

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**"MODELADO HIDRÁULICO DEL RÍO AMOJÚ APLICANDO EL
SOFTWARE IBER PARA ZONIFICAR ÁREAS INUNDABLES EN LA
CIUDAD DE JAÉN, PERÚ"**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
CIVIL**

Presentada por:

Bach. DIANA YOSDALI GARCÍA TOCTO

Asesor:

Ing. JUAN ALBERTO OLANO GUZMÁN

Co-asesor:

PhD. Ing. SANTOS OSWALDO ORTIZ VERA

**Jaén – Perú
2019**



"Año de la Lucha Contra la Corrupción y la Impunidad"

ACTA DE APROBACIÓN DE TESIS

Siendo las 11.00 am, del día viernes 17 de mayo del 2019, reunidos en la sala de docentes de la Universidad Nacional de Jaén, los Miembros del Jurado:

- Mg. Ing. Wilder Rosalino Gómez Penadillo (Presidente)
- Ing. Angel Gregorio Germán Niquén Inga (Secretario)
- Mg. Ing. Benito Uribe Roman Vasquez (Vocal)
- Ing. Juan Alberto Olano Guzmán (Asesor)

2. Con la finalidad de llevar a cabo la Sustentación de Informe de Tesis Titulado: **"Modelado hidráulico del Río Amojú aplicando el Software Iber para zonificar áreas inundables en la ciudad de Jaén, Perú"**, presentado por la tesista: **Diana Yosdali García Tocto**.
3. Los Miembros del Jurado, presencian la sustentación del Informe de Tesis denominado: **"Modelado hidráulico del Río Amojú aplicando el Software Iber para zonificar áreas inundables en la ciudad de Jaén, Perú"**, luego se procede a realizar las preguntas correspondientes para ser contestadas por la tesista, los Miembros del Jurado de Tesis luego de escuchar la defensa de la tesista, deliberan y deciden aprobar la sustentación, siendo el calificativo final:

Regular	Buena	Muy Buena	Sobresaliente
11-12	13-14-15	16-17-18	19-20
_____	_____	_____ <i>16</i>	_____

Siendo las 12:30 pm, del mismo día, se procede a firmar la presente en señal de conformidad y elevar a las autoridades competentes para el trámite correspondiente.

Presidente

Nombre: Mg. Ing. Wilder Rosalino Gómez Penadillo

Firma

Secretario

Nombre: Ing. Angel Gregorio Germán Niquén Inga

Firma

Vocal

Nombre: Mg. Ing. Benito Uribe Roman Vasquez

Firma

Dedicatoria

A Dios;

Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos,

A mi madre;

Por ser el principal pilar en la construcción de mi vida profesional, por su motivación constante y su amor.

A mi familia;

Porque siempre confiaron en mis capacidades cognitivas y actitudinales, las que me permitieron concluir este reto.

A mis maestros y amigos;

Que me apoyaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

Agradecimiento

A mi asesor y co-asesor de tesis;
Por su apoyo en la concretización de la presente investigación y por haberme guiado a lo largo de mi carrera universitaria brindándome la orientación profesional

A la Universidad Nacional de Jaén, a toda la Carrera Profesional de Ingeniería Civil, a mis profesores; por sus valiosos conocimientos que permitieron mi formación profesional.

INDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	MARCO TEÓRICO	3
2.1.	ANTECEDENTES	3
2.1.1.	INTERNACIONALES	3
2.1.2.	NACIONALES	4
2.1.3.	LOCALES	4
2.2.	REVISIÓN LITERARIA	5
2.2.1.	CARTOGRAFÍA DIGITAL	5
2.2.1.1.	TOPOGRAFÍA	5
2.2.1.2.	FOTOGRAMETRÍA	6
2.2.1.3.	TELEDETECCIÓN	6
2.2.1.4.	MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)	7
2.2.2.	CUENCA HIDROGRÁFICA	8
2.2.2.1.	CLASIFICACIÓN DE CUENCAS	8
2.2.2.2.	PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA	10
2.2.3.	HIDROLOGÍA	13
2.2.3.1.	EL CICLO HIDROLÓGICO	13
2.2.3.2.	PRECIPITACIONES	14
2.2.3.3.	REGISTROS DE FLUJO	20
2.2.3.4.	ESCURRIMIENTO	21
2.2.3.5.	PERIODO DE RETORNO (T)	22
2.2.3.6.	ESTIMACIÓN DE CAUDALES	22
2.2.4.	HIDRÁULICA	27
2.2.4.1.	CLASIFICACIÓN DE RIOS	28
2.2.4.2.	CLASIFICACIÓN DEL FLUJO	31
2.2.4.3.	ELEMENTOS GEOMÉTRICOS	32
2.2.4.4.	DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES	32
2.2.4.5.	RUGOSIDAD COMPUESTA EN CANALES NATURALES	33
2.2.4.6.	MODELACIÓN NUMÉRICA	39
2.2.4.7.	DIMENSIONALIDAD	39
2.2.4.8.	MALLAS DE CÁLCULO	40
2.2.5.	SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON IBER VERSIÓN 2.4.3	40
2.2.5.1.	ESTRUCTURA DEL CÁLCULO CON IBER	41
2.2.5.2.	ECUACIONES HIDRODINÁMICAS	41
2.2.5.3.	CONDICIONES DE CONTORNO HIDRODINÁMICAS	42

2.2.5.4.	MALLA DE CÁLCULO CON IBER	45
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	46
3.1.	ÁMBITO DE ESTUDIO	46
3.1.1.	CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMOJÚ	46
3.1.2.	TRAMO DEL RÍO EN ESTUDIO	48
3.1.3.	ESTRUCTURAS EXISTENTES	54
3.2.	MATERIALES Y EQUIPOS	58
3.2.1.	IMÁGENES SATELITALES	58
3.2.2.	TOPOGRAFÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO	59
3.2.3.	INFORMACIÓN HÍDRICA	61
3.2.4.	EQUIPOS	62
3.3.	METODOLOGÍA DEL TRABAJO	63
3.3.1.	ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS	63
3.3.2.	INTENSIDAD MÁXIMA ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO	68
3.3.3.	DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO.	72
3.3.3.1.	MÉTODO SCS PARA ABSTRACCIONES	72
3.3.3.2.	HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SNYDER	80
3.3.4.	MAPA DE USO DE SUELOS DE LA ZONA EN ESTUDIO	85
3.3.5.	MODELADO HIDRÁULICO EN IBER	88
3.3.5.1.	IMPORTACIÓN DE ORTOFOTO Y MAPA DE USO DE SUELO	88
3.3.5.2.	ASIGNACIÓN DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD (N)	89
3.3.5.3.	ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO Y DATOS DE FLUJO	89
3.3.5.4.	GENERACIÓN DE LA MALLA	90
3.3.5.5.	ASIGNACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN	91
3.3.5.6.	CORRIDA DEL MODELO 2D	91
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	92
4.1.	ANÁLISIS DEL PERFIL DEL RÍO	92
4.1.1.	PERFIL HIDRÁULICO	92
4.1.2.	SECCIONES TRANSVERSALES	93
4.1.3.	PARÁMETROS HIDRÁULICOS	93
4.1.4.	TIRANTES MÁXIMOS DEL FLUJO	95
4.1.5.	VELOCIDADES DEL FLUJO	96
4.1.6.	RÉGIMEN DE FLUJO	98
4.2.	CALIBRACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO	100
4.3.	IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE INUNDACIÓN	101

V. CONCLUSIONES	103
VI. RECOMENDACIONES	105
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Formas geométricas de cuencas hidrográficas en base a rangos del coeficiente de Gravelius	10
Tabla 2. Índice de ramificación de la red de drenaje de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para áreas menores a 600 Km ² , escala 1/100 000	12
Tabla 3. Potencial de degradación hídrica de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para menores de 600 Km ² , escala 1/100 000	12
Tabla 4. Condiciones antecedentes de humedad para determinar el valor de CN	18
Tabla 5. Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)	19
Tabla 6. Valores de cálculo de coeficiente de rugosidad para la ecuación [26]	34
Tabla 7. Coeficientes de rugosidad de Manning para diferentes canales	35
Tabla 8. Condiciones de contorno implementadas en los contornos abiertos	44
Tabla 9. Propiedades de la cámara del dron	60
Tabla 10. Información de parámetros Generales de la cuenca del río Amojú.	63
Tabla 11. Parámetros de forma de la cuenca en estudio del río Amojú	63
Tabla 12. Parámetros de relieve de la cuenca en estudio del río Amojú	65
Tabla 13. Parámetros de drenaje de la cuenca en estudio del río Amojú	67
Tabla 14. Ubicación de la Estación Meteorológica Jaén	68
Tabla 15. Tormenta de diseño - método del bloque alterno	70
Tabla 16. Tormenta de diseño - método del bloque alterno	73
Tabla 17. Grupos hidrológicos del suelo	75
Tabla 18. Áreas de uso de suelos	77
Tabla 19. Cálculo del Número de Curva	78
Tabla 20. Cálculo de Precipitaciones Efectivas	79
Tabla 21. Componentes básicos del Hidrograma Unitario de Snyder	81

Tabla 22. Coordenadas del Hidrograma Unitario de Snyder	82
Tabla 23. Caudales en m ³ /s*cm en intervalos de tiempo de 0.50 horas	83
Tabla 24. Caudales resultantes en m ³ /s en intervalos de tiempo de 0.50 horas	83
Tabla 25. Método de Cowan para determinar el número de Manning en el río Amojú	87
Tabla 26. Método de Cowan para determinar el número de Manning en la zona urbana	87
Tabla 27. Número de Manning para los Usos de suelos	87
Tabla 28. Parámetros hidráulicos de la progresiva 0+20 a 2+140 del río Amojú	93
Tabla 29. Áreas inundables generadas a lo largo de los márgenes del río	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unidades Hidrográficas del Perú	9
Figura 2. El ciclo hidrológico	13
Figura 3. Diagrama de abstracción inicial	16
Figura 4. Hidrograma Unitario de Snyder	25
Figura 5. Morfología de un cauce meandriforme	30
Figura 6. Morfología de un cauce trezado	30
Figura 7. Distribución de velocidades en canal natural	32
Figura 8. Ejemplo de malla no estructurada formada por elementos triangulares	45
Figura 9. Delimitación de la cuenca del río Amojú hasta su desembocadura	47
Figura 10. Delimitación de la cuenca del río Amojú – Zona en estudio	47
Figura 11. Relieve de la cuenca del río Amojú – Zona en estudio	48
Figura 12. Márgenes del río en el sector El Parral	49
Figura 13. Márgenes del río en el tramo central de la ciudad	50
Figura 14. Márgenes del río en el sector San Camilo	51
Figura 15. Márgenes del río en el sector San Camilo – parte baja	52
Figura 16. Tramo en estudio – Modelamiento Hidráulico	53
Figura 17. Puente Orellana desde una vista aérea	54
Figura 18. Puente Pardo Miguel desde una vista aérea	54
Figura 19. Puente Mesones Muro desde una vista aérea.	55
Figura 20. Puente Mesones Muro desde una vista aérea	56
Figura 21. Puente Pakamuros desde una vista aérea	56
Figura 22. Imágenes del Satélite SRTM Versión 3.0 Global 1 – Procesados por la NASA	58
Figura 23. Imágenes de los Satélites Perú–SAT y SPOT – Procesados por CONIDA	59
Figura 24. Sección transversal del río Amojú en la progresiva 0+000 – ubicado en el sector San Camilo	59

Figura 25. Modelo digital de elevación obtenido del procesamiento en el software Agisoft	60
Figura 26. Ortofoto de la zona en estudio para el modelado hidráulico.	61
Figura 27. Delimitación de la cuenca del río Amojú	64
Figura 28. Escala de pendientes de la cuenca del río Amojú	65
Figura 29. Perfil longitudinal del río Amojú	66
Figura 30. Red de drenaje de la cuenca del río Amojú	67
Figura 31. Gráfico de las curvas IDF para un riesgo de predicción del 25%	69
Figura 32. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para una vida útil de 40 años y un riesgo admisible es $R=0.25$, para una duración hasta de 990 minutos.	69
Figura 33. Hietograma de diseño para un tiempo de retorno de 140 años	71
Figura 34. Mapa de tipo de suelos - MINAM	72
Figura 35. Mapa de tipo de suelos según su grupo hidrológico	76
Figura 36. Mapa de uso de suelos de la cuenca del río Amojú.	77
Figura 37. Histograma de Precipitaciones Iniciales Vs Precipitaciones Efectivas	80
Figura 38. Hidrograma Sintético de Snyder de la cuenca del río Amojú.	82
Figura 39. Hidrograma Resultante de caudales de diseño de la cuenca del río Amojú	84
Figura 40. Mapa de uso de suelos de la zona en estudio.	85
Figura 41. Importación de ortofoto y mapa de uso de suelos en IBER	88
Figura 42. Mapa de uso de suelos generado en IBER	89
Figura 43. Condiciones hidrodinámicas de contorno	89
Figura 44. Malla no estructurada de la zona en estudio	90
Figura 45. Elevación generada de malla no estructurada en IBER.	91
Figura 46. Procesamiento del modelo	91
Figura 47. Perfil hidráulico del río Amojú del tramo de estudio	92
Figura 48. Profundidades del río Amojú del tramo de estudio	95
Figura 49. Valores de calados del flujo	96

