	3.857	23.14
80	5.393	32.36
90	9.587	57.52
100	6.860	41.16
110	4.480	26.88
120	3.405	20.43
130	2.790	16.74
140	2.390	14.34
150	2.107	12.64
160	1.895	11.37
170	1.730	10.38
180	1.598	9.59

Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Parámetros característicos de la cuenca del río Entaz

Coefficiente de rugosidad de Manning

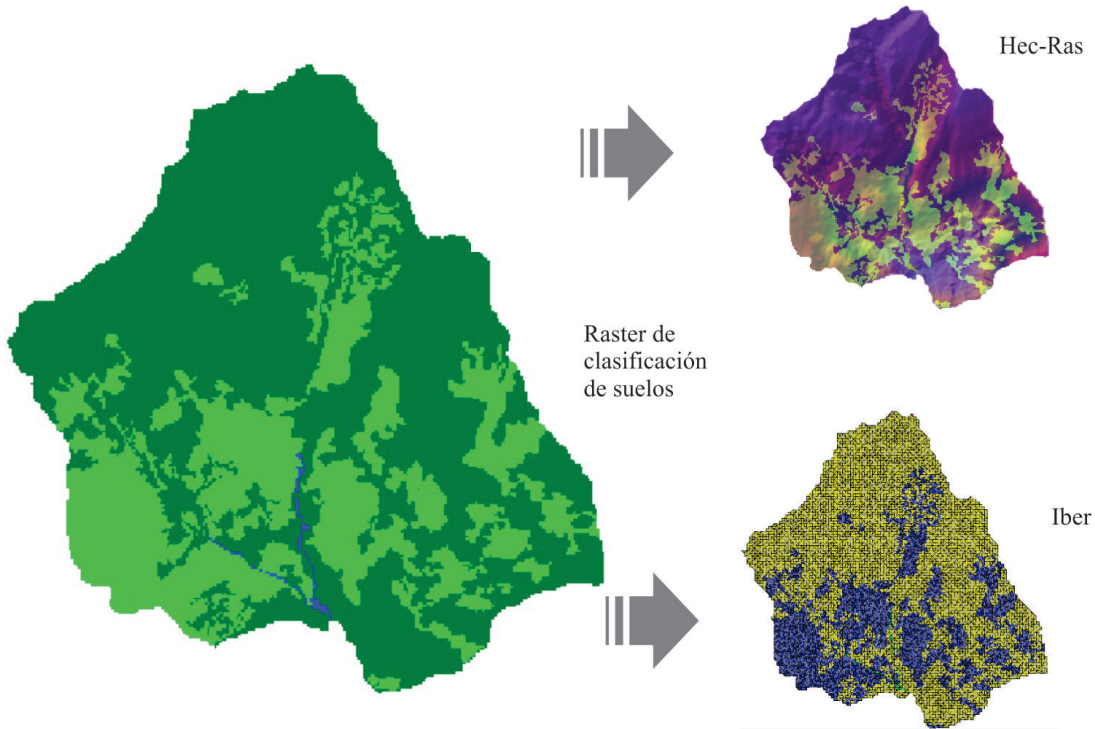
Tabla 4.15: Coeficientes de rugosidad de Manning

descripción	<i>n</i>
-Canal Principal (río)	0.041
-Árboles	0.20
-Cobertura Vegetal (Abundante pasto)	0.05

Fuente: Obtenido desde (Chow y R. Larry W., 1994; Durrans, 2003)

En la Tabla 4.15 se presenta una lista de valores de coeficiente de Manning para diferentes tipos de cobertura de la cuenca.

Figura 4.25: Asignación automática de los coeficiente de rugosidad de Manning de la cuenca del río Entaz en el programa Hec-Ras e Iber desde un Raster



Fuente: Elaboración propia

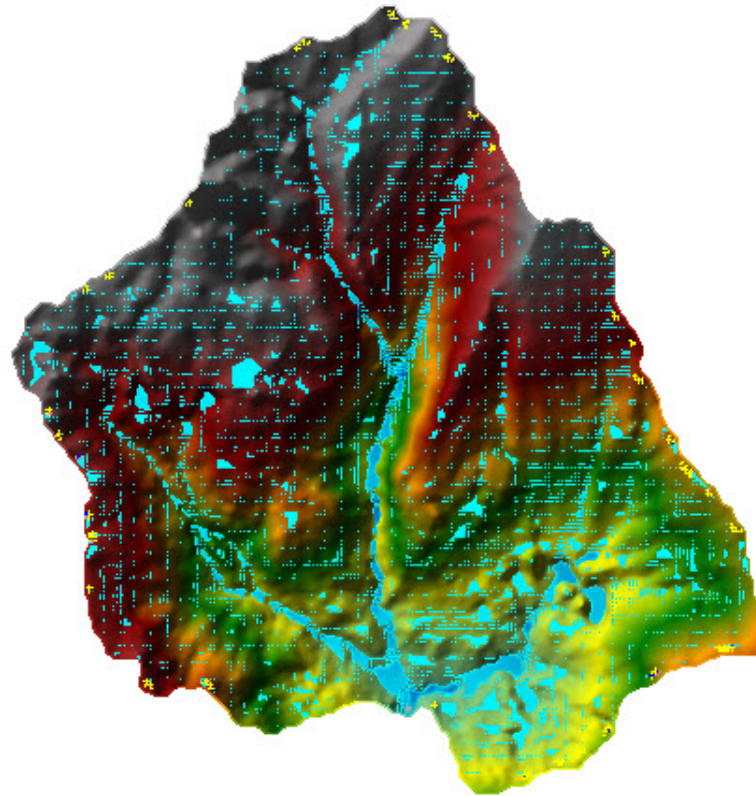
La diferencia de colores en los rasters de la Figura 4.25 se debe a que cada programa asigna por defecto los patrones de color de acuerdo al orden y descripción de los coeficientes de rugosidad de Manning ya definidos internamente por defecto en cada uno de los programas, de modo que estos raster se muestran de distintos colores pero mantienen los parámetros impuestos.

4.4.3. Análisis y Comparación de Resultados

Se muestra el análisis de transformación de lluvia en escorrentía a nivel bidimensional de la cuenca del río Entaz cuyos resultados fueron evaluados en el punto de salida de la misma para diferentes tamaños de enmallados y un periodo de retorno de 100 años. Los pasos que se han seguido como procedimiento se explican a detalle en el Apéndice B.

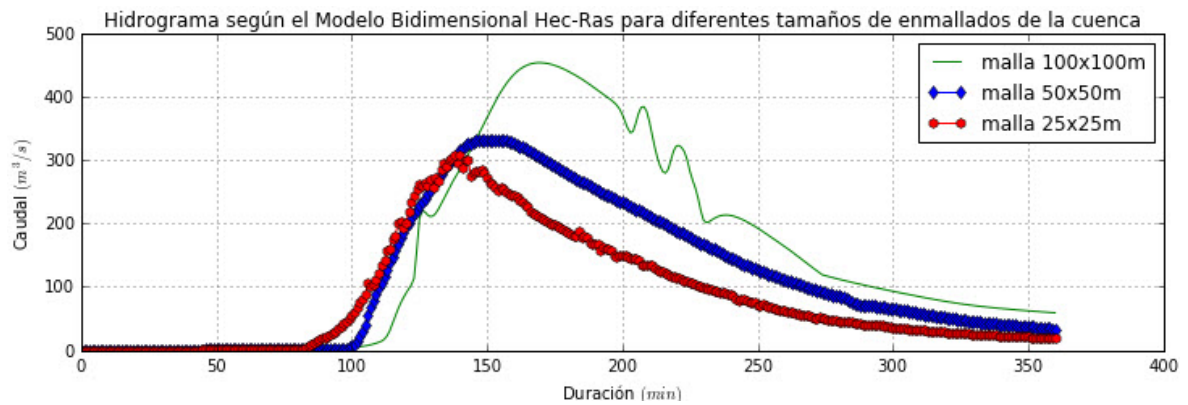
Resultado de la aplicación del programa Hec-Ras del modelo hidrológico para la obtención del hidrograma de salida de la cuenca del río Entaz.

Figura 4.26: Simulación de la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz con la herramienta Hec-Ras



Fuente: Elaborado con Hec-Ras

Figura 4.27: Resultados de hidrogramas para diferentes tamaños de enmallado-programa Hec-Ras



Fuente: Elaboración propia

En la figura 4.27 de los tres casos de análisis de transformación lluvia en escorrentía, los resultados obtenidos para enmallados de 50x50m y 25x25m presentan similitudes y mucha diferencia respecto al caso cuyo enmallado de 100x100m.

La duración del tiempo de análisis depende de los intervalos de tiempo para los cuales se desea obtener los hidrogramas, en la Tabla 4.16 se muestran estos resultados para intervalos de variación de tiempo de análisis cada 10 segundos e intervalos de resultados cada 1 minuto⁴.

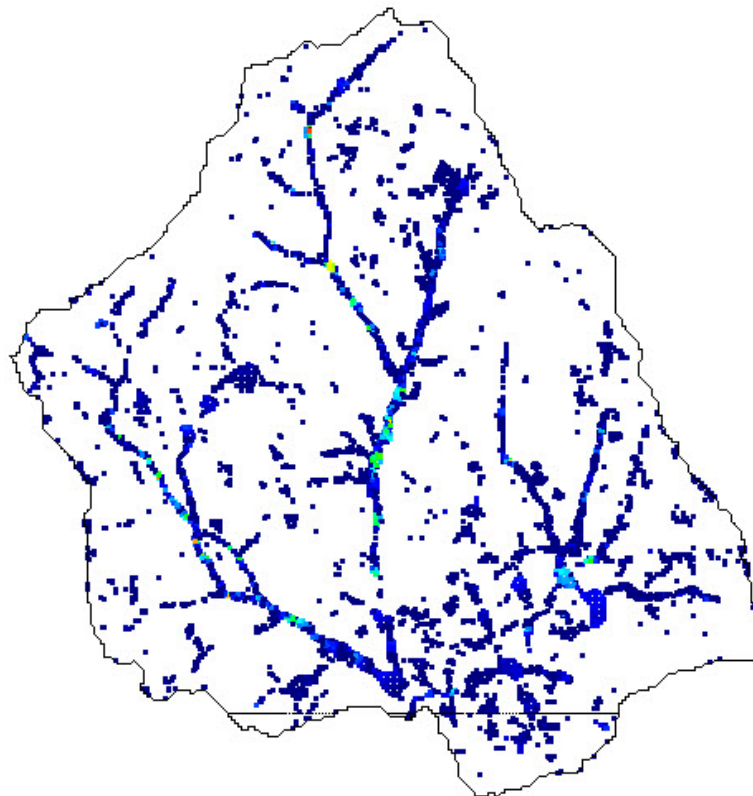
Tabla 4.16: Relación entre el número de elementos de la malla y el tiempo de cálculo

Malla(m)	#celdas	Tiempo-Cálculo (hh:mm:ss)
100	7707	00:02:35
50	30998	00:18:39
25	124412	02:52:07

Fuente: Elaboración Propia

Resultado de la aplicación del programa Iber para la obtención del hidrograma de salida de la cuenca del río Entaz.

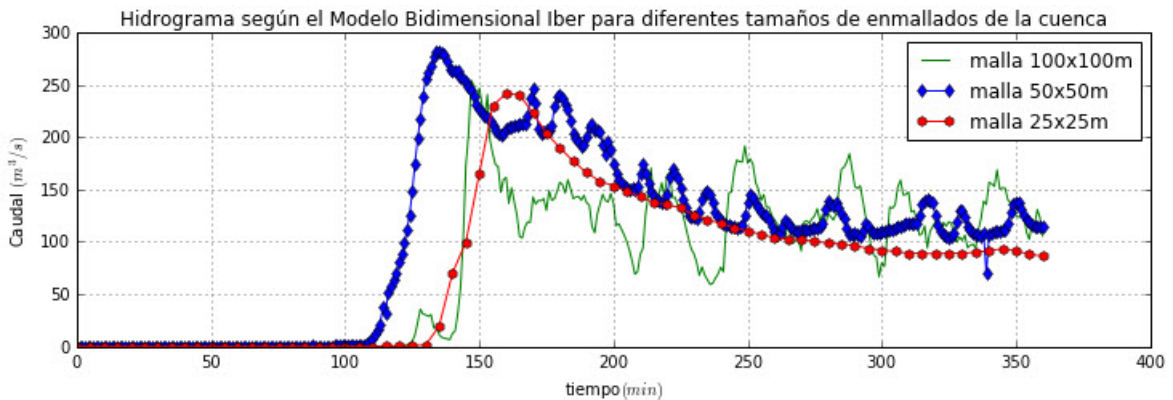
Figura 4.28: Simulación de la transformación de lluvia en escorrentía de la cuenca del río Entaz con la herramienta Iber 2.3.2



Fuente: Elaborado con Iber 2.3.2

⁴El tiempo que demora el procesamiento de cálculo depende en sí de muchos factores como, el tamaño de la cuenca, número de elementos de la malla, pasos de tiempo de análisis escogidos y sobre todo del potencial del procesador y la memoria RAM de la computadora en la que se realiza el modelamiento.

Figura 4.29: Resultado de Hidrogramas para diferentes tamaños de enmallado-modelo bidimensional Iber



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.29 se observa claramente que a menor valor del tamaño de las dimensiones de enmallado mejora la dispersión y oscilación de resultados, a esto se suma la condición CFL igual a 0.35 para todos los casos.

En los siguientes gráficos se presenta la comparación de hidrogramas obtenidos con ambos modelos

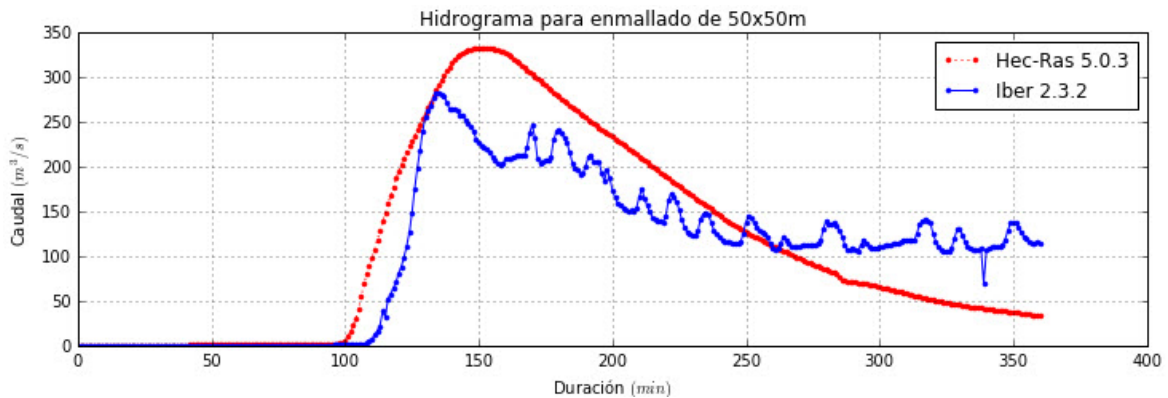
Figura 4.30: Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 100x100m



Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior se observa una gran diferencia en resultados de los hidrogramas obtenidos con los dos modelos: Onda de difusión y onda dinámica para tamaños de enmallado de 100x100m. Por esto se ha planteado un refinamiento del enmallado en celdas mas pequeñas de 50x50m y los resultados son como los que se observan a continuación.

Figura 4.31: Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 50x50m

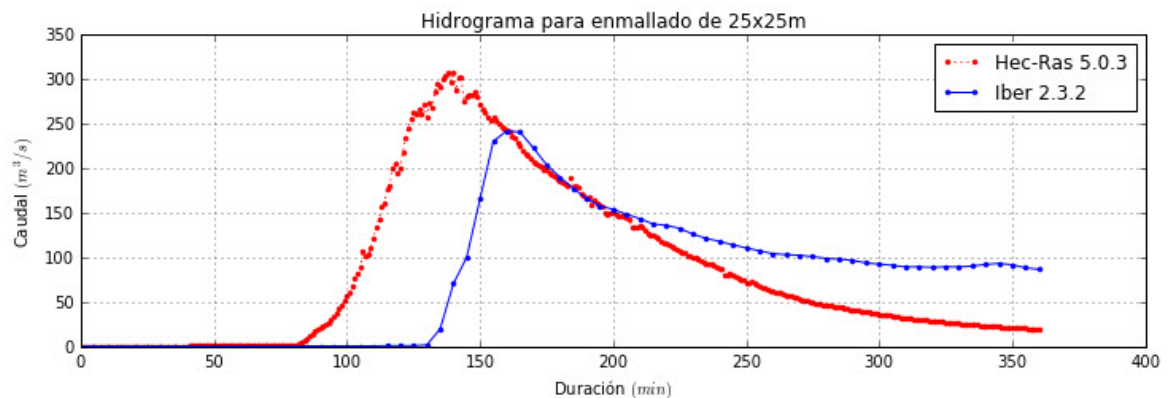


Fuente: Elaboración propia

El enmallado de celdas en tamaños de 50x50m aproxima mejor los resultados de ambos modelos y las oscilaciones disminuyen para el caso de onda dinámica, manteniéndose mejor el comportamiento para el caso de la onda de difusión.

Para ver que los caudales pico se estabilizan se realiza otra discretización del tamaño de celdas aun mas pequeñas de 25x25m y los resultados se muestran en la siguiente figura.

Figura 4.32: Comparación de hidrogramas Hec-Ras e Iber para un enmallado de la cuenca en celdas de 25x25m



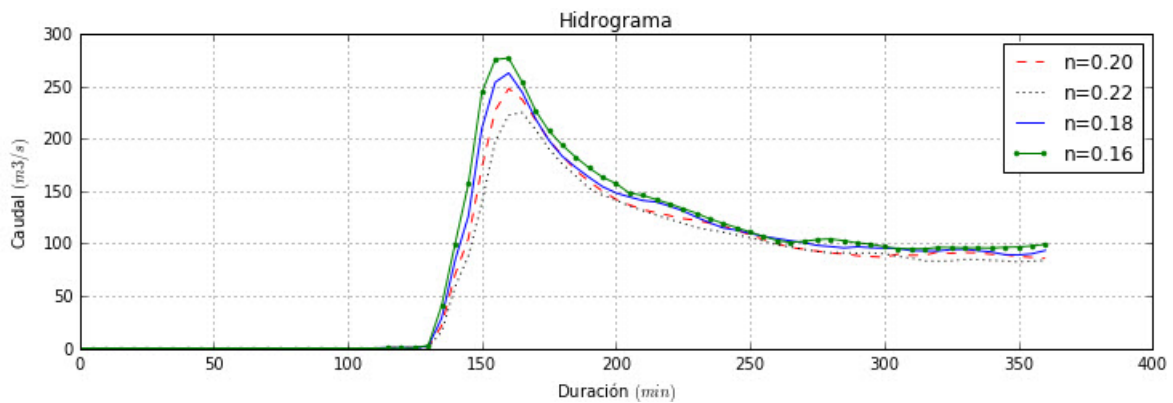
Fuente: Elaboración propia

Con el enmallado 25x25m se observa que los hidrogramas se estabilizan mejor que las pruebas anteriores. Un ajuste adicional al tamaño de celdas aún mas pequeñas permite mejores resultados pero demanda mayor tiempo de ejecución en el cálculo y esta limitado a la capacidad máxima de número celdas permitidas en algunos programas. Considerando lo mencionado anteriormente se sabe que la cuenca tiene una extensión

de área muy grande y la discretización en celdas aun mas pequeñas está limitada a la capacidad del software.

4.4.4. Incidencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los resultados

Figura 4.33: Resultados de hidrogramas para diferentes variaciones de coeficientes de rugosidad de Manning



Fuente: Elaboración propia

Se realiza una variación de coeficientes de rugosidad de Manning en 0.02 a la cobertura de la cuenca clasificada como “Arboles” cuyo coeficiente de rugosidad de Manning determinado fue de 0.20 y manteniendo las otras clasificaciones de acuerdo a la Tabla 4.16, con la finalidad de comprobar la incidencia de este parámetro importante en los hidrogramas. El resultado se muestra en la Figura 4.33.

Tabla 4.17: Caudales máximos para diferentes valores de coeficiente de rugosidad de Manning n

n	$Q_{max}(m^3/s)$
0.16	277
0.18	263
0.20	248
0.22	225

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 4.17 se muestra los caudales máximos para cada coeficiente de rugosidad de Manning n diferente, notándose una diferencia en promedio de $17m^3/s$ para una variación $\Delta n = 0.02$.

4.5. Aplicación 2D al tránsito hidráulico en canales

4.5.1. Características generales del río

Ubicación

El río Entaz está ubicado en el distrito de Villa Rica, provincia de Oxapampa, en el departamento de Pasco, discurre hacia el sureste y es un afluente del río Paucartambo y éste a su vez del río Perené.

Forma parte de la cuenca hidrográfica del río Amazonas; sus principales afluentes del río Entaz son los ríos Canal de Piedra, Oyón y Jesús correspondientes a la cuenca del mismo nombre (cuenca del río Entaz)

Figura 4.34: Ubicación del río Entaz



Fuente: Elaboración propia

4.5.2. Parámetros característicos del río

Coefficiente de rugosidad de Manning

La determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning es muy importante en todo estudio de Hidráulica, debido a que es un parámetro que determina el grado de resistencia que ofrecen las paredes y el fondo del canal al flujo del agua. Más dificultad tendrá el fluido en desplazarse mientras mayor sean estas rugosidades en el lecho del río. A partir de este número, también se pueden definir la altura a la cual llega la superficie de agua, luego de transitar el hidrograma de máximas avenidas de diseño (Oré I., 2016).

En la Tabla 4.18 se presenta una lista de valores de coeficiente de rugosidad de Manning para diferentes tipos de cobertura del canal.

Figura 4.35: Imágenes de la granulometría de las partículas sobre el lecho del río Entaz



(a)

(b)

Fuente: Obtenido desde (Oré I., 2016)

Tabla 4.18: Coeficientes de rugosidad de Manning del río Entaz

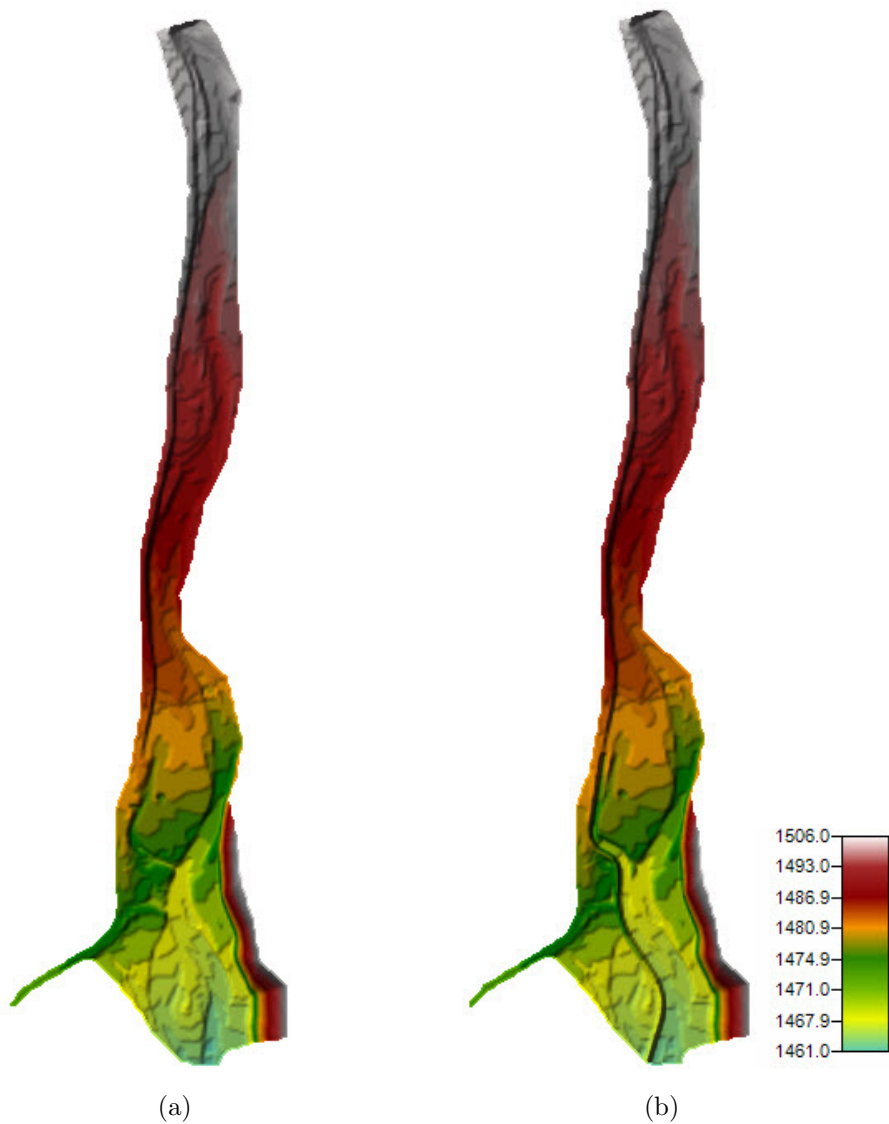
Descripción	n
-Canal Principal (río)	0.041
-Árboles	0.20
-Cobertura Vegetal (Abundante pasto)	0.05
-Gavión	0.026

Fuente: Obtenido desde (Durrans, 2003; Maccaferri, s.f.)

Creación del modelo digital de elevación del canal

Para la creación del modelo digital de elevación (MDE) contenido en un archivo tipo raster con estructura regular, fue necesaria la información del levantamiento topográfico a detalle del canal y el uso de los programas Civil 3D y ArcGis.

Figura 4.36: MDE de canal natural y canal con estructura de protección lateral



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.36 se muestran los MDE del río, de los cuales la sub figura (a) representa la geometría del cauce en su estado natural sin modificaciones y la sub figura (b) representa el MDE del canal que incorpora una estructura lateral de 4m de alto en la margen derecha hacia aguas abajo aproximadamente en una longitud 500m.