Figura 50. Velocidades del río Amojú del tramo de estudio	97
Figura 51. Velocidades del flujo	97
Figura 52. Números de Froude del flujo del río Amojú del tramo de estudio	98
Figura 53. Número de froude del flujo	99
Figura 54. Medición en campo de la huella de agua de la máxima avenida.	100
Figura 55. Comparativo de las medidas en campo y tirante del flujo en la sección de la progresiva 0+960.	100
Figura 56. Áreas de inundación del río Amojú del tramo de estudio	101
Figura 57. Zonificación de áreas de inundación del río Amojú del tramo de estudio	102

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Información Pluviométrica para Intensidades Máximas	109
ANEXO 2: Proceso de convolución de precipitaciones: $Q(t)=Pe(t)*HU(t)$	110
ANEXO 3: Parámetros del procesamiento en Agisoft	111
ANEXO 4: Seccionamiento del tramo en estudio del río Amojú	113
ANEXO 5: Perfil Hidráulico del río	114
ANEXO 6: Secciones del cauce del río Amojú	115
ANEXO 7: Fotografías del lecho del río	123
ANEXO 8: Fotografías del levantamiento topográfico con Estación Total del tramo en estudio del río Amojú para la modelación hidráulica	125
ANEXO 9: Fotografías del levantamiento topográfico con Dron del tramo en estudio del río Amojú para la modelación hidráulica	130

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue modelar hidráulicamente el río Amojú a lo largo del tramo urbano de la ciudad de Jaén, a fin de identificar zonas de mayor probabilidad de inundación frente a fenómenos pluviométricos de gran intensidad. Para ello, se realizó primero el análisis de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú, tomando como punto de salida el extremo del tramo efluente de la ciudad de Jaén. Luego se realizó el análisis hidrológico aplicado a las intensidades máximas de precipitación de la Estación Meteorológica en Jaén, obteniéndose un caudal total de 150 m³/s para las coordenadas de predicción hidrológica: horizonte de predicción 40 años; incertidumbre de predicción 25% y tiempo de retorno 140 años. Luego, con el resultado del análisis hidrológico se realizó la simulación hidráulica utilizando el modelo numérico bidimensional IBER, esta permitió identificar las áreas más inundables. Respecto a los resultados sobre la modelación hidráulica del tramo en estudio, estos muestran que las zonas con mayores áreas de inundación para un tiempo de retorno de 140 años y un riesgo admisible de 0.25, se encuentran en la zona 1 con 0.929 hectáreas inundables; zonas 2, con 0.482 hectáreas inundables; zona 5, con 0.504 hectáreas inundables; y la mayor área de inundación se encuentra en la zona 6, que corresponde al sector San Camilo con un área de inundación de 2.633 hectáreas.

Palabras claves: Río Amojú, modelo IBER, análisis hidrológico, modelado hidráulico, inundación.

ABSTRACT

The main objective of this research was the hydraulic modelling along the urban stretch of the Amaju River in Jaen city, in order to identify areas with the highest probability of flooding concerning to hydrometeorological phenomena and hazards. Therefore, first, a number of geomorphological parameters of the Amaju River Basin were analyzed; establishing the drainage basin on the other side, in the eastern area of Jaen city. Second, hydrological analysis of the Amaju River Basin was conducted, applied to the maximum rainfall intensity of the Jaen Weather Station; determining a total flow rate of 150 m³/s for the hydrological prediction coordinates: predictive horizon up to 40 years, uncertainty of the prediction 25% and payback time 140 years. Third, with the result from the hydrological analysis, hydraulic simulation was performed using the 2D numerical model IBER, which identified the flooding areas. Finally, the hydraulic modeling results of the section in study show that the areas of highest risks by flooding from overflowing Amaju River for a payback time of 140 year and admissible risk of 0.25, are found in Area 1 with a flooded land of 0.929 hectares; Area 2 with 0.482 hectares; Area 5 with 0.504 hectares; and the largest flooded land area is found in Area 6, in San Camilo area, with a flooded land of 2.633 hectares.

Keywords: Amaju River, IBER Model, hydrological analysis, hydraulic modelling, flooding area.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente los sistemas fluviales evidencian grandes alteraciones en sus ciclos naturales debido a las actividades nocivas generadas por el ser humano: tala indiscriminada de las cabeceras de cuenca, desarrollo de sistemas industriales, crecimiento vertiginoso de los parques automotores, negligente manejo de los residuos, etc. Por otro lado, evidenciamos una endeble cultura de desarrollo urbano sostenible: nuestros municipios carecen de planes de desarrollo, los ciudadanos son proclives al desacato de las normas, las invasiones de fajas marginales y llanuras de fácil inundación son recurrentes en casi todo el país, etc. Las consecuencias que se desprenden de estas actividades irresponsables generan cuantiosas pérdidas económicas al estado y a las familias, impiden un crecimiento social sostenible, limitan la inversión del estado y la empresa privada, entre otros.

Los ríos que tenemos en nuestro país, la mayoría, son jóvenes, nacen en cordilleras y montañas que son muy vulnerables a las actividades tangibles, muestran caudales y cursos irregulares; a diferencia de los ríos viejos que discurren en valles amplios y planicies, con pendientes bajas, en estados de mayor equilibrio. Debido a estas condiciones de nuestros ríos y quebradas nos hallamos expuestos a constantes peligros ante cualquier eventualidad climatológica.

La ciudad de Jaén no escapa a esta problemática, pues el río Amojú, que atraviesa toda la zona urbana de la ciudad, presenta riesgos inminentes de inundación en ambos márgenes ante cualquier fenómeno pluvial de regular magnitud. En este sentido, el objeto de la presente investigación fue identificar y zonificar las áreas inundables en ambos márgenes del río Amojú mediante el proceso de modelación hidráulica considerando la ocurrencia de una máxima avenida.

Como objetivos específicos se plantearon:

- Determinar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú
- Recopilar y procesar información hidrológica.

- Determinar el caudal máximo de una probable avenida extraordinaria
- Recopilar y procesar información topográfica de la zona de estudio.
- Aplicar la Modelación hidráulica del tramo en estudio del río Amojú y generar mapas de inundación.

Para ello, se realizó la modelación hidrológica de una máxima avenida en la cuenca del río Amojú, obteniéndose un caudal de 120 m³ /s para las coordenadas de predicción hidrológica: horizonte de predicción 40 años; incertidumbre de predicción 25% y tiempo de retorno 140 años. Luego se aplicó el modelado hidráulico empleando el modelo Iber por constituir una metodología que garantiza la confiabilidad de los resultados. Posteriormente se elaboró mapas de zonificación de las áreas inundables en todo el tramo de influencia urbana. Estos resultados servirán a las autoridades de gestión local para que, en coordinación con el Instituto Nacional de defensa Civil (INDECI), tomen las decisiones más adecuadas a efecto de prevenir desastres y pérdidas económicas o de vidas humanas ante cualquier fenómeno natural.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. INTERNACIONALES

La ocurrencia de fenómenos naturales siempre ha concitado en el hombre una preocupación constante por encontrar explicaciones causales, analizar variables interrelacionadas, identificar impactos de la actividad humana a fin de adoptar medidas de prevención. En la actualidad, muchos países investigan temas de inundaciones para un mejor conocimiento y manejo del recurso hídrico a fin prevenir desastres y pérdidas económicas y humanas ante la presencia de estos fenómenos. Para ello es necesario conocer las zonas más vulnerables hidrológicas e hidráulicamente ante una inundación causada por probables avenidas máximas, aplicando diferentes metodologías.

Díez (2001), desarrolló la investigación titulada «Geomorfología e Hidrología Fluvial del río alberche. Modelos y S.I.G. para la gestión de riberas», cuyo objetivo fue caracterizar, interpretar y modelar utilizando de manera conjunta los estudios geomorfológicos e hidrológicos realizados de la cuenca hidrográfica del río Alberche, con especial incidencia en el estudio de las crecidas fluviales y su aplicación a la gestión de riberas. En esta investigación se usó el esquema correlacional.

La investigación utilizó Sistemas de Información Geográfica, permitiéndole realizar estudios hidrológicos, geomorfológicos y modelamientos hidráulicos en el software HEC-1, después analizó e interpretó estos estudios de manera conjunta, llegando a la conclusión, que mediante el análisis hidrológico y geomorfológico se ha conseguido modelar la respuesta del sistema fluvial del río Alberche y su dinámica ante eventos extremos y a la intervención antrópica en el mismo.

2.1.2. NACIONALES

A nivel nacional también se han realizado estudios en diferentes cuencas existentes como la cuenca de Río Chancay en el departamento de Lambayeque. Tejada (2014), en su tesis titulada «Estudio Hidrológico de Máximas Avenidas, de la Subcuenca Juana Ríos- Cuenca: Chancay-Lambayeque»; planteó como objetivo principal determinar los caudales máximos del Río Chancay – Lambayeque de la Subcuenca Juana Ríos. En el desarrollo de esta investigación se realizaron pruebas de campo y trabajos de gabinete; se utilizaron los programas Hydroesta, Autocad Civil 3D, programas de simulación hidrológica y hojas de cálculo Excel. El tipo de investigación fue descriptiva y concluyó: determinando los caudales de la Subcuenca Juana Ríos- Cuenca: Chancay- Lambayeque para diferentes tiempos de retorno.

Velásquez (2015), también realizó un estudio relacionado a este tema, cuyo título fue «Modelamiento Hidrológico e Hidráulico del Rio Santa, Tramo Asentamiento Humano las Flores, Distrito de Carhuaz, Ancash»; fue una tesis descriptiva y tuvo como objetivo elaborar mapas de inundaciones del tramo del rio Santa, comprendido entre el sector Asentamiento Humano Las Flores y la Quebrada Bruja Armanan, Provincia de Carhuaz, Ancash. Para ello se realizó un modelado hidrológico de la cuenca con el software de modelación Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System, mediante el hidrograma sintético del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), luego realizó el modelado Hidráulico con el software Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS), lo que permitió obtener los perfiles hidráulicos. También se hizo uso de la extensión denominada Hydrological Engineering Center – Geospatial River Analysis System (HEC-GEORAS) para generar los mapas de inundación lo que permitió determinar que el cauce del río santa tiene la probabilidad de afectar áreas pobladas al margen derecho; causando daños materiales y posibles pérdidas de vidas humanas.

2.1.3. LOCALES

Valdivia (2014) en su investigación titulada «Determinación del área de inundación por máxima avenida de la quebrada Amojú, en la zona urbana de la ciudad de Jaén - Cajamarca» planteó como objetivo principal determinar zonas inundables del tramo urbano de la ciudad de Jaén.

En dicha investigación el autor utilizó el método Racional Modificado para realizar el análisis hidrológico, que le permitió calcular los caudales máximos para diferentes tiempos de retorno y, utilizando el modelo unidimensional HEC-RAS, realizó el análisis hidráulico que le permitió determinar las áreas inundables. Sus resultados fueron que el Sector San Camilo y el Sector El Parral eran consideradas como probables zonas de inundación ante una máxima avenida.

2.2. REVISIÓN LITERARIA

2.2.1. CARTOGRAFÍA DIGITAL

Esta ciencia estudia los diferentes métodos para representar una porción o su totalidad de la tierra sobre un plano en una escalada reducida, haciendo uso de otras ciencias que determinan los puntos de la tierra en sistemas de referencia (Santamaría, 2011). Si la superficie a representar es pequeña se representa como un plano, pero si es una superficie extensa, se debe tener en cuenta la curvatura de tierra.