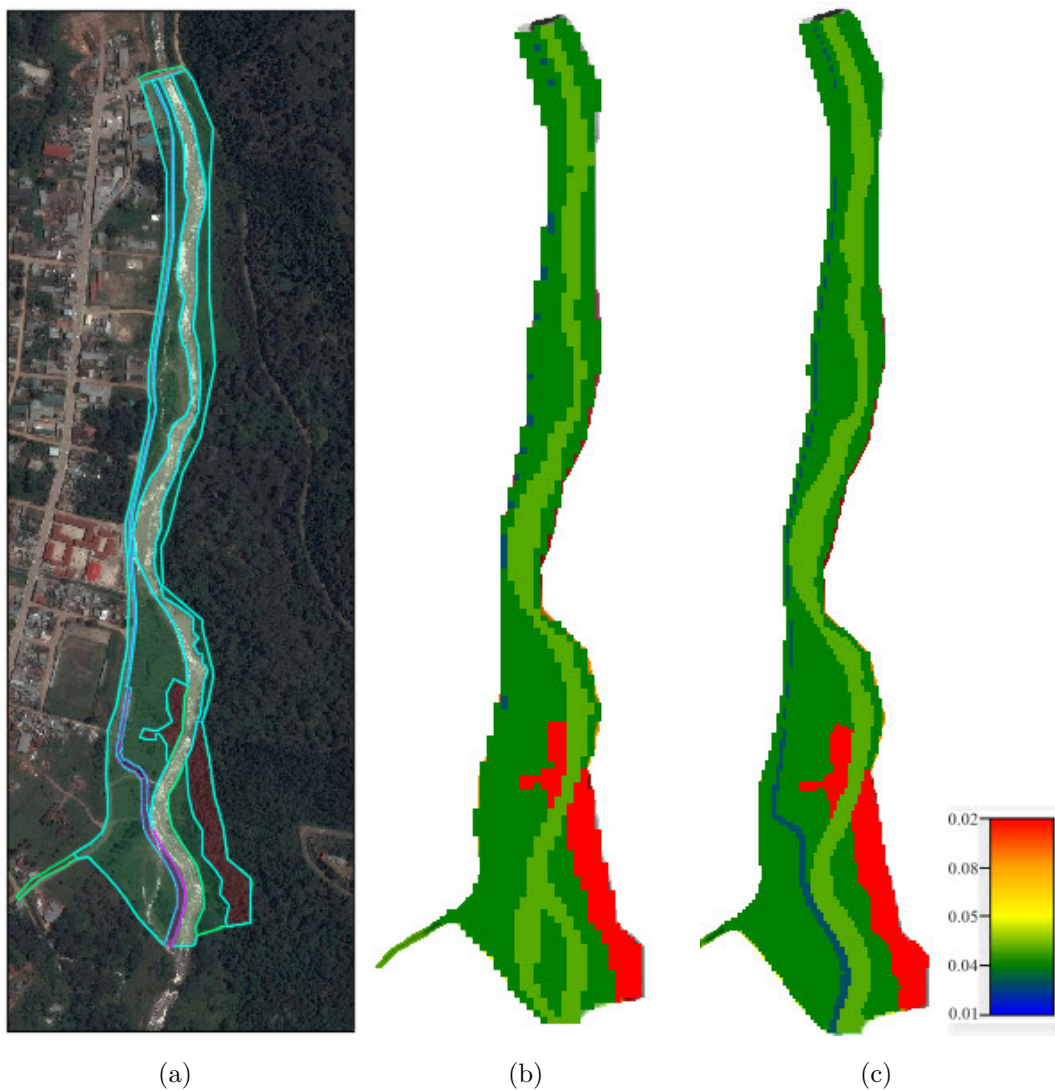
Estos MDE fueron obtenidos a partir del programa Civil 3D, donde se realizó el proce-

samiento de datos del levantamiento topográfico para la creación de curvas de nivel y posteriormente exportado en un formato (.DEM) de 1m de tamaño de celda para luego ser importados en los programas Hec-Ras e Iber.

La asignación de los coeficientes de rugosidad de Manning, se realiza mediante la creación de archivos en formato raster, clasificándolos mediante los mapas de usos de suelo. El procedimiento de este paso es como se explica a continuación.

Se debe contar con una buena imagen satelital y por medio de una foto interpretación con el programa Autocad se clasifica en áreas mediante polilíneas cada tipo de cobertura de la superficie, para posteriormente mediante programas SIG como Arc-Map y Qgis convertirlas al formato raster.

Figura 4.37: Clasificación de los usos de suelo para la asignación de los coeficientes de rugosidad Manning



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.37 se muestran tres imágenes, de las cuales (a) representa la clasificación de los usos de suelo mediante una foto interpretación de las imágenes obtenidas desde el Google Earth. En (b) y (c) se muestra el raster de clasificación de los coeficientes de rugosidad de Manning para los dos casos de canales ya explicados anteriormente.

4.5.3. Análisis 1D

En este trabajo de investigación también se ha realizado el análisis del río Entaz a nivel de solución en 1D en condición de flujo permanente. El procedimiento consistió en lo siguiente:

- Creación de las secciones a una distancia de 25m entre progresivas en todo el tramo de 1.5km de longitud del canal. Este procedimiento se realizó con el programa Civil 3D.
- Exportación de las secciones y el perfil longitudinal del canal desde Civil 3D en una extensión (.geo).
- Creación del nuevo proyecto en el Programa Hec-Ras e importación de los datos geométricos creados en el paso anterior.
- Asignación de parámetros del coeficiente de rugosidad de Manning en cada sección importada.
- Definición de los datos de flujo para una condición permanente.
- Análisis de resultados.

Los pasos descritos arriba son una descripción simplificada del procedimiento que se siguió durante el proceso de análisis del canal a nivel 1D.

La asignación del coeficiente de rugosidad de Manning se realiza en tres partes de cada sección, canal principal y bancos de inundación derecha e izquierda, en este paso no fue útil el archivo raster de usos de suelo.

El caudal de diseño utilizado fue el caudal máximo del hidrograma determinado con los dos modelos de análisis de transformación de lluvia en escorrentía a nivel 1D, modelo agregado del SCS y el modelo distribuido de Onda Cinemática para un periodo de retorno de 100 años⁵ de $257.73m^3/s$.

Del análisis este se calculó como flujo mixto (subcrítico y supercrítico).

⁵La elección del periodo de retorno se discutió en el capítulo 3, de acuerdo a la Tabla 4.12

Resultados

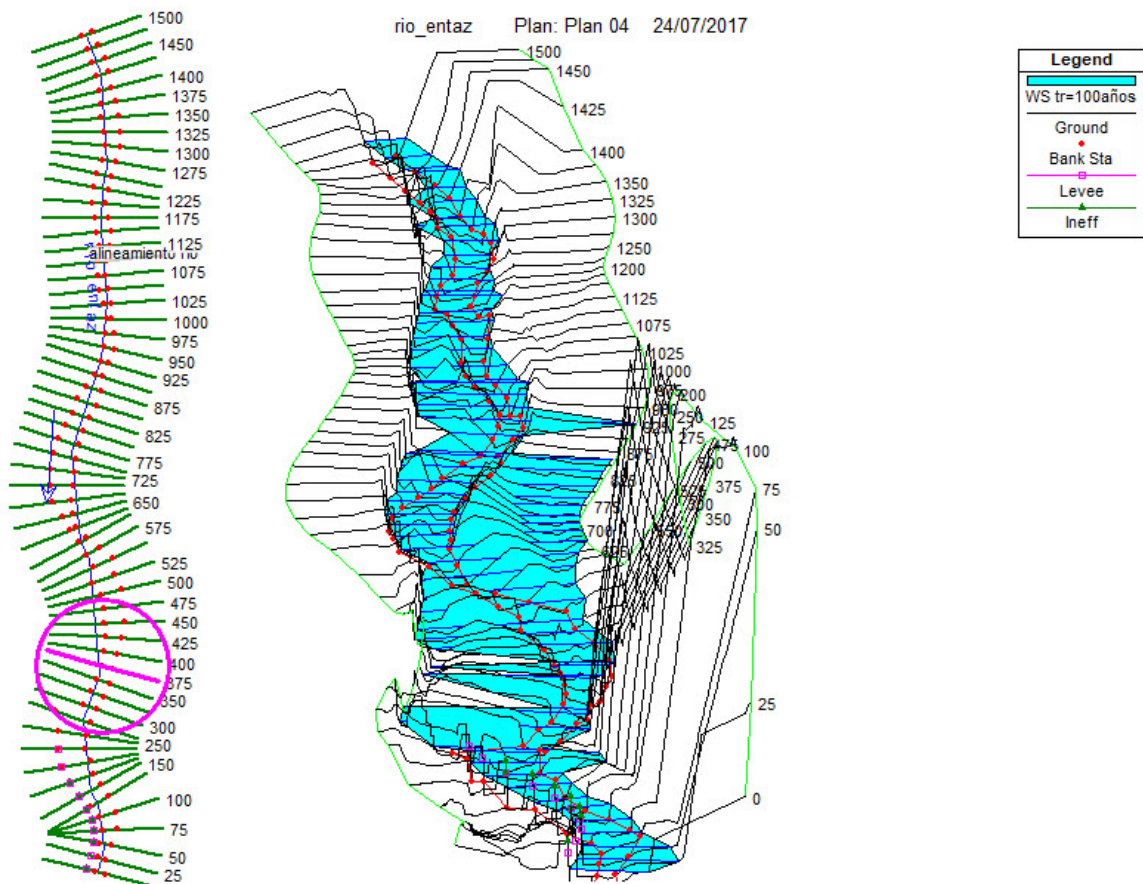
Los tirantes, las velocidades máximas y las tensiones de fondo en los tramos de análisis seleccionados en la Figura 4.45 para el caso comparativo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.19: Resultados análisis 1D del río Entaz

Sección Compartivo	Progresiva Plano (km)	Sección Hec-Ras (km)	Titante (m)	Velocidad (m/s)	Esfuerzos Cortantes (N/m ²)	Numero de Froude
Seccion 01	0+300	1+200	1.83	5.34	399.9	1.34
Seccion 02	0+700	0+800	1.48	4.90	362.74	1.37
Sección 03	1+275	0+200	1.54	4.11	263.33	1.19
Sección 04	1+400	0+100	1.83	3.06	147.96	0.91

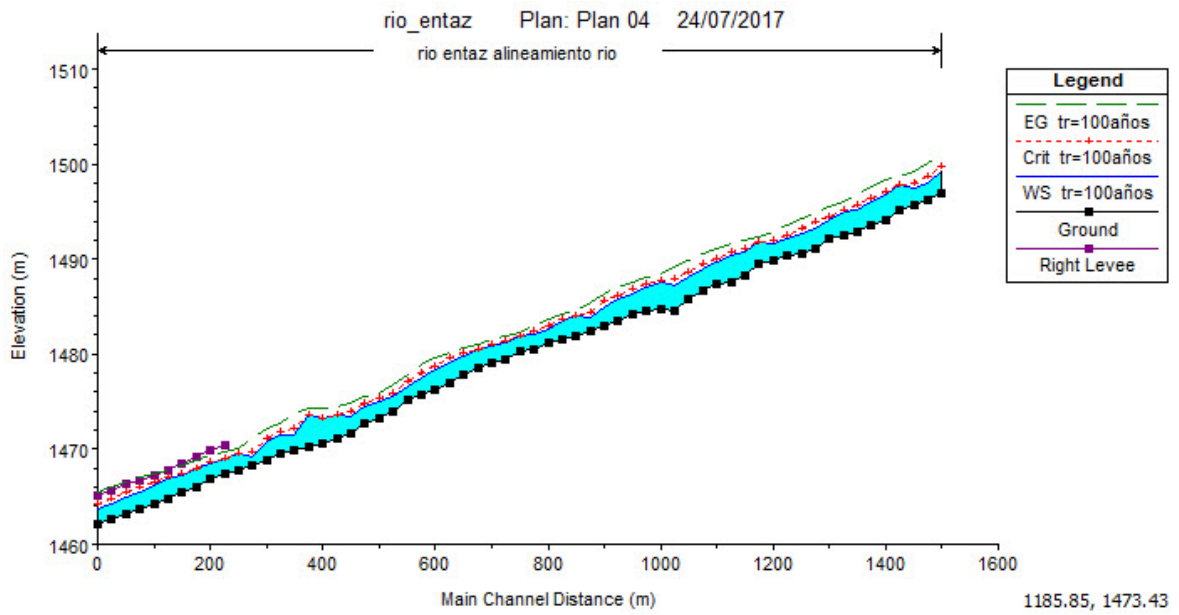
Fuente: Elaboración propia

Figura 4.38: Análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3-secciones en planta y vista isométrica del canal



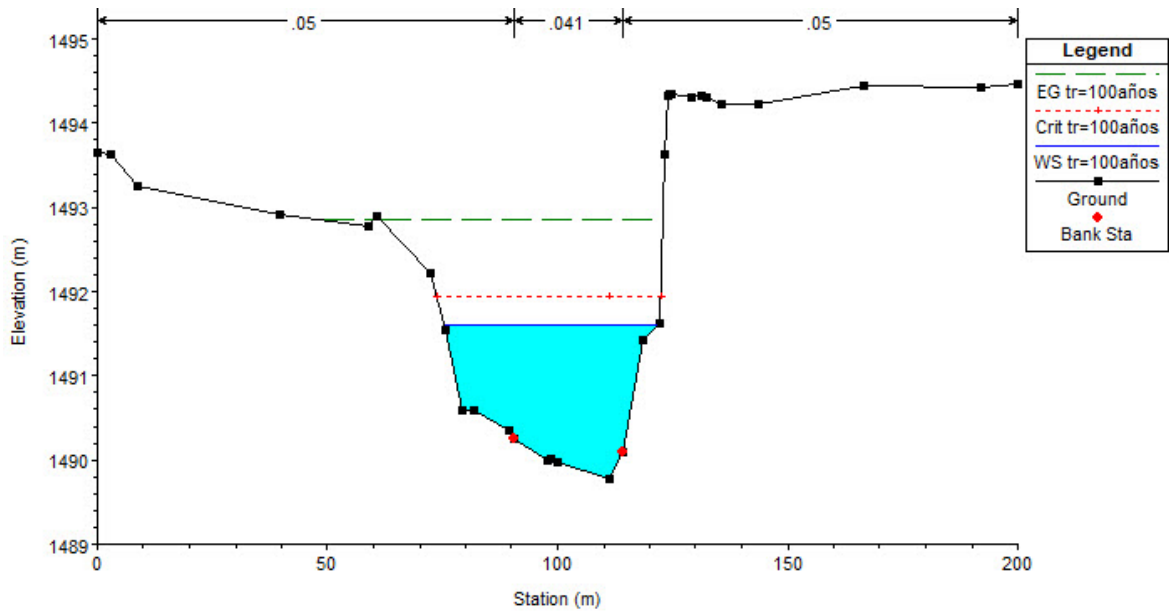
Fuente: Software Hec-Ras 5.0.3

Figura 4.39: Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 perfil de la superficie libre del agua



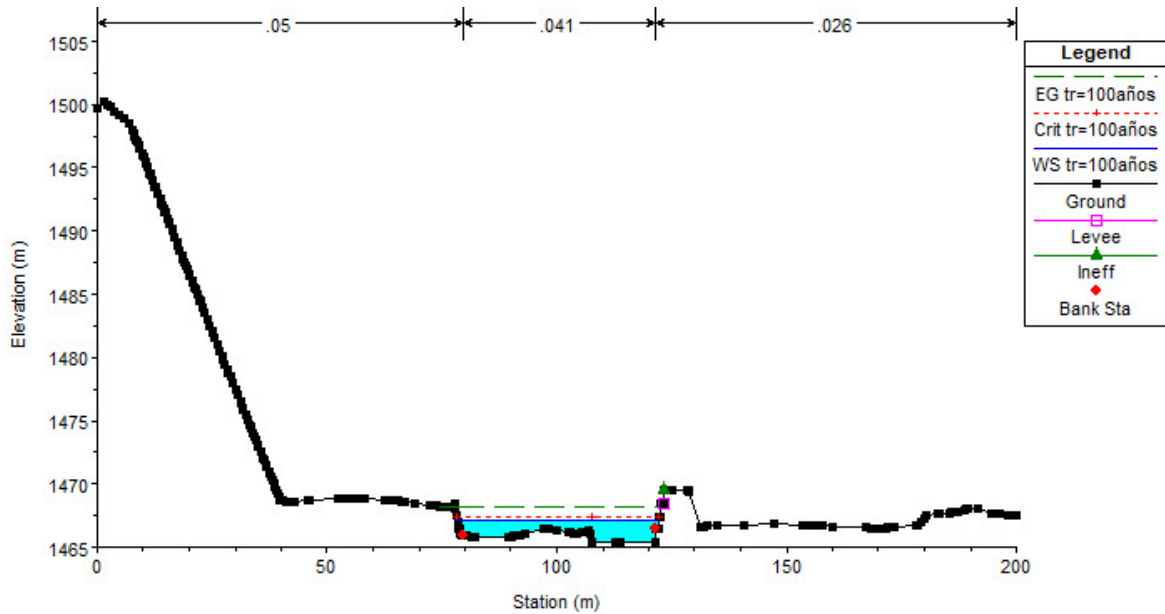
Fuente: Software Hec-Ras 5.0.3

Figura 4.40: Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 sección natural del río



Fuente: Software Hec-Ras 5.0.3

Figura 4.41: Resultado del análisis 1D del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 sección con estructura de gaviones



Fuente: Software Hec-Ras 5.0.3

Mayores detalles de los resultados de cada sección de análisis se muestra en el Apéndice A.

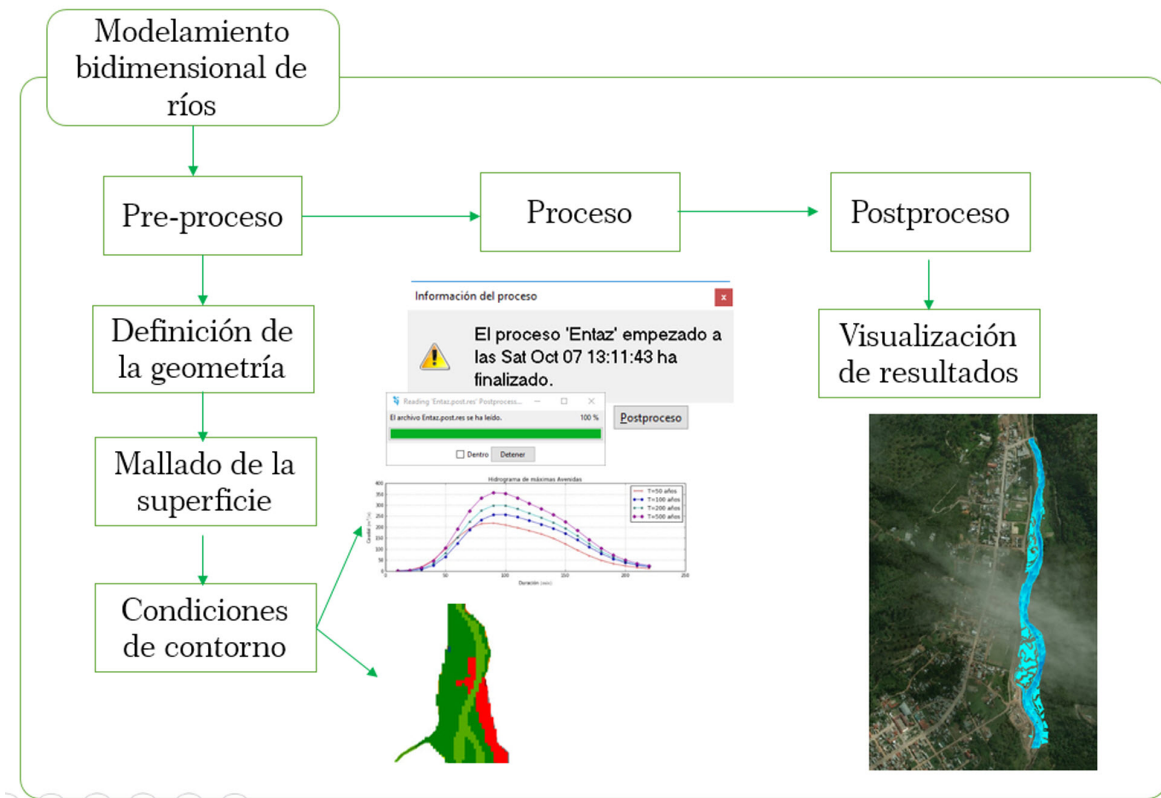
4.5.4. Análisis 2D

Para el análisis en 2D se ha seguido los pasos del modelo conceptual de procedimientos mostrado en la Figura 4.42 correspondiente al programa Iber. Sin embargo los datos requeridos para el análisis son los mismos para el programa Hec-Ras con la diferencia de que en estos dos programas cambia únicamente la forma de asignación de los datos.

El enmallado del río se ha considerado de tipo estructurado de 5x5m y no estructurado en los tramos mas influyentes como las áreas fotográficamente complejas y zonas representadas con estructuras de protección lateral.

Los tiempos de análisis para ambos modelos en 2D se ha limitado a 10 min. Es decir los resultados mostrados están en ese intervalo de tiempo.

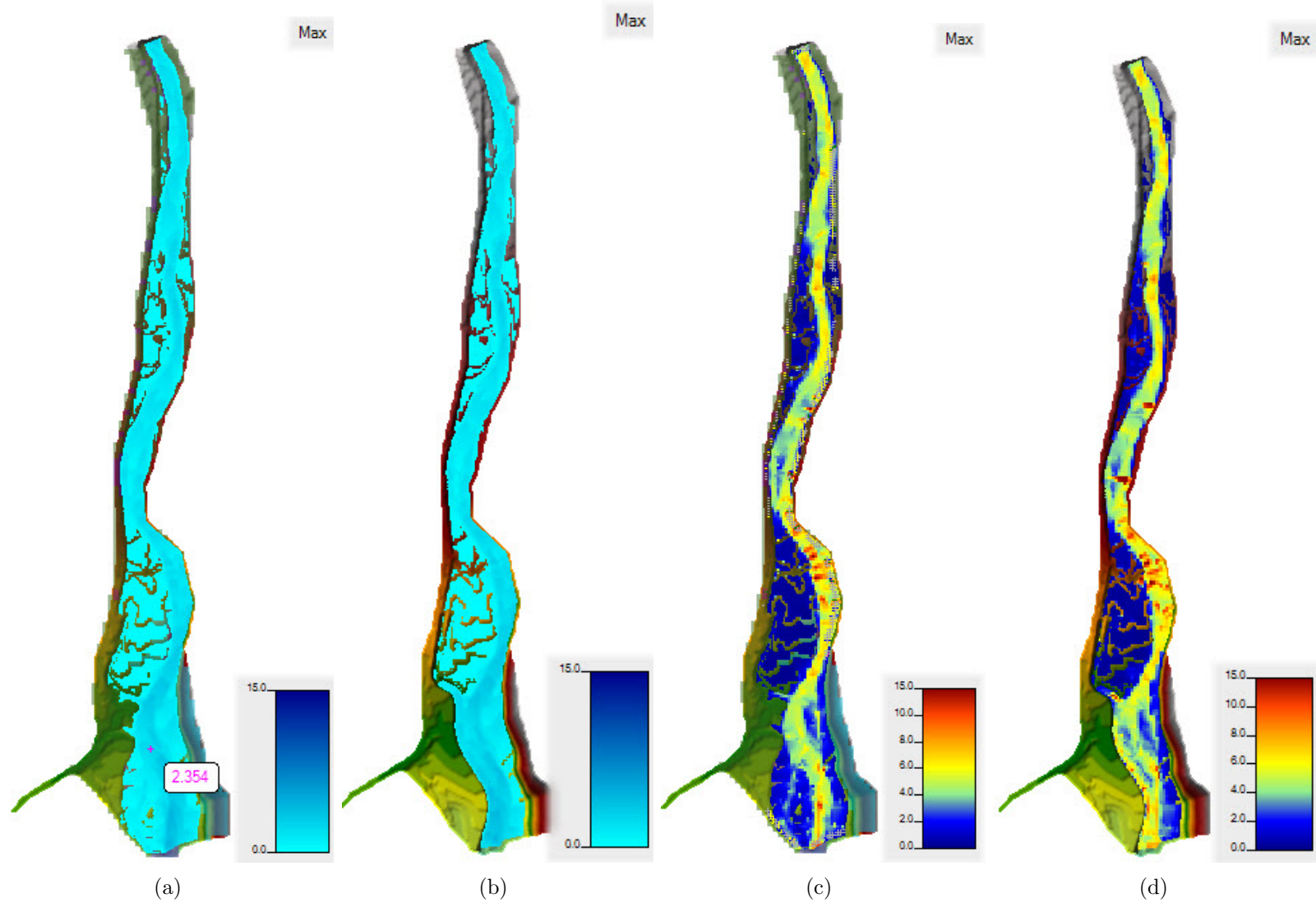
Figura 4.42: Modelo conceptual del procedimiento a seguir en el programa Iber



Fuente: Elaboración propia

Modelamiento bidimensional del río Entaz con el programa Hec-Ras 5.0.3 en régimen no permanente, ver Figura 4.43.