En la representación cartográfica se simplifica el dibujo cuanto menor sea la escala, se usan símbolos, cuando el objeto representado no siempre se encuentra en escala. En el desarrollo de la base digital se integran productos cartográficos existentes, que pueden estar digitalizados y fueron obtenidas mediante trabajo en campo, como las fotografías aéreas o las imágenes satelitales (Departamento de Asuntos Económicos y Sociales – División de Estadística, 2000).

Se extraen datos para la generación de dichos mapas cartográficos, empleando mediciones adquiridas de manera directa o indirecta, utilizando la topografía o Geodesia, fotogrametría o teledetección.

2.2.1.1. TOPOGRAFÍA

La topografía es la ciencia que se encarga de realizar mediciones de una porción pequeña de la tierra, y representarla en un plano horizontal, de acuerdo a una escala determinada, teniendo en cuenta su posición planimétrica y su altitud (Mendoza, 2010).

Estos datos topográficos se obtienen haciendo trabajos de campo mediante el uso de equipos topográficos como estación total, GPS diferencial, entre otros; estos datos son procesados, por lo general haciendo uso de sistemas digitales como CAD.

2.2.1.2. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría es la ciencia que hace uso de fotografías para hacer medidas, con el objetivo de generar planos y mapas con exactitud y agilidad, partiendo de estas imágenes analizadas (Quirós, 2014). La distancia focal y la altura del vuelo son elementos importantes a tener en cuenta. El trabajo en campo para tomar las fotografías se usan los UAV, que se trata de un vehículo volador no tripulado, conocido como Dron.

A la calidad de la imagen digital se denomina resolución espacial y está en función al tamaño del pixel, la imagen pierde información si el pixel es muy grande, en cambio la imagen es de una buena calidad, si el pixel es demasiado pequeño, necesitando bastante espacio de almacenamiento (Quirós, 2014). Siendo la unidad en la que se expresa la resolución ppp (píxeles por pulgada).

Los pixeles son valores que se almacenan y que formarán la imagen y en cada pixel almacena valor ponderado de cualquier energía reflejada correspondiente su área en el suelo de acuerdo con la GSD utilizado.

La trayectoria de un sobrevuelo es de forma de cuadrícula. Los solapes mínimos son entre 75% (frontal) y al menos el 60% (lateral). La posición de la cámara estará totalmente perpendicular apuntando al suelo (plano cenital).

2.2.1.3. TELEDETECCIÓN

Ciencia que permite obtener información de la superficie del planeta, a partir de la captura de imágenes desde satélites, incluyendo su procesamiento e interpretación de dichas imágenes (Labrador, Évora & Arbelo, 2012).

Existen diferentes satélites como es DCM (Disaster Monitoring Constellation); EARTH OBSERVING-1 (EO-1) satélite experimental de la NASA del denominado “New Millennium Program”, EROS-A/EROS-B (Earth Resources Observation Satellite) serie de satélites comerciales de nacionalidad israelí, FORMOSAT-2 satélite de nacionalidad taiwanesa, GEOEYE-1 satélite comercial estadounidense de muy alta resolución, IKONOS satélite comercial de muy alta resolución espacial; LANDSAT; QUICKBIRD satélite comercial

norteamericano de muy alta resolución operado por la compañía DigitalGlobe, Perú-SAT satélite peruano, monitoreado por la Agencia Espacial del Perú – CONIDA.

Se adquieren diferentes tipos de imágenes de teledetección, el tipo de producto más común que suministran los satélites de teledetección es una imagen digital tipo ráster, donde cada pixel tiene valores, en relación a la energía recibida.

- **Imagen Multiespectral (MS):** Es la imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor; además nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen (Labrador, Évora & Arbelo, 2012).
- **Imagen Pancromática (PAN):** Este tipo de imagen dispone de una sola banda espectral, y se da en una escala de grises, posee una mejor resolución espacial.
- **Imagen Fusionada (PS):** Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión entre una imagen multiespectral y una imagen pancromática. Consiste en asignar a cada píxel de la imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral.
- **Imagen Estéreo:** Se refiere a dos imágenes tomadas en la misma zona, pero en diferentes ángulos, se suelen emplear para generar modelos de elevación del terreno.

2.2.1.4. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE)

Es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, siendo una distribución continua, es decir describe la altimetría de la zona, permitiendo obtener datos morfológicos del terreno como pendientes, orientaciones (Felicísimo, 1994).

Para elaborar un MDE pueden obtenerse a través de levantamientos de campo, métodos fotogramétricos y digitando elevaciones a partir de hojas topográficas; el trabajo de campo es el método más costoso, pero el que genera los datos de mejor calidad.

2.2.2. CUENCA HIDROGRÁFICA

Una cuenca hidrográfica es el área total donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para ser drenadas naturalmente por un solo curso de agua, llegando a un mismo punto de salida o efluente (Villón, 2002). También se define como cualquier parte de la superficie de la tierra dentro de un límite definido por pendientes topográficas que desvían toda la escorrentía hacia el mismo drenaje salida; por lo tanto, una cuenca hidrográfica es definido con respecto a la salida, y que habitualmente no coincide necesariamente con los límites territoriales o jurisdiccionales (Singh, 1992).

La discretización o delimitación de sistemas hidrológicos se funda en el principio de que la línea divisoria de aguas es una línea neutral de flujo, por lo que el fundamento científico está dado por la teoría de la red de flujo superficial (O. Ortiz, 2015), tal como se aprecia en la ecuación [1].

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \quad [1]$$

Donde: ψ, ϕ , es la línea de corriente superficial (cauces naturales) y la línea de potencial hidráulico (curva de nivel), respectivamente; x, y , es el plano horizontal de proyección de la cuenca.

2.2.2.1. CLASIFICACIÓN DE CUENCAS

Todo el proceso hidrológico ocurre en la cuenca, dependiendo del tipo de cuenca, estos procesos varían en espacio y tiempo dentro de esa cuenca hidrográfica. Los principales factores que contribuyen a la variabilidad de procesos hidrológicos son: topografía, suelo, geología, vegetación, el uso de la tierra y la red de flujo.

Hay dos criterios hidrológicamente significativos para la clasificación de una cuenca, y son el tamaño y el uso de la tierra (Singh, 1992); asimismo, las cuencas también se clasifican en función a su salida, existiendo dos tipos de cuencas; pueden ser endorreicas y exorreicas.

Las cuencas endorreicas tienen el punto de dentro de los límites de la cuenca, siendo generalmente el caso de los lagos, en cambio el punto de salida en las cuencas exorreicas se encuentra en los límites de la cuenca, en la unión con otra corriente, o en el mar (Aparicio, 1992).

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), en el Perú existen 159 cuencas denominadas unidades hidrográficas (UH), las que conforman tres regiones hidrográficas; 62 cuencas conforman la región hidrográfica del Pacífico, 84 cuencas conforman la región hidrográfica del Amazonas y 13 cuencas conforman región hidrográfica del Titicaca.



Figura 1. Unidades Hidrográficas del Perú
Fuente: (Aparicio, 1992)

Asimismo, dentro de las 159 cuencas, existen 34 cuencas transfronterizas, donde dicha denominación se debe a que su delimitación de aquellas unidades hidrográficas involucra a países limítrofes.

Las cuencas de la vertiente del pacífico se ubican en la zona costera; caracterizándose por tener una morfología accidentada, angosta y cañones pronunciados, facilita los torrentes por una limitada amplitud en sus partes bajas.

Las cuencas del Atlántico se caracterizan por una mayor precipitación pluvial en las partes altas, contar con valles interandinos más anchos y un recorrido más largo y amplio de sus ríos en sus partes medias y por las partes bajas que son tropicales húmedas.

Las cuencas hidrográficas que desembocan en el lago Titicaca se caracterizan por la irregularidad de los torrentes de sus cursos de agua que provienen también de las partes altas de la cordillera occidental.

2.2.2.2. PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS DE LA CUENCA

a. PARÁMETROS DE FORMA

Sólo se trata aquí los parámetros más representativos de la cuenca, los suficientes como para explicar la hidrodinámica de los sistemas hidrológicos de manera cabal.

- **Índice de compacidad o coeficiente de Gravelius**

Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una cuenca hipotética circular equivalente al área de la cuenca. Lo que significa que este cociente será siempre mayor que la unidad y que la geometría afecta el hidrograma pico de escorrentía directa.

$$K_c = 0.28 p \times A^{-1/2} \quad [2]$$

Donde: K_c , es el coeficiente de Gravelius; p , el perímetro de la cuenca; A , el área proyectada de la cuenca sobre un plano horizontal.

Tabla 1.

Formas geométricas de cuencas hidrográficas en base a rangos del coeficiente de Gravelius

Formas de sistemas hidrológicos con base en el coeficiente de Gravelius		
Clase de geometría	Rango de clase	Forma de la cuenca
K_{c1}	$1 < K_C \leq 1.25$	Oval redonda
K_{c2}	$1.25 < K_C \leq 1.50$	Oval oblonga
K_{c3}	$1.50 < K_C \leq 1.75$	Oblonga alargada

Fuente: Henaos, (1988).

“Las cuencas de forma alargadas, reducen las probabilidades de que sean cubiertas en su totalidad por una tormenta, lo que afecta al tipo de respuesta que se presenta en el río” (Villón, 2002, p.42). Este parámetro tiene una estrecha relación con el tiempo de concentración, la infiltración y el escurrimiento superficial. Para el cálculo de la pendiente de la cuenca destacan dos métodos: criterio de Albord y criterio de Horton.

- **Tiempo de concentración**

Es el tiempo que demora una gota en recorrer el camino desde el punto hidráulicamente más lejano hasta el punto efluente de la cuenca. Hay muchas expresiones aproximadas para estimarlo, se sugiere emplear la expresión que contenga el mayor número de variables. Una de estas expresiones es:

$$t_c = C(L \times L_c \times S^{-1/2})^{0.38} \quad [3]$$

$$0.20 \leq C \leq 0.4$$

Donde: t_c , es el tiempo de concentración de la cuenca (minutos); L, longitud de máximo recorrido (Km); L_c es la longitud al centroide; S, la pendiente del máximo recorrido; C, coeficiente que depende sólo de la pendiente del máximo recorrido.

b. PARÁMETROS DE LA RED HIDROGRÁFICA

- **Relación de confluencias**

Es la relación entre el número de cauces naturales de cierta categoría al número de cauces de categoría inmediatamente superior. La relación de confluencia es el promedio de los valores parciales.

$$r_c = n_i \times n_{i+1}^{-1} \quad R_c = \frac{1}{N} \sum r_{ci} \quad [4]$$

Donde: r_c , es la relación de confluencias parcial; n_i , el número de cauces naturales de categoría i; n_{i+1} , el número de cauces naturales categoría i+1; R_c , relación de confluencias promedio entre los N valores parciales. La categorización de cuenca conviene hacerlo mediante las Leyes de Horton.

Tabla 2.

Índice de ramificación de la red de drenaje de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para áreas menores a 600 Km², escala 1/100 000

Índice de ramificación de la red de drenaje	Valores de relación de confluencias promedio, Rc
Muy alto	1<Rc≤3
Alto	3<Rc≤4
Moderado	4<Rc≤5
Bajo	Rc>5

Fuente: O. Ortiz (2015)

c. PARÁMETROS DE RELIEVE

- **Coficiente orográfico**

Es la relación entre el cuadrado de la altitud media sobre el nivel del mar y el área proyectada de la cuenca. Es un indicador del potencial degradable de una cuenca (O. Ortiz, 2015).

$$C_o = H^2 \times A^{-1} \quad H = \frac{1}{A} \sum H_i \times \Delta A_i \quad A = \sum \Delta A_i \quad [5]$$

Donde: C_o, es el coeficiente orográfico; H, la altitud media sobre el nivel del mar; A, es el área proyectada de la cuenca.

Tabla 3.