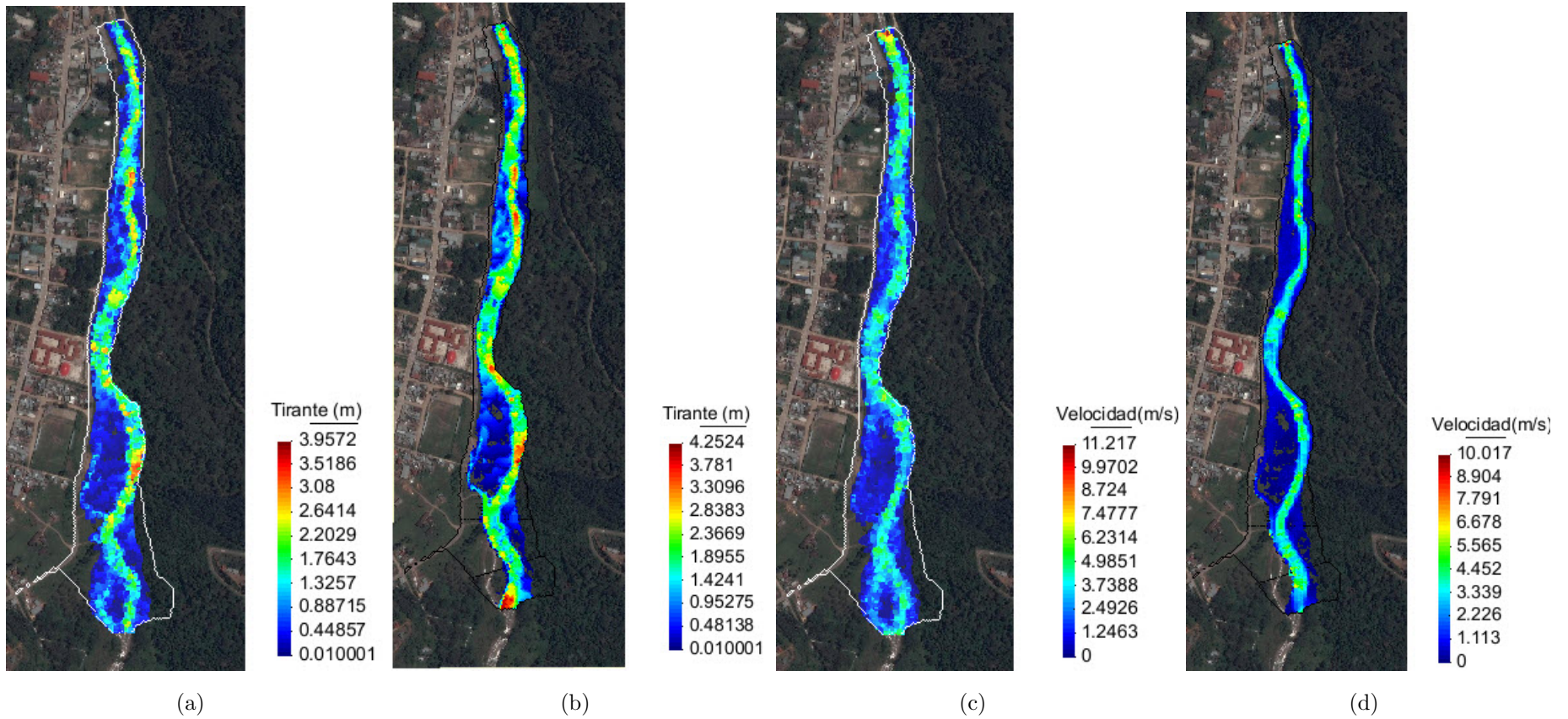
Figura 4.43: Resultados del modelamiento bidimensional del canal con el programa Hec-Ras 5.0.3, (a) y (b) representan la altura libre del agua (m) y (c) y (d) las velocidades en ((m/s))



Fuente: Software Hec-Ras 5.0.3

Modelamiento bidimensional del río Entaz con el programa Iber 2.3.2 en régimen no permanente

Figura 4.44: Resultados del modelamiento bidimensional del canal con el programa Iber 2.3.2, (a) y (b) representan la altura libre del agua (m) y (c) y (d) las velocidades en ((m/s))



Fuente: Software Iber 2.3.2

En las Figuras 4.43 y 4.44 se muestran los resultados de los modelos bidimensionales desarrollados del río Entaz como aplicación, en ambos casos se representan las velocidades y tirantes del flujo en régimen no permanente para un canal con cauce natural ver figuras (a) y (c) e incorporando una estructura lateral ver figuras (b) y (d).

4.5.5. Análisis y comparación de resultados

Para el análisis y comparación de resultados se han definido 4 secciones representativas del canal como se muestra en la siguiente figura.

Figura 4.45: Secciones de análisis río Entaz



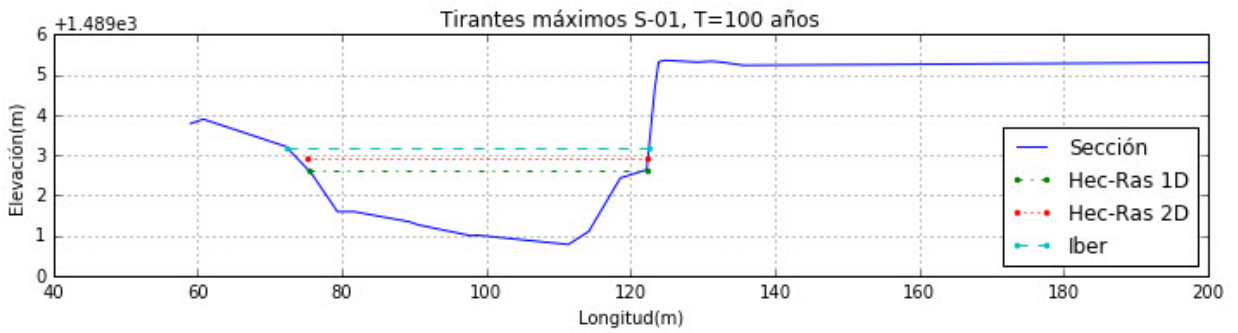
Fuente: Elaboración propia

Las 2 primeras secciones representan el cauce natural del río y están ubicadas aproximadamente en el km 0+300 y Km 0+700 de todo el tramo, las otras dos últimas representan las secciones con estructuras de protección lateral (gaviones de 4m de alto).

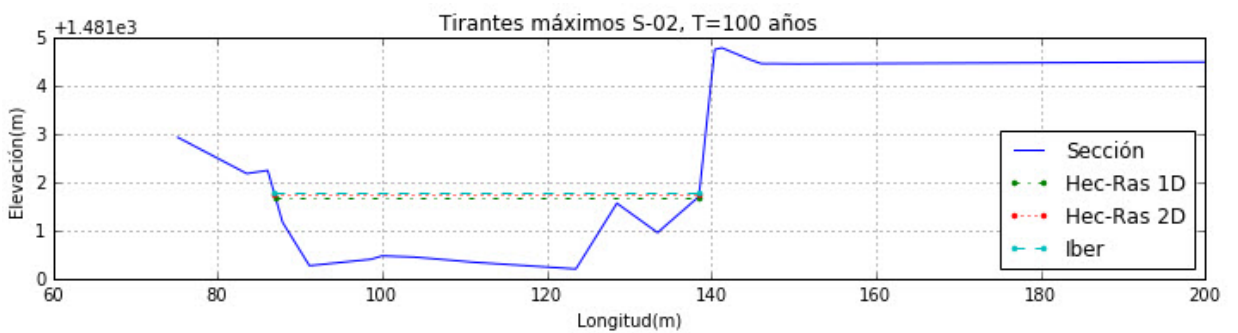
De los Resultados mostrados en la Figura 4.46 se observa lo siguiente:

- En la sección 02 todos coinciden en altura del tirante.
- Los tirantes obtenidos con el programa Hec-Ras 1D esta por debajo de los dos modelos bidimensionales y se observa bastante diferencia en la sección 04.
- Existe buena aproximación con los modelos Hec-Ras e Iber a nivel de 2D en las secciones 02, 03 y 04.
- Entre los 3 análisis, Hec-Ras e Iber a nivel de 2D representa valores mas conservadores en el sentido de que sus resultados de los tirantes se aproximan mucho mejor.

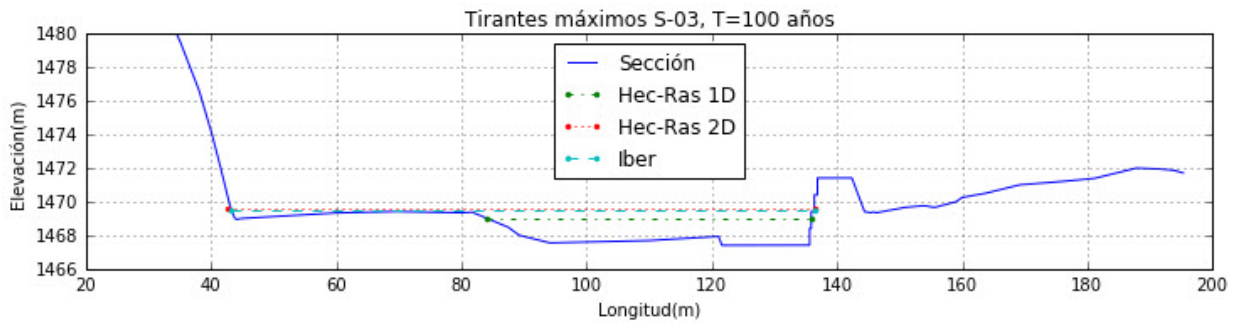
Figura 4.46: Comparación de tirantes máximos en las secciones 01, 02, 03 y 04 utilizando los programas Hec.Ras 1D, 2D e Iber 2D



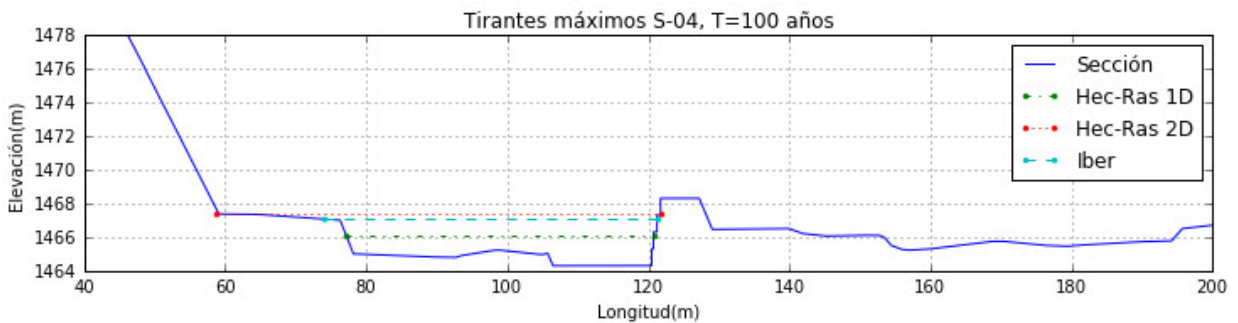
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Elaboración Propia

Para determinar con mayor precisión las diferencias en los resultados se presenta la siguiente tabla de comparaciones.

Tabla 4.20: Tabla comparativa de las diferencias entre tirantes para los 3 casos de análisis 1D y 2D

Sección	Modelo	NAME*	(3)-(1)	(3)-(2)	(2)-(1)
Sección 01	Hec-Ras 1D (1)	1491.60	0.57	0.27	0.3
	Hec-Ras 2D (2)	1491.90			
	Iber (3)	1492.17			
Sección 02	Hec-Ras 1D (1)	1482.68	0.12	0.05	0.07
	Hec-Ras 2D (2)	1482.75			
	Iber (3)	1482.80			
Sección 03	Hec-Ras 1D (1)	1469.00	0.518	-0.082	0.6
	Hec-Ras 2D (2)	1469.60			
	Iber (3)	1469.52			
Sección 04	Hec-Ras 1D (1)	1466.12	0.95	-0.3	1.25
	Hec-Ras 2D (2)	1467.37			
	Iber (3)	1467.07			

(*) Nivel de Avenidas Máximas Extraordinarias (NAME)

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 4.20 se observa que la diferencia en promedio entre el modelo en 1D y 2D de Hec-Ras e Iber varía de 0.60 a 0.95, a nivel de 2D los resultados tienen una variación máxima de 0.30m, aunque la diferencia entre 1D y 2D del programa Hec-Ras en la sección 04 es muy significativo.

Como parte de la comprobación de los modelos simulados numéricamente a nivel 1D y 2D, se registró un video de la crecida del río Entaz en su máximo caudal en diciembre del año 2016, el mismo que se representa en la Figura 4.48, donde en (a) se observa la crecida del río Entaz aguas arriba de la sección 03, en (b) y (c) se muestran las estructuras de gaviones de 4m de alto conteniendo el flujo, además en (c) se observa un muro perimetral que está siendo protegido por la defensa ribereña.

Si comparamos los resultados de las secciones analizadas con las fotografías mostradas en la Figura 4.48 se nota que los tirantes obtenidos a nivel de 2D en la sección 04 se aproximan mejor al evento real de máximas avenidas que se presentan en el sitio.

Figura 4.47: Fotografías de la crecida del río Entaz en su máximo caudal



(a)



(b)

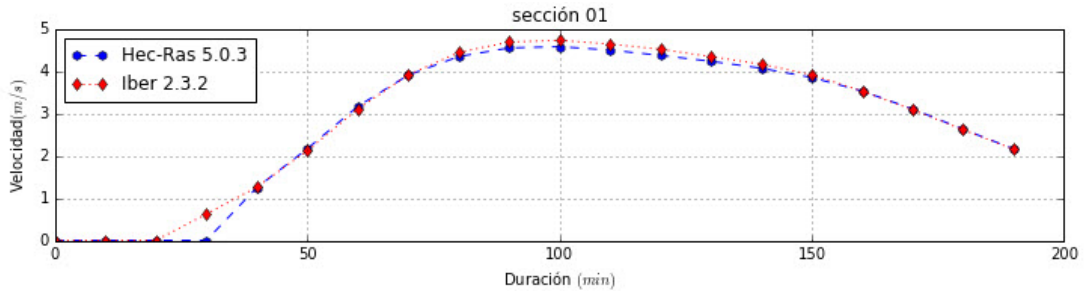


(c)

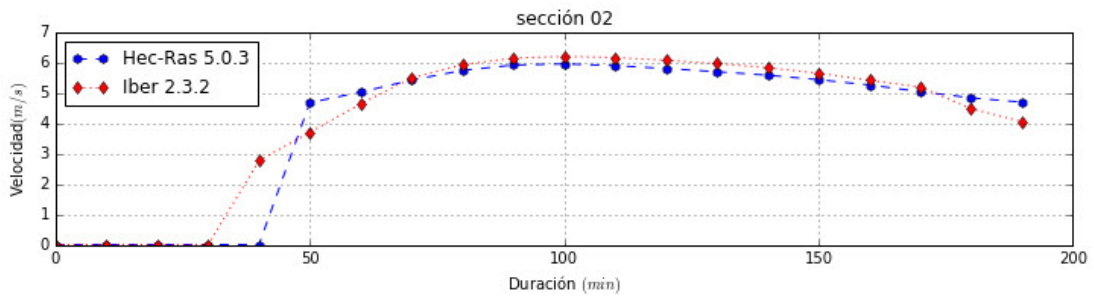
Fuente: Obtenido desde (Oré I., 2016)

Otro de los parámetros hidráulicos muy importantes de un río son las velocidades máximas, por ello se realiza una comparación en las 4 secciones de análisis. La evolución de velocidades en función al tiempo para una condición no permanente del flujo en las secciones evaluadas presentan los siguientes resultados.