Potencial de degradación hídrica de microcuencas altoandinas de la región Cajamarca, para menores de 600 Km², escala 1/100 000

Potencial de erosión hídrica	Coficiente orográfico, Co (%)
Baja	Co <1
Moderada	1<Co≤4
Alta	4<Co≤10
Muy alta	Co > 10

Fuente: O. Ortiz (2015)

2.2.3. HIDROLOGÍA

2.2.3.1. EL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico ocurre de forma continua, se muestra en forma esquemática como el agua se evapora desde los océanos, y la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor del agua se condensa y se precipita sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada, se convierte en flujo superficial sobre el suelo, y una cantidad se infiltra a través del suelo, convirtiéndose en un flujo subsuperficial, para recargar el agua subterránea de donde emerge en manantiales o descarga en ríos como escorrentía superficial; y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera, generando la continuidad del ciclo hidrológico (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

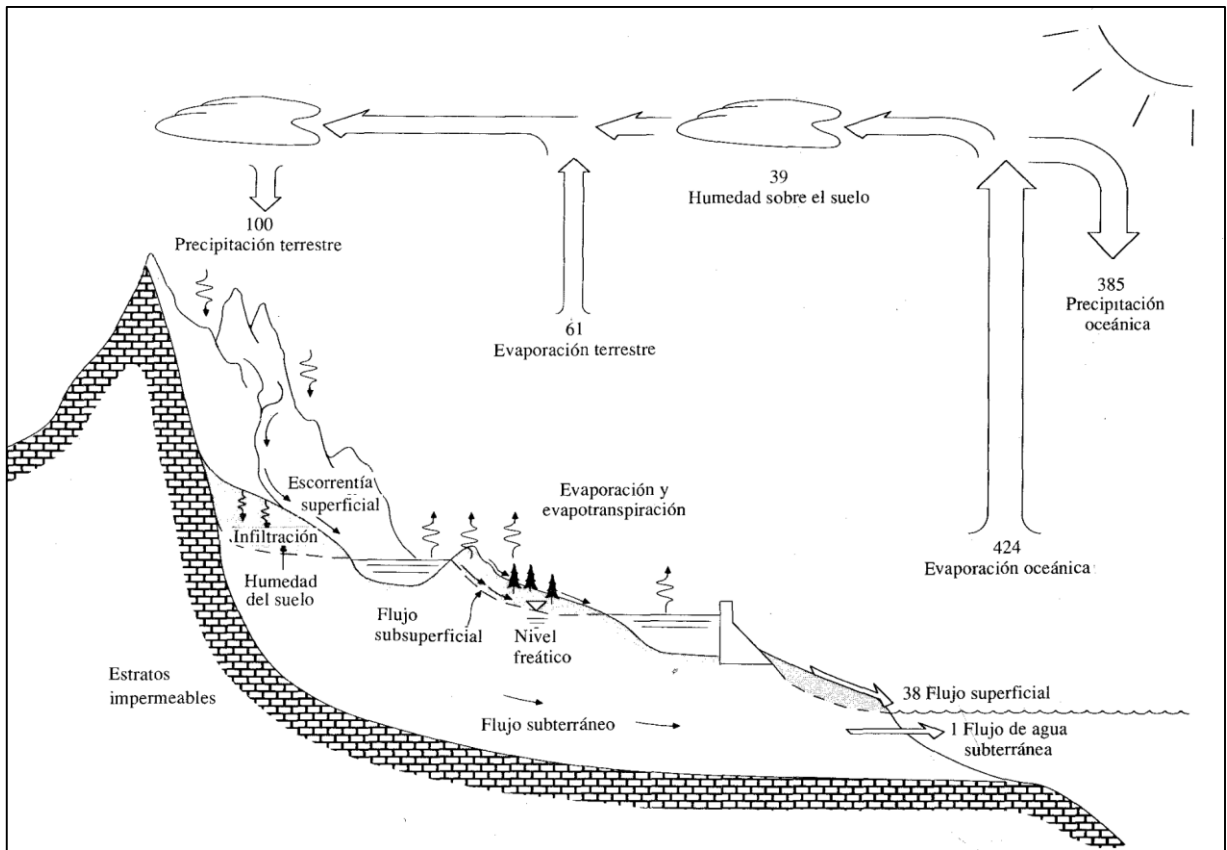


Figura 2. El ciclo hidrológico

Fuente: Tomado de Hidrología Aplicada. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Se muestra el esquema del ciclo hidrológico, partiendo de la evaporación oceánica, una parte se condensa y se precipita y la otra parte se une con la evaporación terrestre, se condensa y se precipita, al caer una parte se infiltra en el suelo hasta que quede saturado y la otra parte se convierte en flujo superficial, formando las fuentes de agua, el agua infiltrada una parte se convierte en una reserva de agua para alimentar al flujo superficial en épocas de estiaje y la otra parte se une al flujo subterráneo; desembocando los dos flujos en el mar, para luego continuar este ciclo hidrológico.

2.2.3.2. PRECIPITACIONES

Los aspectos atmosféricos de la precipitación, son procesos hidrológicos que ocurren y dejan huellas permanentes de sus efectos en la cuenca de drenaje en sí; la evidencia de estas impresiones se muestra en la topografía superficial y se exhiben en los canales de la corriente por su propia longitud, número y dimensión; y están relacionadas con el tipo de suelo, la geología y vegetación (Singh, 1992). Pues la comprensión de las pistas que se muestran en un drenaje, la cuenca es vital para una predicción exitosa del comportamiento hidrológico de ese drenaje.

Es un factor importante dentro del esquema del ciclo hidrológico; definiéndose como “toda forma de humedad que, originándose en las nubes llega hasta la superficie del suelo” (Villón, 2002, p.69); presentándose como lluvias, garúas, nieve, o granizo.

Las precipitaciones son la fuente primaria del agua de la superficie terrestre; siendo sus mediciones y análisis el inicio para el estudio de uso y control del agua.

a. LA INFILTRACIÓN

La infiltración es un proceso natural vital, se determina restando la abstracción de la precipitación que ocurren en la cuenca de drenaje. La abstracción más importante que afecta a la escorrentía es generalmente la porción de precipitación que se pierde por infiltración; suministrando por infiltración la mayor parte del agua a las plantas y a muchos animales (Singh, 1992).

Es un complejo sistema de componentes orgánicos e inorgánico, donde el agua es conducida al suelo poroso por la fuerza de la gravedad y por la atracción capilar de los poros del suelo; las fuerzas adhesivas que atraen dos moléculas diferentes de agua y material del suelo también actúan en concierto con las fuerzas capilares (tensión superficial). A medida que más agua ingresa al suelo, el resultado de estas fuerzas es hacer que el agua penetre en las aberturas en la superficie del suelo y migre hacia abajo, formando numerosos meniscos en las interfaces entre el aire y el agua. Con más agua entrando en el suelo, los meniscos son destruidos. Entonces la fuerza de la gravedad toma el control y mueve el agua hacia la capa freática.

Cuando el suministro de agua del suelo (por ejemplo, la lluvia) se detiene, el agua se percola (o se mueve hacia abajo) por la gravedad hasta que los meniscos comienzan a reaparecer, y las fuerzas de la tensión superficial comienzan a dominar nuevamente, sosteniendo agua en los poros; siendo este proceso llamado infiltración.

En general, los procesos de transporte vertical dominan en la zona no saturada y los procesos de transporte horizontal en la zona saturada. Sin embargo, se producen grandes desviaciones de esta regla general debido a la variación en la topografía y material geológico complejo; el suelo y la estructura geológica determinan qué tan rápido y qué camino tomará el agua una vez que se haya infiltrado a través de la superficie del suelo (Ojha, Berndtsson & Bhunya, 2008).

b. PRECIPITACIÓN EFECTIVA

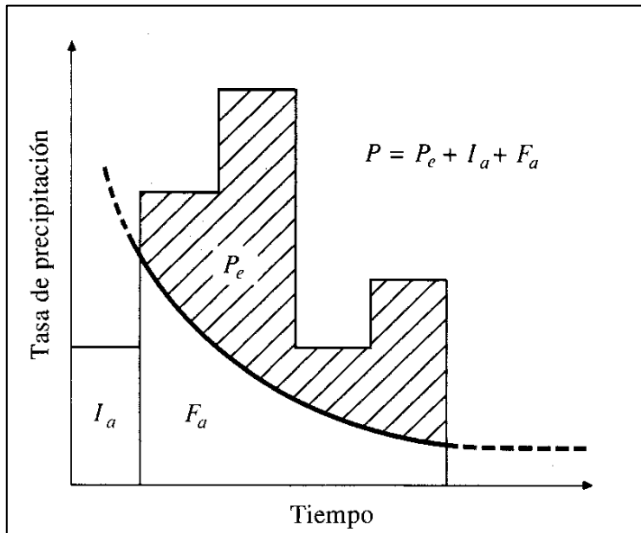
La precipitación al caer al suelo, una parte se infiltra convirtiéndose en agua subterránea, o se retiene en el suelo; otra parte fluye a través de la superficie terrestre, considerándose esta como el exceso de precipitación o precipitación efectiva, la cual se convierte en escorrentía directa en el punto de salida de la cuenca, bajo la suposición de flujo superficial hortoniano, es decir que la tasa de precipitación en la superficie excede la tasa a la capacidad de infiltración en la tierra (MTC, 2008).

Las gráficas de exceso de precipitación vs. el tiempo o hietograma de exceso de precipitación es un componente clave para el estudio de las relaciones lluvia-escorrentía. La diferencia entre el hietograma de lluvia total y el hietograma de exceso de precipitación se conoce como abstracciones o pérdidas.

- **Método SCS para abstracciones**

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) fue establecido para proporcionar asistencia técnica a granjeros, rancheros y otros residentes rurales a través de ingenieros ubicados en cada condado. Desarrolló un método para calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta (Soil Conservation Service, 1969).

Para la tormenta como un todo, la profundidad de la precipitación efectiva o escorrentía directa P_e es siempre menor o igual a la profundidad de precipitación total P ; de manera similar, después de que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca F_a es menor o igual a alguna retención potencial máxima S . Existe una cierta cantidad de precipitación I_a (abstracción inicial antes del encharcamiento) para lo cual no ocurrirá escorrentía, luego la escorrentía potencial es $P - I_a$ (Chow, Maidment, & Mays, 1994).



I_a = Abstracción inicial
 P_e = Exceso de Precipitación
 F_a = Abstracción continuada
 P = Precipitación total

Figura 3. Diagrama de abstracción inicial
 Fuente: Hidrología Aplicada. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Las hipótesis fundamentales del método SCS-CN son las siguientes:

- La escorrentía comienza después de que se haya satisfecho una abstracción inicial (I_a). Esta abstracción consiste principalmente en interceptación, almacenamiento de superficie e inflación.
- La relación entre la retención real de la lluvia y la retención máxima potencial S es igual a la relación entre la escorrentía directa y la lluvia menos la abstracción inicial.

Siendo la expresión matemática:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad [6]$$

Del principio de continuidad:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad [7]$$

Combinando las ecuaciones [6] y [7] para despejar P_e :

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad [8]$$

El Servicio de Conservación de Suelos expresó $I_a = 0.2S$. Físicamente, esto significa que, para una tormenta dada, el 20% de la retención máxima potencial es la abstracción inicial antes de que comience la escorrentía; entonces, $0.8S$ representa otras pérdidas de retención, incluidas la intercepción, la infiltración, la evapotranspiración y el almacenamiento de la depresión (Singh, 1992). Por lo tanto:

$$P_e = \frac{(P - 0.2 \times S)^2}{P + 0.8 \times S} \quad [9]$$

El parámetro S depende de las características del suelo, la vegetación, uso de la tierra, y las condiciones de humedad del suelo antecedente en una cuenca. El Servicio de Conservación de Suelos expresó S como una función de lo que se denominó como número de curva (Singh, 1992); El número de curva y S se relacionan por la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad [10]$$

El número de curva es adimensional, donde los valores oscilan entre $0 \leq CN \leq 100$. Para superficies impermeables y superficies de agua $CN = 100$; para superficies naturales $CN < 100$.

Los números de curvas se aplican para condiciones para condiciones antecedentes de humedad (AMC), la cual se refiere al contenido de agua presente en el suelo en un momento dado (Singh, 1992). El Servicio de Conservación de Suelos desarrolló tres condiciones antecedentes de humedad del suelo y las etiquetó como I, II y III. Estos AMC corresponden a las siguientes condiciones del suelo:

AMC I: los suelos están secos, pero no al punto de marchitez; cultivo satisfactorio ha hablado lugar.

AMC II: condiciones promedio, humedad normal.

AMC III: Condiciones húmedas, lluvias fuertes, o lluvias ligeras y bajas temperaturas han ocurrido dentro de los últimos 5 días; suelo saturado.

Tabla 4.
Condiciones antecedentes de humedad para determinar el valor de CN

<i>Condiciones antecedentes de humedad (AMC)</i>	<i>Lluvia antecedente total de 5 días (pulg.)</i>	
	<i>Estación Inactiva</i>	<i>Estación Activa</i>
I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
II	0.5 a 1.1	1.4 a 2.1
III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: (Soil Conservation Service, 1969)

Los números de curva equivalentes pueden calcularse por:

$$CN(I) = \frac{4.2 \times CN(II)}{10 - 0.058 \times CN(II)} \quad [11]$$

$$CN(III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0.13 \times CN(II)} \quad [12]$$

El valor de CN se determina a partir del tipo de suelo y las condiciones de humedad del antecedente, han sido tabulados por el Soil Conservation Service con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo A. Los suelos en este grupo tienen un bajo potencial de escurrimiento (tasas de alta infiltración) incluso cuando están completamente mojados. Consisten en arenas o gravas profundas, bien o excesivamente bien drenados. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.

Grupo B: Los suelos en este grupo tienen tasas de infiltración moderadas cuando están completamente mojados y consisten principalmente en suelos moderadamente profundos a profundos, bien drenados a moderadamente bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas. Estos suelos tienen una tasa moderada de transmisión de agua.

Grupo C: Los suelos tienen tasas de infiltración lentas cuando se mojan fuertemente y consisten en suelos con una capa que impide el movimiento descendente del agua, o suelos con textura moderadamente fina a fina. Estos suelos tienen una tasa baja de transmisión de agua.

Grupo D: Los suelos tienen un alto potencial de mono fusión (tasas de infiltración muy lentas) cuando está completamente mojado. Estos suelos consisten principalmente en suelos arcillosos con alto potencial de hinchamiento, suelos con una capa freática alta permanente, suelos con una capa de arcilla o capa de arcilla cerca de la superficie, y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa muy baja de transmisión de agua.

Tabla 5.

Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, suburbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, Ia = 0.2S)

<i>Descripción de uso de la tierra</i>		<i>Grupo Hidrológico del Suelo</i>			
		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Tierra cultivada: Sin tratamiento de conservación		72	81	88	91
Con tratamiento de conservación		62	71	78	81
Pastizales: Condiciones pobres		68	79	86	89
Condiciones optimas		39	61	74	80
Vegas de ríos: Condiciones optimas		30	58	71	78
Bosques: Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas		45	66	77	83
Cubierta buena		25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.					
Óptimas condiciones: Cubierta de pasto en el 75% o más.		39	61	74	80
Condiciones aceptables: Cubierta de pasto en el 50% al 75%		49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeable)		89	92	94	95
Distritos Industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Parqueadores pavimentados, techos, accesos, etc.		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Residencial:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeable				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
¼ acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
½ acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84

Fuente: (Soil Conservation Service, 1969)

2.2.3.3. REGISTROS DE FLUJO

No se puede realizar una evaluación hidrológica precisa sin datos precisos. Muchas agencias gubernamentales, empresas privadas y las personas se dedican a la recolección de datos hidrológicos. La recolección de información de mediciones hidrológicas es fundamental para conocer el comportamiento de la cuenca, por ello mientras más puntos de aforo existe en la cuenca de estudio es mejor para obtener un resultado más similar a la realidad.

Si bien los procesos hidrológicos varían con el tiempo (Series de tiempo) y en el espacio estos se miden como muestras puntuales, es decir mediciones hechas a través del tiempo en lugares fijos (estaciones de medición).

- **Registros de la Precipitación**

Las precipitaciones en una cuenca son muy importantes e indispensables para el estudio hidrológico de dicha cuenca. Según sea la necesidad del estudio, se usa la información de las precipitaciones con diferentes valores; es decir se puede usar el valor de la precipitación máxima en 24 horas, precipitación mensual, precipitación media mensual, precipitación media anual.

Para obtener esta información en campo, se puede medir con dos tipos de instrumentos:

Medidores sin registro: Hace referencia al pluviómetro, que mide la lámina total de lluvia durante una tormenta con una regla, sin importar la duración que haya tenido.

Medidores con registro: Hace referencia al pluviógrafo, que registra los resultados mediante un gráfico en un papel o en digital con unidades en mm/h.

“Se debe tener especial cuidado en la elección del sitio para la instalación del aparato de medición, en cuanto a su facilidad de acceso, como de evitar factores que distorsionan la medición como cercanías de árboles o edificios” (Fattorelli & Fernandez, 2011, p.80)

- **Registros de Caudales**

El caudal es una cantidad de agua que pasa por una sección en un cierto instante, se puede calcular en función del nivel de la corriente y la velocidad del flujo, es decir la velocidad no es la misma en cualquier punto en la sección transversal del río.

“Se asume que existe, para una sección de un curso de agua, una relación biunívoca entre caudal y nivel (escala de la sección) que permite obtener el caudal con la observación del nivel del agua” (Fattorelli & Fernandez, 2011, p.72).

La velocidad del flujo se mide con correntómetro en diferentes puntos de la sección de la sección transversal del cauce. “La medición con correntómetro se basa en el conteo del número de revoluciones que da una hélice colocada en el sentido de flujo, las cuales son proporcionales a la velocidad del flujo” (Cahuana y Yugar, 2009, p.134).

Hay que tener en cuenta que existen diferentes métodos para medir el caudal; ya sea construyendo estructuras artificiales que funcionen como aforadores o vertederos, pero también existen métodos indirectos para realizar las mediciones en campo por ejemplo el limnómetro y el limnógrafo.

Los limnómetros son escalas graduadas en centímetros que están en el lecho sujetos en dentro de una sección de control que miden el nivel de agua de los ríos, son observados a diario por un operador y registran continuamente las variaciones del nivel del agua. Son dos los sistemas fundamentales de funcionamiento de estos aparatos: uno basado en el registro del movimiento de un flotador y otro basado en el registro de la variación de la presión del agua.

2.2.3.4. ESCURRIMIENTO

El escurrimiento es el agua que proviene de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta el punto de salida de la cuenca, Aparicio (1992). Para ello sigue diversos caminos, donde se podría considerar el escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y el escurrimiento subterráneo.

La cuenca de drenaje puede considerarse como un sistema que convierte las precipitaciones en escurrimiento, durante este proceso, la cuenca de drenaje retiene parte de la lluvia para su uso propio; este uso incluye todos los elementos de pérdida o abstracciones de las ecuaciones de escurrimiento.

La cuenca controla la velocidad a la que se producirá la escorrentía y el grado en que se concentrará el agua de escorrentía; en otras palabras, gobierna el flujo de salida de una precipitación dada, y la forma y magnitud del hidrograma de escorrentía, incluida la descarga máxima resultante de este volumen de escorrentía (Singh, 1992). Así, la clave para predecir la respuesta de escorrentía de cualquier cuenca de drenaje es la comprensión de la cuenca así misma.

Por el momento, la infiltración es el principal factor contribuyente responsable de las pérdidas de agua debido a la lluvia, que no aparece como escorrentía en la corriente. El agua de lluvia se infiltra a través de la superficie del suelo una vez que excede la capacidad de infiltración del suelo; por lo tanto, solo el exceso de precipitaciones conducirá a la escorrentía (Ojha, Berndtsson & Bhunya, 2008).

2.2.3.5. PERIODO DE RETORNO (T)

Según indica el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2015), es el tiempo promedio medido en años, en el valor del Caudal máximo de una avenida es igualado o superado una vez cada ese periodo de retorno (T), calculándolo en función a un riesgo de falla admisible (R) para una vida útil (n) de la estructura en n años, representándose en la siguiente ecuación:

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad [13]$$

2.2.3.6. ESTIMACIÓN DE CAUDALES

Existen métodos que permiten determinar el escurrimiento en una cuenca mediante las características de la misma que se obtienen en campo y la precipitación obtenida a través de mediciones directas en el caso de predicción de avenidas frecuentes. (Aparicio, 1992)

A continuación, se verán varios métodos que permiten convertir las precipitaciones en escurrimiento para obtener un caudal de diseño.

a. MÉTODO RACIONAL

Según indica el M.T.C. (2015) este método permite obtener el caudal máximo a partir de la precipitación, abarcando todas las abstracciones en el coeficiente de escorrentía estimado, teniendo en cuenta las características de la cuenca. Muy usado para cuencas, $A < 10 \text{ Km}^2$.

$$Q = 0.278 C \times I \times A \quad [14]$$

Dónde:

Q: Descarga máxima de diseño (m^3/s)

C: Coeficiente de escorrentía

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h)

A: Área de la cuenca (Km^2)

El coeficiente de escorrentía será de acuerdo a las características de la cuenca tanto hidrológico como geomorfológico.

b. MÉTODO RACIONAL MODIFICADO

Este método se realizó a partir de estudios realizados para las cuencas de España, “Permite estimar de forma sencilla caudales punta en cuencas de drenaje naturales con áreas menores de 770 km^2 y con tiempos de concentración (T_c) de entre 0.25 y 24 horas” (MTC, 2008, p.42).

$$Q = 0.278 C \times I \times A \times k \quad [15]$$

Dónde:

Q: Descarga máxima de diseño (m^3/s).

C: Coeficiente de escorrentía.

I: Intensidad de precipitación máxima horaria (mm/h).

A: Área de la cuenca (Km^2).

K: Coeficiente de uniformidad.

c. HIDROGRAMA UNITARIO

El hidrograma unitario es el hidrograma de escorrentía directa o también se puede definir que es un modelo lineal simple que puede usarse para deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

También se puede definir el Hidrograma unitario de una cuenca como “hidrograma de escurrimiento debido a una precipitación con altura en exceso (hpe) unitaria, repartida uniformemente sobre la cuenca, con una intensidad constante durante un periodo específico de tiempo” (Villón, 2002, p.210). Este hidrograma unitario de escurrimiento se produce a partir de una lluvia efectiva repartida uniformemente en la cuenca con una duración (de).

Dado que el UH es aplicable solo para escurrimiento directo o de superficie, se requiere la separación del flujo de base del hidrograma de escorrentía total. Para obtener el DRH, se deben observar varias suposiciones al aplicar el método UH. No es posible ajustar estas suposiciones a la perfección, pero deben estar razonablemente satisfechas antes de que se pueda utilizar el método UH. La Aplicación de UH sin tener en cuenta los supuestos limitantes, puede dar lugar a resultados erróneos (Singh, 1992).

Dentro de estos hidrogramas unitarios se puede realizar por medio del hidrograma S generada por una precipitación continua en una duración infinita, o también hidrogramas unitarios sintéticos que se recurre a estos métodos cuando hay carencia de datos hidrométricos o no existe la suficiente información de registros pluviográficos y se recurre a emplear las características generales de la cuenca; entre ellos figuran hidrograma sintético triangular, hidrograma adimensional del SCS, hidrograma de Snyder.

Con frecuencia, los datos de precipitación y flujo de agua medidos no están disponibles para las cuencas hidrográficas en estudio. Esto es especialmente cierto para pequeñas cuencas hidrográficas y áreas remotas. Los hidrogramas unitarios (UH) se derivan para dicha cuenca de las ecuaciones empíricas y relacionan las características sobresalientes de UH con las características de la cuenca. Estas ecuaciones empíricas son aplicables a regiones específicas para las cuales se derivan, y no son universales.

Estos deben aplicarse a las cuencas hidrográficas que tienen características similares. Los UH, derivados de tales ecuaciones, se denominan UH sintéticos. Tres de los métodos populares se discuten lo que sigue.

- **Hidrograma Unitario Sintético de Snyder**

Snyder desarrolló un modelo que implica la construcción de un UH simbólico para una cuenca de drenaje sin datos calibrados, estableció un conjunto de fórmulas que relacionaban la geometría física de la cuenca hidrográfica con tres parámetros básicos de la UH. Estas fórmulas se basaron en un estudio de 20 cuencas hidrográficas ubicadas principalmente en las tierras altas de los Apalaches en el este de los Estados Unidos, que variaron en tamaño de 30Km² a 30 000 Km² (Singh, 1992). El parámetro básico que Snyder definió es t_p el tiempo pico en horas tomadas como el tiempo desde el centro de masa de la lluvia efectiva de la unidad de duración hasta el caudal pico de la UH.