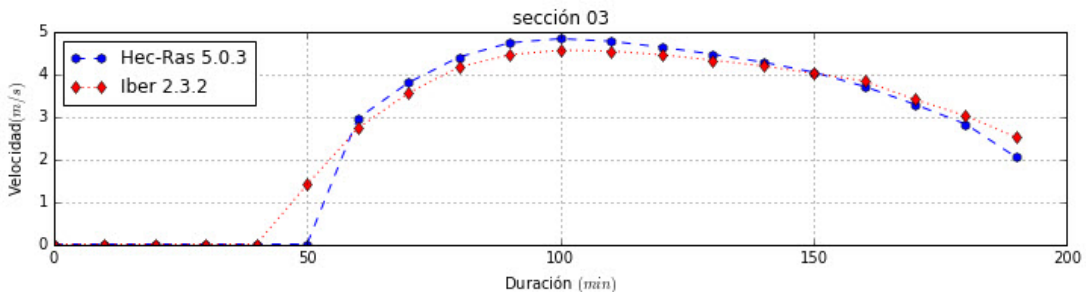
Figura 4.48: Fotografías de la crecida del río Entaz en su máximo caudal



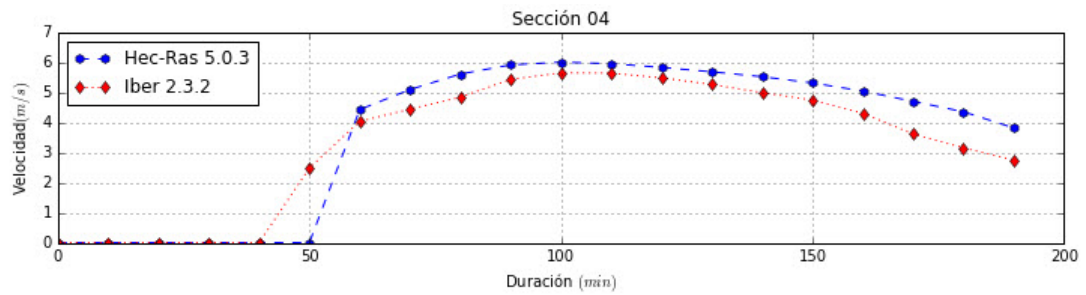
(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de las velocidades con ambos modelos Hec-Ras e Iber en 2D presentan variaciones mínimas como se muestra en la siguiente tabla.

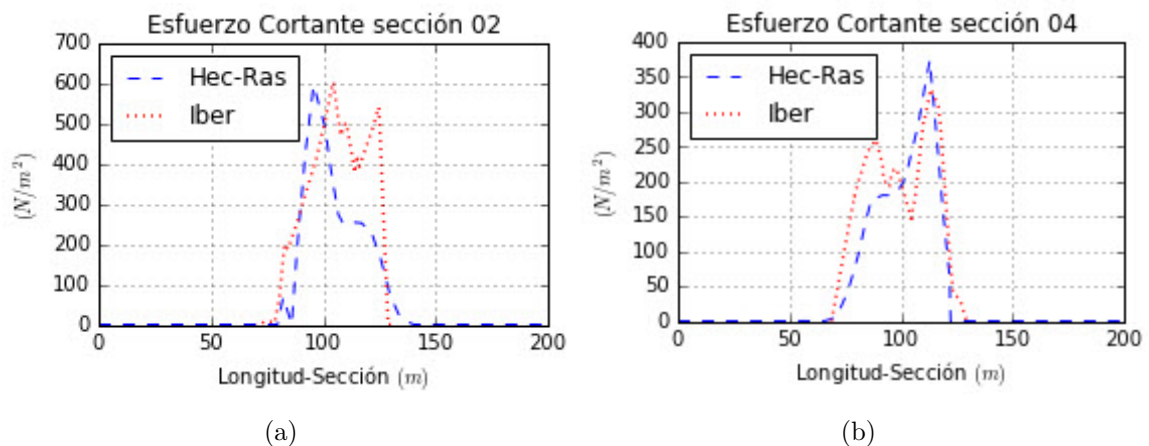
Tabla 4.21: Comparación de las velocidades máximas y sus diferencias

Secciones	Velocidades max. (m/s)		Diferencia (m/s)
	Hec-ras	Iber	
Sección 01	4.58	4.73	-0.15
Sección 02	5.92	6.17	-0.25
Sección 03	4.84	4.57	0.27
Sección 04	6.016	5.66	0.356

Fuente: Elaboración propia

Otra de las comparaciones realizadas son de los esfuerzos cortantes máximos que se muestran a continuación.

Figura 4.49: Comparación de esfuerzos cortantes con Hec-Ras e Iber en las secciones 02 y 04



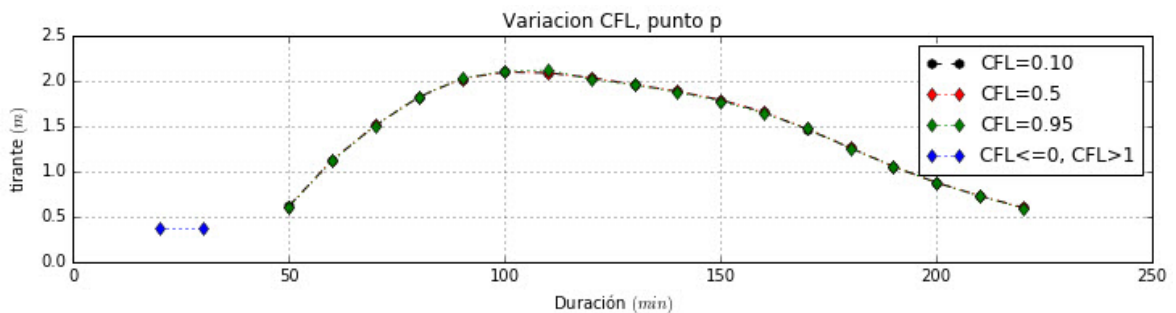
Fuente: Elaboración propia

Los esfuerzos cortantes evaluados aleatoriamente en las 2 secciones, como resultado tienen mucha aproximación para los dos modelos a nivel de 2D. Esta distribución de los esfuerzo cortantes definen la estabilidad de la sección del canal relacionadas al transporte de sedimentos, dispersión o problemas de cavitación. Son empleados en el diseño de canales en suelos erosionables, así como en otros diseños hidráulicos.

4.6. Incidencia del número de Cuorant en los resultados

Como parte de la investigación se determinó la estabilidad de los cálculos en un punto de denominación ("p") del canal (ver Figura 4.51) evaluándose la evolución de los tirantes en el tiempo, del cual se determina que para CFLs mayores a 1 y menores a 0 se presenta inestabilidad en los resultados, mientras para valores 0.25, 0.50 y 0.95 los resultados convergen correctamente existiendo un mínimo error (ver Figura 4.50).

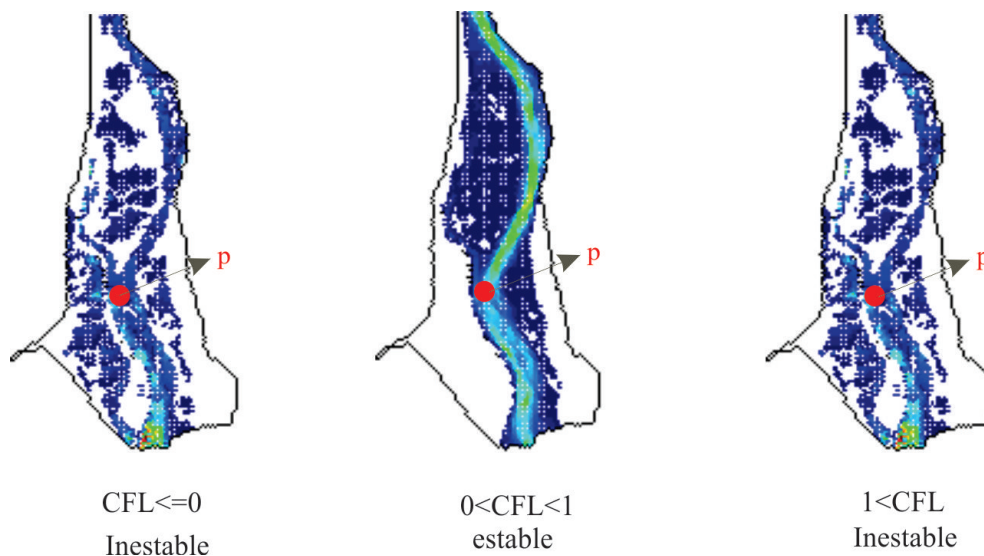
Figura 4.50: Estabilidad e inestabilidad de resultados para diferentes valores del CFL



Fuente: Elaboración Propia

Las siguientes imágenes muestran resultados para diferentes valores de CFL, del cual se deduce que para casos de inestabilidad del cálculo existe presencia de flujos inefectivos que no corresponden a un comportamiento real del río.

Figura 4.51: Estabilidad e inestabilidad de resultados



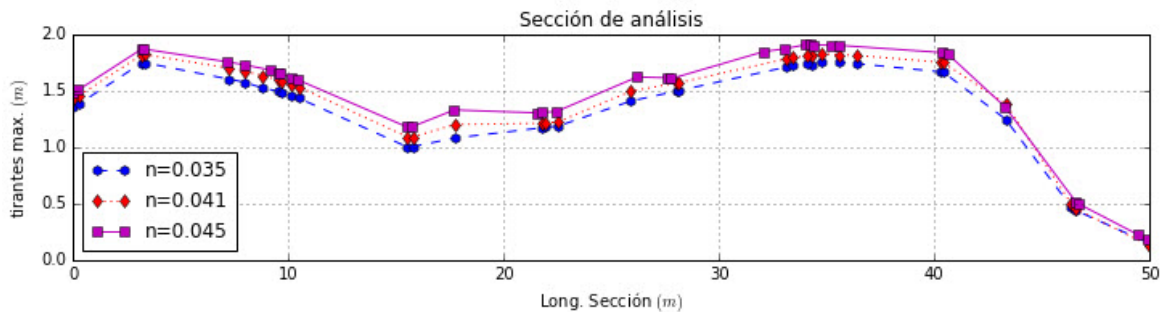
Fuente: Software Iber 2.3.2

4.7. Incidencia del coeficiente de rugosidad de Manning en los resultados

Para verificar la importancia que tiene la asignación correcta del coeficiente de rugosidad de Manning en los resultados, se realizó 3 casos de análisis con diferentes valores de coeficientes de rugosidad de Manning del canal principal.

De acuerdo con la la tabla 4.18 este valor para el canal principal es de 0.041, alternativamente los valores asumidos fueron 0.035 y 0.045. La evaluación se realiza en una sección del canal cuyas coordenadas UTM son (E:471309.71, N:8813439.92; E:471262.9, N:8813422.4) y los resultados que se muestran en la siguiente figura corresponden a los tirantes máximos.

Figura 4.52: Comparación de tirantes máximos para diferentes valores del coeficiente de Manning



Fuente: Elaboración Propia

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

1. El proceso de transformación de lluvia en escorrentía dentro de una cuenca hidrográfica, así como el tránsito hidráulico de flujo no permanente en canales, mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel bidimensional, con la ayuda de los programas Hec-Ras e Iber. Demuestran que son una alternativa adecuada para estudios hidrológicos e hidráulicos, por que permiten caracterizar mejor la superficie por donde se transita la escorrentía superficial de una forma mas real y completa, de modo que los resultados representan soluciones mucho mas confiables de acuerdo a los diversos análisis de resultados obtenidos tanto en la cuenca como en el río.
2. El modelo distribuido de onda cinemática mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel de 1D, comparado con el modelo agregado del SCS en la transformación de lluvia en escorrentía de una cuenca hidrográfica presenta las siguientes diferencias.
 - a) Gráficamente la variación entre los dos modelos está en la curva de concentración y la curva de descenso del hidrograma, donde el modelo agregado del SCS representa mayores caudales respecto al de onda cinemática.
 - b) Además considerando lo mencionado anteriormente, el volumen de agua que está expresado por el área bajo el hidrograma, calculado con el modelo agregado del SCS es mayor respecto al de onda cinemática.
 - c) Sin embargo el modelo de onda cinemática comparado con el modelo agregado del SCS representa el caudal pico mayor en un porcentaje aproximadamente de 5 % más.
3. La determinación del hidrograma en el punto de aforo de la cuenca mediante la aplicación del modelo distribuido de onda de difusión y modelo de onda dinámica a nivel de solución bidimensional con los programas Hec-Ras e Iber demuestran lo siguiente:

- a) Una discretización del dominio en mallas más pequeñas permite un mejor ajuste y evita oscilaciones en los resultados del hidrograma.
- b) los caudales pico o máximos del hidrograma con el modelo de onda de difusión son siempre mayores respecto al modelo de onda dinámica, las pruebas desarrolladas demuestran una diferencia aproximada del 25 % para una adecuada discretización de la malla.
- c) En los tres casos de análisis también se observó que el inicio del escurrimiento directo de la curva de concentración del hidrograma es siempre anticipada para el modelo de onda de difusión respecto a la onda dinámica.
- d) Si se compara los resultados de los hidrogramas a nivel de 2D con 1D, tienen mejores aproximaciones los resultados obtenidos del hidrograma con el modelo de onda dinámica mediante el programa Iber respecto al modelo de onda de difusión del Hec-Ras.