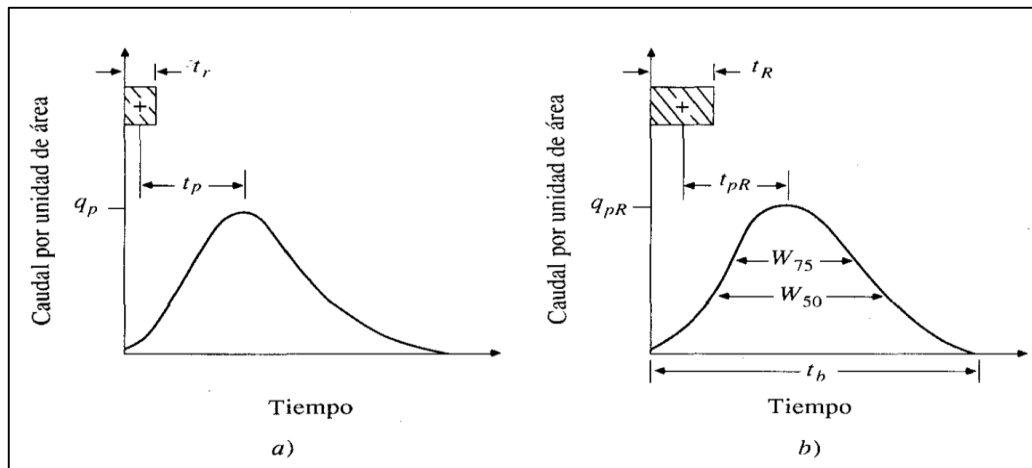


Figura 4. Hidrograma Unitario de Snyder

Fuente: Hidrología Aplicada. (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

En el caso (a) es un UH estándar, donde $t_p=5.5t_r$; en el caso (b) es un UH requerido, donde $t_{pR} \neq 5.5t_r$

Snyder relacionó el tiempo de rezago (T_R) con el tiempo de concentración de la cuenca (t_c), siendo la siguiente expresión en horas:

$$T_R = \frac{3}{5} \times t_c \quad [16]$$

Para la duración de la lluvia (t_s), Snyder consideró lluvias que estuvieran de acuerdo al tamaño de la cuenca definiendo para ello una relación de 1/5.5 veces el tiempo de rezago.

$$t_s = \frac{T_R}{5.5} \quad [17]$$

El tiempo pico es calculado en horas con la siguiente expresión:

$$T_p = \frac{t_c}{2} + T_R \quad [18]$$

Donde T_p es el tiempo pico medido en horas, t_c representa la duración de la lluvia (tiempo de concentración) en horas y T_R es el tiempo de rezago medido en horas.

El caudal pico por milla cuadrada u_p se estima con la siguiente expresión:

$$u_p = C_p \times \frac{640}{T_R} \quad [19]$$

Donde u_p representa el caudal pico por unidad de área medido en $\text{pie}^3/\text{s} \times \text{milla}^2$, T_R es el tiempo de rezago en horas y C_p es un coeficiente que depende de la topografía de la cuenca y varía entre 0.5 y 0.8. La ecuación anterior es usada cuando el hidrograma unitario a construir corresponde a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo pico, de lo contrario se usa la siguiente ecuación:

$$u_p = C_p \times \frac{640}{[T_R + (T - t_s)/4]} \quad [20]$$

Donde t_s representa la duración de la lluvia en horas, y T es la duración de la precipitación efectiva en horas. Después de haber obtenido el caudal pico por unidad de área, se calcula el caudal pico total, expresándose de la siguiente manera:

$$U_p = u_p \times A_c \quad [21]$$

Siendo U_p el caudal pico total, u_p el caudal pico por unidad de área y A_c el área total de la cuenca.

La duración de la escorrentía superficial o tiempo base del hidrograma unitario se estima mediante la siguiente expresión:

$$t_b = 3 + 3 \times \frac{T_R}{24} \quad [22]$$

Donde t_b es el tiempo base en días, y T_R en horas, teniendo en cuenta que esta expresión es usada para cuencas de tamaño considerable, pero para cuencas pequeñas los resultados son excesivamente altos, por lo que el tiempo base debe ser recalculado como 3 a 5 veces el tiempo pico (T_p). El UH puede construirse de manera que su volumen sea igual a una unidad. Obviamente, se pueden esbozar muchos UH que satisfarán este requisito, como una forma de esbozar un UH razonable, el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU. desarrolló una relación entre u_p y el ancho UH en valores de 50% (W_{50}) y 75% (W_{75}). El ancho dado en unidades de horas del UH a un caudal igual a cierto porcentaje del caudal pico q_{pR} , estos anchos de tiempo se pueden evaluar a partir de la siguiente ecuación:

$$w = C_w \times q_{pR}^{-1.08} \quad [23]$$

Donde $C_w = 440$ para un ancho del 75% y 770 para un ancho del 50%. “Usualmente un tercio de este ancho se distribuye antes del momento en que ocurre el pico del hidrograma unitario y dos tercios después de dicho pico” (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

2.2.4. HIDRÁULICA

Los proyectos viales en la sierra, están a la expectativa de tener que atravesar un río o una quebrada, esto se debe a la topografía accidentada. Entonces, debido a la magnitud desconocida de fuerzas del río que ocasionan erosión y arrastre de sedimentos, analizar el comportamiento del río sobre la estructura es de severa importancia en este tipo de proyectos.

Los ríos, quebradas y arroyos son canales naturales, que se forman en las depresiones presentes de las diferentes superficies, y que, en el pasar del tiempo, se van estableciendo hasta formar un cauce constante. Entonces, para poder estudiarlos, se han establecido teorías empíricas, que ayudan a calcular los diferentes niveles que se presentan en un río, debido a la irregularidad de sus secciones transversales (a diferencia de un canal artificial que es prismático).

Los ríos jóvenes existentes en el Perú son impetuosos, de curso irregular, muy sensibles a cambios o modificaciones del cauce y muy agresivos con quienes invadan sus márgenes, en cambio los ríos viejos cuentan con una pendiente y energía suficiente para transportar el caudal sólido de la cuenca (Schroeder, 1994).

2.2.4.1. CLASIFICACIÓN DE RÍOS

- En función a su edad de los ríos

Esta clasificación tiene un origen geomorfológico, diferenciando tres tipos:

Ríos Jóvenes: Corresponde al estado inicial de los ríos, por lo general tienen una sección en forma de V, son cursos irregulares y contiene material fracturado; estos también presentan variaciones importantes en los niveles del lecho (Rocha, 1998).

Ríos Maduros: Se presentan en valles amplios, tienen pendientes bajas, además estos ríos son estables y cuentan con una sección transversal con capacidad para el transporte de sedimentos (Gracia & Maza, 1997). El río está en equilibrio, o próximo a él, además existen pequeñas planicies de inundación y algunos meandros (Rocha, 1998).

Ríos Viejos: Se consideran ríos en un avanzado de desarrollo, con una pendiente baja en un amplio valle; además el río está confinado, encausado, controlado, y hay desarrollo urbano agrícolas e industriales importantes (Rocha, 1998). El ancho de las planicies es 15 a 20 veces mayor que el ancho de los meandros, poseen depósitos naturales de sedimentos en las márgenes, no tienen rápidas ni caídas, y en algunos casos cerca existen lagos en forma de cuerno o herradura (Gracia & Maza, 1997).

- En función a su condición de estabilidad

Los ríos cuentan con tres condiciones de estabilidad: estática, dinámica y morfológica.

Estática: La corriente arrastra sedimentos, pero no mueve ni arrastra las partículas de las orillas, las márgenes son rocosas o tienen alta cohesión (Gracia & Maza, 1997).

Dinámica: Las variaciones de la corriente, el material del cauce y el sedimento transportado han formado una pendiente y una sección donde los cambios no son muy notables de año a año, el río sufre desplazamiento en las curvas, erosión en las márgenes y depósito de sedimentos en el interior (Gracia & Maza, 1997).

Inestabilidad dinámica: Es muy intenso el desplazamiento lateral de los meandros y el corte natural de ellos es muy frecuente.

Morfológica: Cualquier corriente natural, donde el ser humano no ha alterado su naturaleza, tiene estabilidad morfológica (Gracia & Maza, 1997).

- En función a sus grados de libertad

Se considera un grado de libertad, cuando al variar el gasto de un cauce, sólo varía el tirante, siendo el caso de los canales revestidos; no existiendo la presencia de transporte de sedimentos. La presencia de dos grados de libertad existe cuando varía el tirante y la pendiente, esto ocurre cuando las márgenes del río son resistentes, pero el fondo no; el tercer grado de libertad se refiere cuando además de ser cambiantes la pendiente y el tirante, también varía los márgenes (Gracia & Maza, 1997).

- En función a sus áreas de inundación

Existen ríos que presentan áreas de inundación, debido a la presencia de dos cauces; generando estas áreas inundables con los movimientos laterales que ha efectuado el río a lo ancho de una planicie aluvial con el paso del tiempo (Rocha, 1998).

Por lo general el cauce menor, representa al cauce en épocas de estiaje, pero cuando se produce la máxima avenida el río se desborda, debido a que este es un cauce mayor.

- En función a su geometría

Cauce Recto: “Esto ocurre en pequeños tramos y son transitorio, ya que con cualquier irregularidad en la forma del cauce o en su alineamiento, o con la formación de bancos, o bien alguna obstrucción temporal, se originan disturbios locales que producen flujos transversales que inician la formación de curvas y meandros” (Gracia & Maza, 1997, p. 6).

Sinuosos o con meandros: Tiene un único cuce, pero con curvas; existe una asimetría en las secciones transversales de dicha ondulación del río, debido a que el calado es mayor junto a la orilla cóncava y menor a la orilla convexa, los puntos de mayor profundidad se denomina “thalweg”, y los materiales depositados en la orilla en forma de playa son llamadas barras alternadas (Martín, 2002).

Existen patrones de erosión en el lado cóncavo de las curvas y deposición en el lado convexo, cualquier planeamiento de revestimiento resultará costoso con el fin de evitar la erosión y el regreso del cauce al patrón original (Linsley, Kohler & Paulus, 1977)

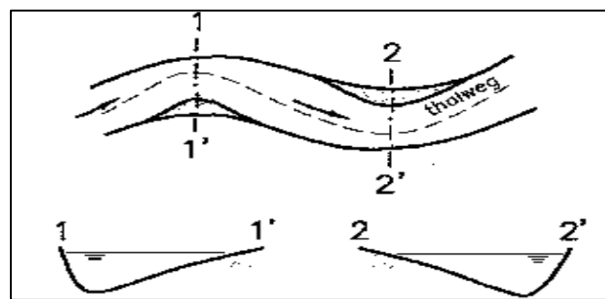


Figura 5. Morfología de un cauce meandriforme
Fuente: Ingeniería de ríos. (Martín, 2002)

La evolución de los meandros depende de la resistencia de las orillas a la erosión, pudiendo tener unos meandros regulares o deformados, debido a que la resistencia de las orillas no es homogénea, o también pueden ser simples o compuestos, dependiendo a la frecuencia o longitud de la onda dominante del meandro (Martín, 2002).

Cauce trenzado: Es un cauce muy ancho, compuesto por cauces menores entrelazados, que dejan islas al unirse entre sí; estos son cauces inestables, tiene capacidad de transporte sólido y son llamados divagantes, debido a que sus brazos principales se pueden encontrar en un lugar tan pronto como otro (Martín, 2002). Estos cauces son amplios y las márgenes no están bien definidas, se caracterizan por poseer una pendiente alta, material grueso y grandes cantidades de sedimento (Gracia & Maza, 1997).

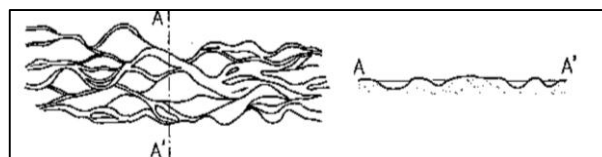


Figura 6. Morfología de un cauce trenzado
Fuente: Ingeniería de ríos. (Martín, 2002)

2.2.4.2. CLASIFICACIÓN DEL FLUJO

a. SEGÚN EL TIPO DE FLUJO

Los flujos se pueden clasificar de acuerdo al cambio de la profundidad, con respecto al tiempo y al espacio (Chow, 2004); se considera un flujo permanente si la profundidad del flujo no cambia en un intervalo de tiempo considerable y se considera un flujo no permanente o variable cuando la profundidad es cambiante.

Además, se considera un flujo uniforme, si la profundidad de flujo no cambia en el espacio; y flujo no uniforme variado, cuando la profundidad es cambiante en el espacio. Por último, están los términos gradualmente y rápidamente, los cuales solo están en el grupo de flujo variado. Como sus nombres lo dicen, uno clasifica a un flujo que cambia sus propiedades lentamente, mientras que otra lo hace abruptamente, como rápidas o caídas.

b. SEGÚN EL ESTADO DEL FLUJO

El estado del flujo está influenciado por la viscosidad y la gravedad a las fuerzas de inercia del flujo. La viscosidad en relación con la inercia se representa como el número de Reynolds. Si el flujo es laminar, el número de Reynolds es pequeño y viceversa (Chow, 2004).

- Flujo Laminar: Las fuerzas viscosas son más fuertes que las fuerzas inerciales, en este flujo las partículas de agua se mueven en líneas de corriente.
- Flujo Turbulento: Las fuerzas viscosas son más débiles que las fuerzas inerciales, Las partículas tienen un movimiento de trayectoria irregular

Las fuerzas gravitacionales en relación con las fuerzas inerciales en el estado del flujo, está determinada por el número de Froude, definido como la velocidad media del flujo entre la raíz cuadrada de la aceleración de la gravedad y la longitud característica.

- Flujo Supercríticos: Si el Número de Froude es mayor a la unidad ($F > 1$), se suele dar en pendientes pronunciadas.

- Flujo Subcrítico: Si el Número de Froude es menor a la unidad ($F < 1$), se este se suele dar en corrientes lentas, es decir en pendientes suaves.
- Flujo Crítico: Si el Número de Froude es igual a la unidad ($F = 1$).

2.2.4.3. ELEMENTOS GEOMÉTRICOS

La sección de canales naturales es irregular y variante a lo largo del tramo. Los elementos geométricos son fundamentales para la determinación de diferentes teorías establecidas para el cálculo de la profundidad del agua, estas son propiedades existentes en cada sección transversal de un canal; a continuación, se definirán varios elementos geométricos (Chow, 2004).

La profundidad de flujo (y) es la altura de agua desde el fondo del canal hasta la superficie libre de agua, donde la pendiente influye en la variación de altura. En planta, formará un espejo de agua, que tendrá un ancho llamado ancho superficial (T). En el mismo sentido, esta mancha de agua moja toda la superficie de suelo, que se encuentra por debajo de esta, obteniendo, desde una sección transversal, un área mojada (A) y un perímetro mojado (P). Estos dos últimos elementos se relacionan entre sí formando el radio hidráulico (RH), ver ecuación [24].

$$R_H = \frac{A}{P} \quad [24]$$

2.2.4.4. DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

La distribución de velocidades en una sección de canal dependerá de los elementos geométricos y la rugosidad que se presente. Por lo general, las velocidades más bajas se encuentran en las zonas más profundas, ya que la rugosidad de la superficie obstruye de cierta manera el paso del agua generando reducción en las velocidades; mientras que las en las zonas más alejadas de la superficie se producen las velocidades más altas (Chow, 2004); como se observa en la figura 07.

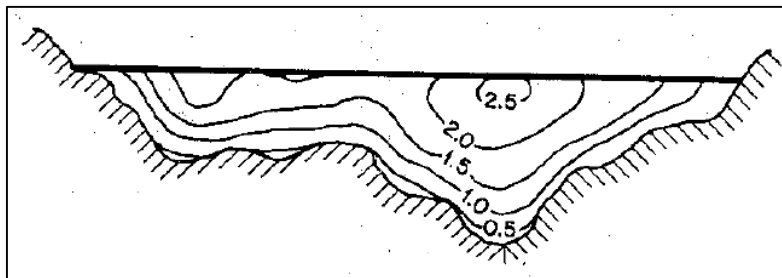


Figura 7. Distribución de velocidades en canal natural
Fuente: Hidráulica de canales. (Chow, 2004)

2.2.4.5. RUGOSIDAD COMPUESTA EN CANALES NATURALES

La rugosidad de la superficie de un cauce natural es compleja al definirse, ya que la superficie es muy variada y no hay un método exacto para poder hallarla; sin embargo, se usan tablas con valores experimentales para diferentes tipos de superficies o los ingenieros expertos eligen valores de acuerdo a su experiencia (Chow, 2004).

Los valores usados son llamados coeficientes de Manning (n), que parte de la ecuación [25] formulada por el ingeniero irlandés Robert Manning, la cual es una de las ecuaciones más conocidas para el cálculo de velocidad de flujo uniforme para flujos unidimensionales:

$$V = \frac{R^{2/3} \times S^{1/2}}{n} \quad [25]$$

Donde, V es la velocidad media, R radio hidráulico, S la pendiente de la línea de energía y n coeficiente de rugosidad de Manning.

Para aplicar este método la mayor dificultad se encuentra en la elección del número de Manning, que viene a ser el coeficiente de rugosidad, pues hay muchos factores que influyen.

El coeficiente de rugosidad es muy variable y depende de un número de factores que influyen ya sea en canales naturales como artificiales.

- Rugosidad Superficial: representa las características de tamaño y forma de las partículas que están en el perímetro mojado, las partículas finas hacen que n sea un valor bajo y partículas gruesas el valor de n es más alto (Chow, 2004). Generalmente los cantos rodados se concentran en el fondo del canal, por lo que la rugosidad es mayor en esta zona.
- Irregularidad del canal: son las variaciones de la sección transversales con un perímetro mojado irregular, estos cambios abruptos o alteraciones de cambios en las secciones, requieren de un valor n alto (Chow, 2004).
- Obstrucción: Se refiere a la presencia de troncos, pilas de puentes, entre otros elementos similares, el cual tiende a incrementar el valor de n .
- Vegetación: La presencia de arbustos, matorrales, hacen que el valor de n aumente si la vegetación está de manera superficial; pero si la vegetación se encuentra sumergida, entonces los valores de n serán bajos.

- Nivel y caudal: Generalmente con el aumento del nivel y caudal de río el valor de n es menor, pero si existe la presencia de vegetación cubriendo en estos niveles altos, entonces el valor de n será elevado (Chow, 2004). El valor de n para planicies de inundación será mayor a los valores del cauce o canal, y su aumento depende de las dos primeras condiciones.
- Alineamiento del canal: Los ríos que presentan meandros severos, curvas con radios cortos, estas aumentarán el valor de n; sin embargo, los ríos de curvas suaves, tendrán un valor de n bajo.

Todas las condiciones anteriormente mencionadas, ayudarán a elegir un coeficiente de rugosidad más acertado, teniendo como criterio que aquellos factores que tiendan a inducir la turbulencia y generar retardo aumentará el valor de n, y viceversa. Según Cowan el coeficiente de Manning se puede calcular de la siguiente manera:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5 \quad [26]$$

Donde n_1 se agrega a n_0 y es el valor que tiene relación con las rugosidades superficiales, n_2 considera las variaciones de tamaño y forma de la sección del canal, n_3 considera las obstrucciones, n_4 la vegetación y las condiciones de flujo y m_5 corrige los efectos de los meandros.

Tabla 6.
Valores de cálculo de coeficiente de rugosidad para la ecuación [26]

Condiciones del canal		Valores
	Tierra	0.020
Material involucrado	Corte en roca	n_0 0.025
	Grava fina	0.024
	Grava gruesa	0.028
	Suave	0.000
Grado de Irregularidad	Menor	0.005
	Moderado	n_1 0.010
	Severo	0.020
Variaciones de sección transversal	Gradual	0.000
	Ocasionalmente alternante	n_2 0.005
	Frecuentemente alternante	0.010 – 0.015

Continuación

Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante		0.000
	Menor		0.010 – 0.015
	Apreciable	n_3	0.020 – 0.030
	Severo		0.040 – 0.060
Vegetación	Baja		0.005 – 0.010
	Media		0.010 – 0.025
	Alta	n_4	0.025 – 0.050
	Muy alta		0.050 – 0.100
Grados de los efectos por meandros	Menor		1.000
	Apreciable	m_5	1.150
	Severo		1.300

Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, 2004)

A continuación, se presenta la tabla de valores para el coeficiente del número de Manning, con una compilación más amplia que lo que dejó Horton, pero solo se han considerado los valores para canales revestidos, dragados y cauces naturales, la cual ha sido extraída del libro Hidráulica de canales abiertos de Ven te Chow.

Tabla 7.
Coefficientes de rugosidad de Manning para diferentes canales

TIPO DE CANAL	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
A. Conductos cerrados que fluyen parcialmente llenos			
A-1. Metal			
a. Latón, liso	0.009	0.010	0.013
b. Acero			
Estriado y solado	0.010	0.012	0.014
Ribeteado y en espiral	0.011	0.014	0.016
c. Metal corrugado			
Subdrenaje	0.017	0.019	0.021
Drenaje para aguas lluvias	0.021	0.024	0.030
A-2. Metal			
a. Lucita	0.008	0.009	0.010
b. Vidrio	0.009	0.010	0.013

Continuación

c. Cemento				
Superficie pulida	0.010	0.011	0.013	
Mortero	0.011	0.013	0.015	
B. Canales revestidos o desarmables				
B-1. Metal				
a. Superficie lisa de acero				
Sin pintar	0.011	0.012	0.014	
Pintada	0.012	0.013	0.017	
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030	
B-1. No metal				
a. Cemento				
Superficie pulida	0.010	0.011	0.013	
Mortero	0.011	0.013	0.015	
b. Madera				
Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014	
Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015	
Sin cepillar	0.011	0.013	0.015	
Láminas con listones	0.012	0.015	0.018	
Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017	
c. Concreto				
Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015	
Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016	
Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020	
Sin pulir	0.014	0.017	0.020	
Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023	
Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025	
Sobre roca bien excavada	0.017	0.020		
Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027		
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de:				
Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020	
Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024	
Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024	
Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030	
Piedra suelta o riprap	0.020	0.030	0.035	

Continuación

e. Fondo de gravas con lados de:			
Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
Piedra suelta o riprap	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados			
	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
Liso	0.013	0.013	
Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal			
	0.030	0.500
C. Excavado o dragado			
a. En tierra, recto y uniforme			
Limpio, recientemente terminado	0.016	0.018	0.020
Limpio, después de exposición a la intemperie	0.018	0.022	0.025
Con gravas, sección uniforme, limpio	0.022	0.025	0.030
Con pastos cortos, algunas malezas	0.022	0.027	0.033
b. En tierra, serpenteante y lento			
Sin vegetación	0.023	0.025	0.030
Pastos, algunas malezas	0.025	0.030	0.033
Malezas densas o plantas acuáticas en canales profundos	0.030	0.035	0.040
Fondo en tierra con lados en piedra	0.028	0.030	0.035
Fondo pedregoso y bancas con malezas	0.025	0.035	0.040
Fondo con cantos rodados y lados limpios	0.030	0.040	0.050
c. Excavado con pala o dragado			
Sin vegetación	0.025	0.028	0.033
Matorrales ligeros en las bancas	0.035	0.050	0.060
d. Cortes en roca			
Lisos y uniformes	0.025	0.035	0.040
Afilados e irregulares	0.035	0.040	0.050
e. Canales sin mantenimiento, malezas y matorrales sin cortar:			
Malezas densas, tan altas como la profundidad de flujo	0.050	0.080	0.120

Continuación

Fondo limpio, matorrales en los lados	0.040	0.050	0.080
Igual, nivel máximo de flujo	0.045	0.070	0.110
Matorrales densos, nivel alto	0.080	0.100	0.140
D. Corrientes naturales			
D-1. Corrientes menores (ancho superficial en nivel creciente <100 pies)			
a. Corriente en planicies			
Limpias, rectas, máximo nivel, sin montículos ni pozos profundos	0.025	0.030	0.033
Igual al anterior, pero con más piedras y malezas	0.030	0.035	0.040
Limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena	0.033	0.040	0.045
Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.050
Igual al anterior, niveles bajos, pendientes y secciones más eficientes	0.040	0.048	0.055
Igual al 4, pero con más piedras	0.045	0.050	0.060
Tramos lentos, malezas y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
Tramos con muchas malezas, pozos profundos o canales de crecientes con muchos árboles con matorrales bajos	0.075	0.100	0.150
b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos.			
Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
Fondo: Cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
a. Pastizales, sin matorrales			
Pasto corto	0.025	0.030	0.035
Pasto alto	0.030	0.035	0.050
b. Áreas cultivadas			
Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
c. Matorrales			
Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110

Continuación

Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
a. Árboles			
Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
Igual al anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel de agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
Igual al anterior, pero con el nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente >100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corriente menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos afectiva.			
Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	0.060
Sección irregular y rugosa	0.035	0.100

Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, 2004)

2.2.4.6. MODELACIÓN NUMÉRICA

Son métodos computacionales aproximados para resolver las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos, cada modelo debe ser consistente, estable y convergente; pues para desarrollar un modelo, primero se define el problema, luego se plantea las hipótesis, se formulan la solución analítica, se genera el programa, sigue la calibración y por último se hacer la simulación (Vergara, 1993).

2.2.4.7. DIMENSIONALIDAD

Modelo unidimensional: En este tipo de modelo el vector de la velocidad se analiza en una sola dirección, prevaleciendo la dimensión longitudinal a lo largo del río, se ingresan las secciones del rio, y toma una velocidad promedio, constante en su sección, sin considerar las variaciones horizontales y verticales, siendo el flujo perpendicular a las secciones transversales.