En el modelamiento bidimensional del río, ambos modelos tienen buenas aproximaciones en los resultados (parámetros hidráulicos del río) como se detalla a continuación

- a) Los dos modelos bidimensionales representan bien el comportamiento del flujo en los dos casos de análisis realizados del canal, con y sin estructura de protección lateral.
 - b) Las 4 secciones analizadas demuestran que los tirantes obtenidos se aproximan bien para ambos modelos a nivel de 2D y una diferencia considerable respecto a la solución en 1D.
 - c) La evolución de velocidades en el tiempo para las 4 secciones analizadas del río presentan diferencias máximas de 0.35m/s.
4. La estabilidad del método de volúmenes finitos depende mucho de la discretización del dominio en celdas cuyo tamaño sea razonable, y la variación de los pasos de tiempo elegidos para los resultados deben cumplir la condición del número de Courant cuyo valor debe mantenerse entre 0 y 1 para que la solución sea convergente, para valores mayores a 1 los análisis realizados demuestran resultados inconsistentes.
 5. El coeficiente de rugosidad de Manning es un parámetro que se debe seleccionar correctamente apoyándose en mapa de usos de suelo, imágenes satelitales, visita al lugar y fotografías que ayuden caracterizar mejor la cobertura de la superficie, porque su incidencia en el proceso de transformación de lluvia en escorrentía (Hidrograma) genera una considerable variabilidad en los resultados, las pruebas desarrolladas demuestran que a mayor valor del coeficiente de rugosidad de Man-

ning los caudales pico disminuyen, mas en el caso de canales se observó que la diferencia fue mínima.

Recomendaciones

1. Se recomienda el uso de Sistemas de Información Geográfica para la clasificación de mapas de cobertura y usos, mapa de suelos y el MDE, porque estos son datos muy importantes para la selección mas apropiada del número de curva (CN) y el coeficiente de rugosidad de Manning en las aplicaciones de hidrología e hidráulica. Además de que actualmente se cuenta con una facilidad de accesibilidad de estos datos en diversas fuentes electrónicas de forma gratuita, su uso ya no es una limitación.
2. Para el análisis de un río a nivel bidimensional es recomendable contar con una topografía a detalle, el mismo que se puede realizar de distintas maneras a través de equipos topográficos, batimétricos y actualmente por medio del uso de drones más equipos batimétricos cuando el flujo de agua sea permanente e inaccesible. Para la cuencas utilizar los instrumentos anteriormente mencionados podría ser muy incomodo, por la extensión que representan, por lo tanto es preferible el uso del SIG en alta resolución.

Referencia Bibliográfica

Libros

- TR-55. (1986). *Urban hidrology for small watersheds* (2.^a ed.). USDA.
- Akan, A. O. (2006). *Open channel hydraulics* (1.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Chanson, H. (2004). *Environmental hydraulics of open channel flows*. Elsevier Butterworth Heinemann.
- Chapra, S. C. & Canale, R. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- Chaudhry, M. H. (2008). *Open-channel flow* (2.^a ed.). Springer US.
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients* (3.^a ed.). Springer-Verlag New York.
- Chow, V. T. & R. Larry W., D. (1994). *Hidrología aplicada* (1.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana, S.A.
- D. Salas, J. & S. Govindaraju, R. (2014). *Modern water resources engineering* (1.^a ed.). Handbook of Environmental Engineering 15. Humana Press.
- Durrans, S. R. (2003). *Stormwater conveyance modeling and design* (1.^a ed.). Haestad Press.
- McCuen, R. H. (1998). *Hydrologic analysis and design* (2.^a ed.). Prentice Hall.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The finite volume method in computational fluid dynamics an advanced introduction with openfoam® and matlab®* (Volume 113). Springer.
- Stoker, J. (1957). *Water waves (the mathematical theory with applications)*. Institute of Mathematical Sciences New York University.
- Sturm, T. (2001). *Open channel hydraulics* (1.^a ed.). McGraw-Hill Science Engineering Math.
- Szymkiewicz, A. (2013). *Modelling water flow in unsaturated porous media: accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity* (1.^a ed.). GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Szymkiewicz, R. (2010). *Numerical modeling in open channel hydraulics* (1.^a ed.). Water science and technology library 83. Springer Netherlands.

- Toro, E. F. (2009). *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics* (3.^a ed.). Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Tu, J., Yeoh, G., & Liu, C. (2008). *Computational fluid dynamics a practical approach* (1.^a ed.). Elsevier Inc.
- Vázquez-Cendón, M. E. (2015). *Solving hyperbolic equations with finite volume methods* (1.^a ed.). Springer.
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics* (2.^a ed.). Pearson Prentice Hall.

Artículos

- Bermúdez, A. & Dervieux, A. [A.]. (2006). Upwind schemes for the two-dimensional shallow water equations with variable depth using unstructured meshes. *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Inria) HAL*.
- Cardesa, D. & Ignacio, J. (2014). Notas sobre dinámica de fluidos computacional. *Elsevier, Rev. 0.5.5*, 22-26.
- Dervieux, A. [Alain] & Desideri, J.-A. (1992). Compressible flow solvers using unstructured grids. *RR-1732, INRIA*.
- Fenton, J. (2010). Computational hydraulics. *TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie*.
- Lee, D. T. & Schachter, B. J. (1980). Two algorithms for constructing a delaunay triangulation. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 9.
- Mirzazadeh, P. & Akbari, G. (2012). A case study of flood dynamic wave simulation in natural waterways using numerical solution of unsteady flows. *CMCE, Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 3*, 67-77.
- Montoya, V., D, J., & Toro, B. (2006). Tánsito de la onda de choque en canales de alta pendiente. *Avances en recursos hidráulicos*, 13, 3 de 16.
- Nigro, N. & Storti, M. (2007). Métodos numéricos en fenómenos de transporte, 198.
- Q.Q., L. & Chen, L. (2004). Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow. *Elsevier-Journal of Hydrology* 291, 14.
- Rousseau, M. (2012). Overland flow modelling with the shallow water equation using a well balanced numerical scheme: adding efficiency or just more complexity? *HAL*.
- Shultz, E. C., Michael J. and Crosby & McEnery, J. A. (2008). Kinematic wave technique applied to hydrologic distributed modeling using stationary storm events: an application to synthetic rectangular basins and an actual watershed. *Hydrology Days 2008*.

- Sylvain, W., di Chiara-Roupert, R., & Ackerer, P. (2014). Accuracy and efficiency of time integration methods for 1d diffusive wave equation. *Springer International Publishing Switzerland 2014*.
- Szydłowski, M. (2004). Implicit versus explicit finite volume schemes for extreme, free surface water flow modelling. *Gdańsk University of Technology, Faculty of Hydro- and Environmental Engineering*.
- Van Leer, B. (1977). Towards the ultimate conservative difference scheme iii. upstream-centered finite-difference schemes for ideal compressible flow. *University Observatory, Leiden, The Netherlands*.

Normas y Manuales

- Aguirre, N. M. (2007). *Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas*.
- Brunner, G. W. (2016). *Hec-ras river analysis system user's manual*. US Army Corps of Engineers. EEUU.
- Felman, A. D. (2000). *Hydrologic modeling system hec-hms*. Technical Reference Manual.
- Maccaferri. (s.f.). *Manual de revestimiento de canales*.
- MTC. (2008). *Manual de hidrología, hidráulica y drenaje*. Ministerio de Transportes y comunicaciones.
- OS.060, R. (2006). *Reglamento nacional de edificaciones-drenaje pluvial urbano*. El Peruano.

Estudios

- ANA. (2015). *Generación del mapa temático de número de curva*.
- ONERN. (1970). *Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona villa rica-puerto pachitea*. Inventario.
- Oré I., J. (2016). *Informe técnico sobre el comportamiento hidráulico y recomendaciones frente a avenidas de la defensa ribereña villa rica - pasco - Perú*.

Fuente Electrónica

- Canchari G., E. (2013). Delimitar cuencas hidrográficas con arcgis 10. Recuperado desde <https://www.youtube.com/watch?v=ln7p8hONV9o>

- Chávarri Velarde, E. A. (2008). Esguerrimiento superficial. Recuperado desde http://tarwi.lamolina.edu.pe/~echavarri/echv_9.html
- Ponce, V. M. (s.f.). Preguntas y respuestas-sobre el periodo de retorno a ser usado para diseño. Recuperado desde http://ponce.sdsu.edu/periodos_de_retorno_articulo.html
- Portal turístico Selva Central, T. (2017). Información general de villa rica. Recuperado desde <https://selvacentral.com.pe/informacion-general-villa-rica/>
- Rodríguez Tello, E. A. (2013). Triangulaciones de delaunay. Recuperado desde <http://www.tamps.cinvestav.mx/~ertello/gc/sesion18.pdf>
- Tizón Pulido, J. M. (s.f.). Seminario de simulación numérica en sistemas de propulsión. Recuperado desde http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/Members/jmtizon/libre-eleccion/curso_actual/30_Mallas.pdf

Apéndice A

Análisis unidimensional

A.1. Resultados del análisis 1D del río Entaz

Simulación del río Entas a partir de la solución de la ecuación de energía mediante el método del paso estándar para el caso de flujo mixto (combinación subcrítico y supercrítico).

Tabla A.1: Principales parámetros de simulación hidráulica 1D

Resultados del análisis 1D en Hec-Ras 5.0.3						
Estación. (-)	(E.N.S.A.*) (<i>m.s.n.m</i>)	Thalweg (<i>m.s.n.m</i>)	Tirante (<i>m</i>)	Velocidad (<i>m/s</i>)	Esfuerzo Cortante (<i>N/m²</i>)	Número de Froude (-)
1500	1499.15	1496.98	2.17	6.41	544.33	1.47
1475	1498.07	1496.26	1.81	6.81	649.36	1.7
1450	1497.53	1495.62	1.91	5.94	481.71	1.43
1425	1497.73	1495.08	2.65	4.6	264.36	0.97
1400	1496.74	1494.15	2.59	5.65	421.27	1.29
1375	1496.09	1493.6	2.49	5.72	452.7	1.4
1350	1495.12	1492.83	2.29	5.82	504.49	1.59
1325	1494.92	1492.43	2.49	4.79	310.79	1.13
1300	1494.02	1492.13	1.89	5.5	418	1.35
1275	1493.26	1491.11	2.15	5.68	440.79	1.36
1250	1492.68	1490.49	2.19	5.57	427.27	1.35
1225	1492.15	1490.31	1.84	5.41	407.45	1.34
1200	1491.6	1489.77	1.83	5.34	399.49	1.34
1175	1491.72	1489.58	2.14	4.17	231.9	0.97

Sigue ...

Tabla A.1: Principales parámetros de simulación hidráulica 1D (continuación...)

Resultados del análisis 1D en Hec-Ras 5.0.3						
Estación. (-)	(E.N.S.A.*) (<i>m.s.n.m</i>)	Thalweg (<i>m.s.n.m</i>)	Tirante (<i>m</i>)	Velocidad (<i>m/s</i>)	Esfuerzo Cortante (<i>N/m²</i>)	Número de Froude (-)
1150	1490.82	1488.31	2.51	4.97	330.86	1.15
1125	1490.43	1487.57	2.86	5.03	311.4	1.02
1100	1489.62	1487.41	2.21	6.05	467.5	1.32
1075	1489.01	1486.66	2.35	6.13	469.94	1.29
1050	1488.02	1485.81	2.21	6.77	603.48	1.54
1025	1487.27	1484.63	2.64	6.89	589.97	1.42
1000	1487.51	1484.66	2.85	5.77	388.75	1.1
975	1486.97	1484.49	2.48	5.31	349.57	1.1
950	1486.36	1484.28	2.08	5.59	411.1	1.27
925	1485.72	1483.44	2.28	5.8	440.59	1.31
900	1484.9	1482.92	1.98	6.45	557.74	1.51
875	1483.85	1482.49	1.36	6.07	571.82	1.77
850	1484.03	1481.96	2.07	3.62	179.91	0.88
825	1483.53	1481.55	1.98	4.22	253.8	1.08
800	1482.68	1481.2	1.48	4.9	362.74	1.37
775	1482.14	1480.56	1.58	4.47	307.84	1.29
750	1481.86	1480.34	1.52	3.49	193.5	1.05
725	1481.41	1479.49	1.92	3.25	159.47	0.91
700	1480.98	1479.01	1.97	3.55	187.48	0.97
675	1480.46	1478.51	1.95	3.92	224.02	1.04
650	1479.86	1477.82	2.04	4.69	292.77	1.09
625	1479.13	1477.03	2.1	5.79	432.93	1.28
600	1478.38	1476.29	2.09	5.67	422.3	1.28
575	1477.41	1475.71	1.7	5.76	472.34	1.47
550	1476.66	1475.11	1.55	5.32	468.21	1.7
525	1475.55	1474	1.55	5.13	431.32	1.6
500	1475.04	1473.31	1.73	4.4	281.68	1.16
475	1474.52	1472.74	1.78	4.39	278.9	1.15
450	1474.34	1471.7	2.64	2.93	107.69	0.62
425	1474.2	1471.13	3.07	3.07	112.21	0.6
400	1473.67	1470.66	3.01	3.97	186.9	0.77
375	1473.54	1470.18	3.36	3.96	179.33	0.72
350	1471.42	1469.81	1.61	6.83	675.93	1.79

Sigue ...

Tabla A.1: Principales parámetros de simulación hidráulica 1D (continuación...)

Resultados del análisis 1D en Hec-Ras 5.0.3						
Estación. (-)	(E.N.S.A.*) (<i>m.s.n.m</i>)	Thalweg (<i>m.s.n.m</i>)	Tirante (<i>m</i>)	Velocidad (<i>m/s</i>)	Esfuerzo Cortante (<i>N/m²</i>)	Número de Froude (-)
325	1471.46	1469.47	1.99	5.11	357.35	1.23
300	1470.7	1468.78	1.92	5.45	409.51	1.33
275	1469.24	1468.24	1	5.85	626.22	2.18
250	1469.48	1467.7	1.78	3.64	195.29	0.97
225	1469	1467.4	1.6	3.9	224.12	1.05
200	1468.42	1466.88	1.54	4.11	263.33	1.19
175	1467.97	1466.09	1.88	4.05	239.44	1.07
150	1467.17	1465.42	1.75	4.62	324.89	1.29
125	1466.85	1464.8	2.05	3.29	160.23	0.89
100	1466.12	1464.29	1.83	3.06	147.96	0.91
75	1465.56	1463.76	1.8	3.3	172.03	0.99
50	1464.86	1463.23	1.63	4.58	311.37	1.25
25	1464.2	1462.59	1.61	4.74	324.83	1.24
0	1463.71	1462.13	1.58	3.75	221.45	1.11

Fuente: Elaboración propia

(*) Elevación del Nivel de Superficie del Agua (E.N.S.A.)

Apéndice B

Pasos para modelar mediante los programas Hec-Ras 5.0.3 e Iber 2.3.2

B.1. Guía para la modelación mediante Hec-Ras 5.0.3

Antes de iniciar con la asignación de datos espaciales y datos de flujo, se deben configurar los siguientes parámetros:

- Definición del sistema de unidades (Sistema métrico/internacional)
- Definir el nombre del proyecto y la carpeta donde se guardarán los archivos.

B.1.1. Importación de los Datos Espaciales

Abrir la ventana de GEOMETRIC DATA, definir un nombre, guardarlo y abrir la ventana de RAS MAPPER, la introducción de datos espaciales al modelo es mediante la interacción de estas dos ventanas.

Dentro la ventana RAS MAPPER se procede a:

- Establecer la proyección del sistema de referencia de coordenadas de la zona de estudio a modelar, mediante las herramientas Qgis/ArcMap se puede extraer el archivo PRJ del DEM, e importarlo al Hec-Ras.
- Importación del Modelo Digital de Terreno al Hec-Ras, este acepta los formatos TIF, FLT y ADF, es posible importar a la vez mas de un mapa DEM, utilidad

que es empleado para unir diferentes DEM's según la prioridad que se le asigne y tener un archivo de terreno compuesto, una vez creado la capa de terreno, se debe exportar este mismo como imagen para la base de fondo visual que se utilizará al digitalizar la malla 2D en la ventana GEOMETRIC DATA.

- Importación del Mapa de Uso de Suelo, este acepta directamente el formato SHP, se define la columna que contiene el identificador de las unidades del uso del suelo, y el tamaño de celda que se utilizara para su rasterización a formato GeoTiff, conversión interna que realiza el programa Hec-Ras.
- Alternativamente es posible cargar una capa de mapas para uso visual de fondo, estas deben estar con la misma georeferenciación del proyecto, los archivos que importa son los GML, SHP y VRT. Si no se dispone de una imagen de fondo es posible descargar una imagen directamente desde la web, dispone de conexión automática de mas de 20 plataformas de imágenes espaciales, la re proyección que se realizara es definida por el usuario.
- Finalmente se asocia, conecta el modelo digital de terreno importado, en la capa de Geometrías y en la subcapa Geometría2D (nombre del archivo geométrico).

B.1.2. Generación de la malla 2D

Para la modelación bidimensional se requiere generar la malla 2D y su tamaño de celda en base al Modelo Digital de Terreno este es realizado dentro la ventana de GEOMETRIC DATA.

- Se carga la imagen de fondo visual que se exporto en el procedimiento de importación del modelo digital del terreno.
- Se procede a digitalizar el área de nuestra malla con la herramienta 2D FLOW AREA (Tools), se debe tener cuidado que este debe estar dentro nuestra imagen de fondo referencial, si el área se encuentra fuera, este reportara un error que no se tiene datos de terreno para parte de área.
- Se asigna el tamaño de celda con la herramienta 2D FLOW AREA (Editors), para el área de estudio se define un tamaño de celda a criterio, cuanto menor es el tamaño de la celda se tiene mejores resultados, pero un mayor tiempo de proceso. Este tamaño no debe exceder las dimensiones del cauce del río.

B.1.3. Asignación de Condiciones de Borde y Datos de Flujo

Una de las ventajas de la modelación bidimensional es que se puede asignar las condiciones de contorno alrededor de cualquier punto del DEM. La modelación se realiza bajo las condiciones de flujo no permanente, por disponer los hidrogramas de caudales.

- En la ventana GEOMETRIC DATA se digitaliza mediante una polilínea la sección transversal por donde ingresa el flujo a los ríos, y por donde sale el flujo del modelo, indistintamente, este proceso solo es digitalización y asignación de nombres, mediante la herramienta SA/2D AREA BC LINES
- Se define y abre la ventana UNSTEADY FLOW DATA, se puede observar que se encuentran los nombres con lo que se asignaron las condiciones de borde.
- Para el ingreso de flujo a los ríos se selecciona como el FLOW HYDROGRAPH, en estas se introducen los datos de los hidrogramas y las condiciones de borde.
- Para la salida del flujo del modelo se selecciona la condición de borde NORMAL DEPTH y se introduce la condición de borde de este.

B.1.4. Asignación de los coeficientes de rugosidad (n)

En la importación del mapa de uso de suelo solo se importa las unidades de uso, los coeficientes de rugosidad de Manning deben ser asignados desde la ventana GEOMETRIC DATA, en la sección de Tables/Manning's by Land Classification, en este aparecerá una tabla con las unidades a asignar los coeficientes de rugosidad.

B.1.5. Corrida del modelo 2D y sus parámetros

Los parámetros que determinan la precisión de la modelación bidimensional se deben a las variables del tamaño de celda y el paso de tiempo computacional a calcular. Se puede utilizar un paso de tiempo computacional de 5 segundos para tener una buena precisión de datos, el intervalo de reportes de mapas se ha configurado para cada 10 minutos. El tiempo total de simulación es el tiempo de los hidrogramas.

B.2. Guía para la modelación mediante Iber 2.3.2

Para la modelación bidimensional con Iber se requiere de los mismos datos que en el programa Hec-Ras, la diferencia está en algunos otros procedimientos adicionales que se deben de seguir.

B.2.1. Preparación de los archivos

Antes de dar inicio al cargado de los datos se deben preparar estos en formatos específicos:

- El Modelo Digital de Terreno en formato GeoTIFF debe ser convertido al formato ASCII.
- El mapa de Uso de Suelo en formato SHP, se debe realizar una nueva codificación numérica a cada unidad de Uso, este se rasteriza con un tamaño de pixel, y posteriormente es convertido al formato ASCII. Adicionalmente se debe extraer el archivo de proyección que tiene este mapa.
- Se debe crear un archivo CVS, la primera columna debe tener la nueva codificación numérica asignada en el anterior procedimiento y la segunda columna debe contener los nombres de las unidades de Uso de Suelo.
- Para la imagen de fondo, que se utiliza como referencia visual debe ser un archivo de imagen normal en formato TIF o alternativamente en JPG, y debe tener su archivo de proyección en formato TWF.

B.2.2. Discretización del Modelo Digital de Terreno a RTIN

En este primer procedimiento se definirá el tamaño de la celda que se utilizará en la modelación, este proceso consiste en discretizar la superficie del terreno en triángulos rectángulos isósceles, según la precisión indicada, luego el programa IBER indica que debemos de colapsar la geometría con la finalidad de eliminar líneas duplicadas. Este se realiza por medio del menú Herramientas Iber/RTIN/Crear RTIN

B.2.3. Hidrodinámica – Condiciones de Contorno

Al igual que en Hec-Ras se asignan las condiciones de contorno de ingreso y salida de flujo, con la diferencia de que en Iber esto se asigna y cargan los hidrogramas simultáneamente, mediante la barra de menú *Datos/Hidrodinámica/Condiciones de Contorno*

Para las condiciones iniciales, se debe definir seleccionando todo el área de estudio para asignar una condición inicial de altura de agua, inclusive si se tiene 0 como inicio se debe asignar, en el Hec-Ras este valor esta por defecto.

B.2.4. Asignación de mapa de uso de suelo y coeficientes de rugosidad de Manning(n)

Antes de importar el mapa de uso de suelo, se deben crear las unidades de uso de suelo designado en el archivo CVS, exactamente con el mismo nombre, esto se realiza mediante el menú Datos/Rugosidad/Usos de Suelo, en esta sección se crean los nombres y se asignan sus coeficientes.

Se procede a importar el mapa uso de suelo mediante el menú Datos/Rugosidad/Asignación Automática, éste se dibujará automáticamente sobre la malla con las diferentes unidades de Usos de Suelo.

B.2.5. Cálculo del modelo 2D y sus parámetros

Una vez introducido todos los datos para la modelación se procede a modelar, mediante el menú Datos/Datos del Problema se introduce como tiempo máximo de simulación el tiempo de duración del hidrograma, y el intervalo de tiempo para el reporte de resultados que se desea. Una vez configurado se procede a correr para calcular el modelo bidimensional con los datos introducidos.

Apéndice C

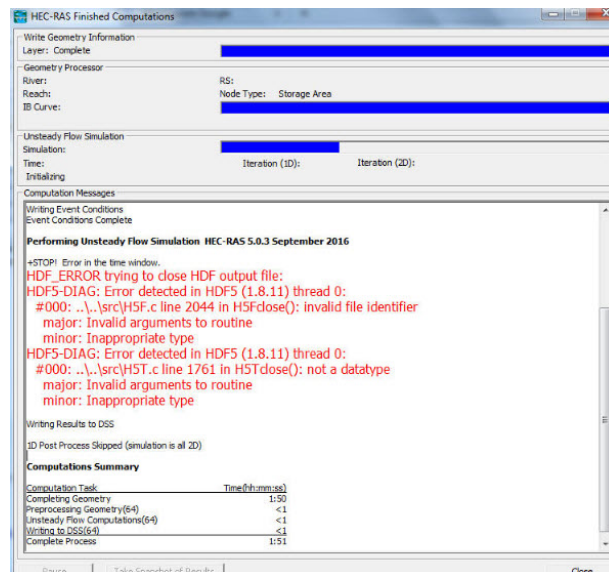
Errores Hec-Ras

C.1. Errores-Análisis bidimensional

C.1.1. Errores de configuración

Muchas veces ocurre este error al momento de iniciar los cálculos en Hec-Ras

Figura C.1: HDF ERROR



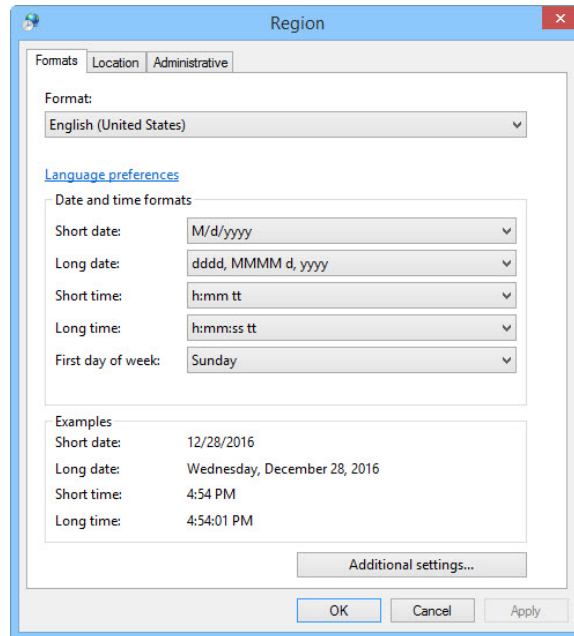
Fuente: Hec-Ras 5.0.3

Para solucionar se debe tener en cuenta esta recomendación

La primera línea de este mensaje de error indica que hay un error con la ventana de tiempo. A menudo este error es un resultado de un formato de fecha incorrecto que se

utiliza. También es posible debido a que no se está utilizando la configuración regional English(United States). Para cambiar, ingresar al panel de control y modificar la Región y el idioma a Inglés EE.UU. Ver figura C.2

Figura C.2: Configuración de Idioma



Fuente: Sistema operativo windows 10

Apéndice D

Fotografías de visita al proyecto: Defensa Ribereña Villa Rica

Figura D.1: Fotografía del inicio del proyecto: Defensa Ribereña Villa Rica



Fuente: Fotografía propia

Figura D.2: Armado de gaviones caja en obra



Fuente: Fotografía propia

Figura D.3: Movimiento de suelo para instalación del muro de gaviones



Fuente: Fotografía propia