Modelo bidimensional: El análisis se realiza en dos direcciones del plano horizontal, siendo el caso de la velocidad, en el caso de la variación vertical se toma un valor promedio como único valor.

Modelo tridimensional: Se analiza la velocidad en las tres direcciones, siendo el estado más avanzado de la modelación.

2.2.4.8. MALLAS DE CÁLCULO

Es la discretización geométrica espacial del dominio, permite que las ecuaciones diferenciales puedan ser resueltas numéricamente, dividiendo en pequeños elementos, cuya unión y continuidad forman una malla, existiendo dos tipos de mallas:

Mallas estructuradas: Cada elemento tiene el mismo número de vecinos y están constituidas por una matriz de celdas cuadrangulares, de manera que cada una puede identificarse por sus índices (i, j) (Robles, 2016).

Mallas no estructuradas: Se conforman por elementos poligonales de distintos tamaños y formas; aunque generalmente se construyen con elementos triangulares, este tipo de mallas es muy útil para representar de forma más real las irregularidades del terreno (Robles, 2016).

2.2.5. SIMULACIÓN HIDRÁULICA CON IBER VERSIÓN 2.4.3

Este es un programa de simulación en dos dimensiones, el cual permite la simulación de flujos en lámina libre en aguas someras (aguas poco profundas) en régimen no-permanente, y consta de 03 módulos: hidrodinámico, turbulencia y transporte de sedimentos. En la presente tesis, se ahondará en el módulo hidrodinámico, el cual permite el cálculo de velocidades en 02 direcciones, tanto en “x” como en “y”, permitiendo alcanzar un espejo de agua mucho más detallado (zona de inundación) a diferencia de un modelo unidimensional; además de la obtención de niveles de agua. Este modelo numérico está basado en aguas someras son mayormente usados en estudios de hidráulica fluvial y evaluación de zonas inundables, transporte de sedimentos y contaminantes.

Asimismo, el software IBER se basa en el método numérico de volúmenes finitos para resolver la ecuación de Saint Venant en 2D, los cuales permiten una mejor representación de la interacción entre el flujo y la superficie de ríos; este *software* también permite la exportación de polígonos referenciados (dxf, shapefile, entre otros) e información de superficie para ser posteriormente trabajados dentro del *software* y así recrear el flujo de un río o quebrada.

2.2.5.1. ESTRUCTURA DEL CÁLCULO CON IBER

Según IBER (2010), la estructura de cálculo en el programa IBER se divide en 03 etapas:

Pre-Proceso: En esta etapa se ingresan la geometría, se asignan los parámetros de entrada como la rugosidad, se establecen las condiciones de contorno, las condiciones generales de cálculo, y se hace el mallado de la superficie en estudio, que puede ser de forma manual o automática.

Proceso: En esta etapa se realiza el cálculo hidrodinámico.

Post-Proceso: Se visualizan y se extraen los resultados obtenidos.

2.2.5.2. ECUACIONES HIDRODINÁMICAS

En los modelos bidimensionales la velocidad trabaja con dos direcciones en un plano horizontal promediada en profundidad, dichas componentes son:

$$U_x = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_s} \overline{U_x} \times dz \quad U_y = \frac{1}{h} \int_{Z_b}^{Z_s} \overline{U_y} \times dz \quad [27]$$

Donde $h = Z_s - Z_b$, representado el calado en cada punto estudiado; Z_b es la elevación del fondo y Z_s es la elevación de la superficie libre, además $\overline{U_x}$ y $\overline{U_y}$ son las dos componentes horizontales de velocidad tridimensional, U_x y U_y son componentes de la velocidad horizontal promediada en profundidad.

Por lo tanto, en este modelo bidimensional se trabaja con un dominio bidimensional con tres componentes definidas en cada punto: el calado y las dos componentes de la velocidad horizontal; las ecuaciones que rigen el desarrollo de dichas variables se denominan ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales (García, 2017). Las ecuaciones en dos direcciones horizontales de la conservación de la masa y de momento que se desarrollan en el modelo IBER son las siguientes:

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{2 \partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} - 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad [28]$$

Donde:

h = Calado del agua.

U_x, U_y = Velocidades horizontales promediadas en profundidad.

g = Aceleración de la gravedad.

Z_s = Elevación de la lámina libre.

τ_s = Fricción en la superficie libre debida al rozamiento por el viento.

τ_b = Fricción debido al rozamiento del fondo.

ρ = Densidad del agua.

Ω = Velocidad angular de rotación de la tierra.

λ = Latitud del punto considerado.

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ = Tensiones tangenciales efectivas horizontales

M_s, M_x, M_y = Son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

2.2.5.3. CONDICIONES DE CONTORNO HIDRODINÁMICAS

a. CONTORNOS CERRADOS

“La presencia del contorno tipo pared genera una fuerza de rozamiento lateral en el fluido, de manera similar a la fricción ejercida por el rozamiento del fondo” (IBER, 2010, p.11). Se consideran dos condiciones de contorno tipo pared:

Condición de deslizamiento libre (tensión tangencial nula): Desprecia la tensión de rozamiento generada por los contornos sobre el fluido, debido a que la superficie de contacto con los contornos laterales es menor que la superficie de contacto de fondo.

Condición de fricción de pared (funciones de pared): Cuando la dimensión horizontal y vertical son similares, es de importancia en el desarrollo del flujo tener en cuenta esta fuerza de rozamiento, aunque la influencia sea pequeña.

Si se quiere se puede considerar una condición de contorno de fricción para tener en cuenta el efecto del rozamiento lateral, que consiste en imponer una fuerza tangencial en dirección opuesta al flujo en el contorno (IBER, 2010).

b. CONTORNOS ABIERTOS

En este caso se pueden considerar diferentes tipos de condiciones contorno, para las ecuaciones bidimensionales el número de condiciones a imponer en los contornos abiertos está en función si se trata del caso de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno si es rápido o lento (IBER, 2010).

En un contorno de entrada se imponen 3 condiciones de contorno si pertenece al régimen supercrítico, pero en cambio si pertenecen al régimen subcrítico solo se imponen 2 condiciones; en el caso del contorno de salida solo basta con imponer una sola condición si el régimen es subcrítico, mientras que si se trata de un régimen supercrítico ya no es necesario imponer ninguna condición (IBER, 2010). Las condiciones de contorno a imponer se muestran en la tabla 08.

En el contorno aguas arriba generalmente se impone el caudal total de entrada (m^3/s) y la dirección del flujo, realizando una distribución del caudal unitario, según la expresión de la ecuación [29]; sin embargo, cuando existe la falta de precisión en los datos se considera perpendicular al contorno de entrada; también se opta por introducir la velocidad o el caudal específico aguas arriba (IBER, 2010).

$$q_n = \frac{h^{5/3}}{\int h^{5/3}. dy} \times Q \quad [29]$$

Donde q_n es el caudal específico expresado en (m^2/s) en cada punto del contorno de entrada, Q es el caudal total de entrada y la integral se extiende a lo largo de todo el contorno considerado. En el contorno de salida se considera el calado, además también se podría introducir condiciones de contorno tipo vertedero y tipo curva de gasto.

Siendo la expresión indicada en la ecuación [30] para la condición de contorno tipo vertedero:

$$q = C_d(Z_s - Z_w)^{1.5} \quad [30]$$

Donde C_d representa al coeficiente de descarga del vertedero, Z_s es la cota de la lámina libre, y Z_w es la cota superior del vertedero. El usuario debe introducir como datos el valor del coeficiente de descarga y la cota superior del vertedero.

En la condición de contorno tipo curva de gasto establece una relación general entre el caudal de salida y la cota de la lámina de agua en cada punto del contorno, donde dicha relación es introducida por el usuario en forma de una Tabla en la que se definen pares de valores de caudal específico y cota de la lámina de agua (IBER, 2010).

Tabla 8.
Condiciones de contorno implementadas en los contornos abiertos

CONTORNO	RÉGIMEN	CONDICIONES IMPUESTAS	
Entrada	Caudal Total	Subcrítico / Crítico	Caudal total en dirección normal al contorno.
		Supercrítico	Caudal total en dirección normal al contorno y velocidad media
	Caudal Específico	Subcrítico / Crítico	Caudal específico en dirección normal al contorno
		Supercrítico	a) Caudal específico en dirección normal al contorno y calado. b) Caudal específico en dirección normal al contorno y cota de agua.
Salida	Subcrítico	a) Calado b) Cota de agua c) Vertedero (cota y coeficiente de descarga) d) Curva de gasto	
	Supercrítico / Crítico	No es necesario imponer ninguna condición	

Fuente: Manual de Referencia Hidráulico IBER (IBER, 2010).

2.2.5.4. MALLA DE CÁLCULO CON IBER

Las ecuaciones diferenciales se resuelven mediante la discretización espacial del dominio en estudio, dividiéndose en pequeñas celdas denominadas mallas de cálculo; pues el Software Iber trabaja con mallas no estructuradas constituidas por elementos de 3 o 4 lados; la facilidad de adaptación a cualquier geometría es la ventaja por la que se emplea este tipo de malla (IBER, 2010).

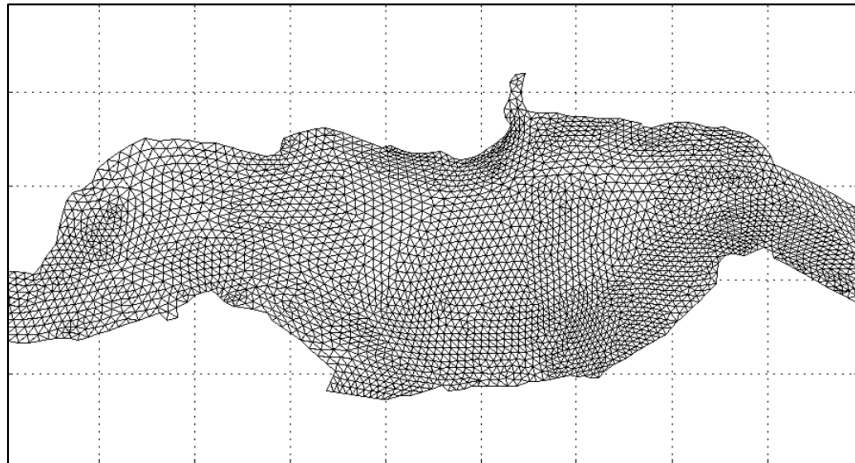


Figura 8. Ejemplo de malla no estructurada formada por elementos triangulares
Fuente: Manual de Referencia Hidráulico IBER (IBER, 2010).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁMBITO DE ESTUDIO

El área en estudio se encuentra ubicada en distrito de Jaén, que pertenece a la provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, ciudad ubicada con coordenadas geográficas de longitud $78^{\circ}48'28''$ W, latitud $05^{\circ}42'32''$ S y a una altitud de 730 m.s.n.m. (INEI).

La zona de estudio del modelamiento hidráulico está comprendida entre el sector El Parral hasta los sectores San Camilo, donde el desarrollo urbano de esta ciudad está situado cerca del río Amojú, zonificado en El Parral, Jaén-centro y San Camilo. Sin embargo, el área de estudio preliminar comprende toda la cuenca hidrográfica del río Amojú, tomando como punto de salida el extremo del tramo efluente de la ciudad de Jaén.

3.1.1. CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO AMOJÚ

La cuenca hidrográfica del río Amojú se ubica en el norte del Perú, en la Región Cajamarca, provincia de Jaén; pertenece a la Unidad Hidrográfica de la cuenca del Alto Marañón III, siendo su desembocadura de este río en el caudaloso del río Marañón.

En la Figura 9, se muestra la delimitación esta cuenca matriz hasta su desembocadura, contando con un área de 354.17 km², abarcando parte de los distritos de Huabal, Chontalí, Las Pirias, Jaén y Bellavista, debido a que habitualmente la delimitación de las cuencas hidrográficas no coincide necesariamente con los límites territoriales o jurisdiccionales.

Sin embargo, en la presente investigación la delimitación del área de estudio de la cuenca del río Amojú, se hizo en función al punto de salida ubicado en las coordenadas 743866 E y 9368982 N, tomando como referencia el extremo del tramo efluente de la ciudad, sector San Camilo – Jaén; lugar donde se ubica el tramo del río del que se desarrollará el modelamiento hidráulico, dicha delimitación se detalla en la Figura 10.

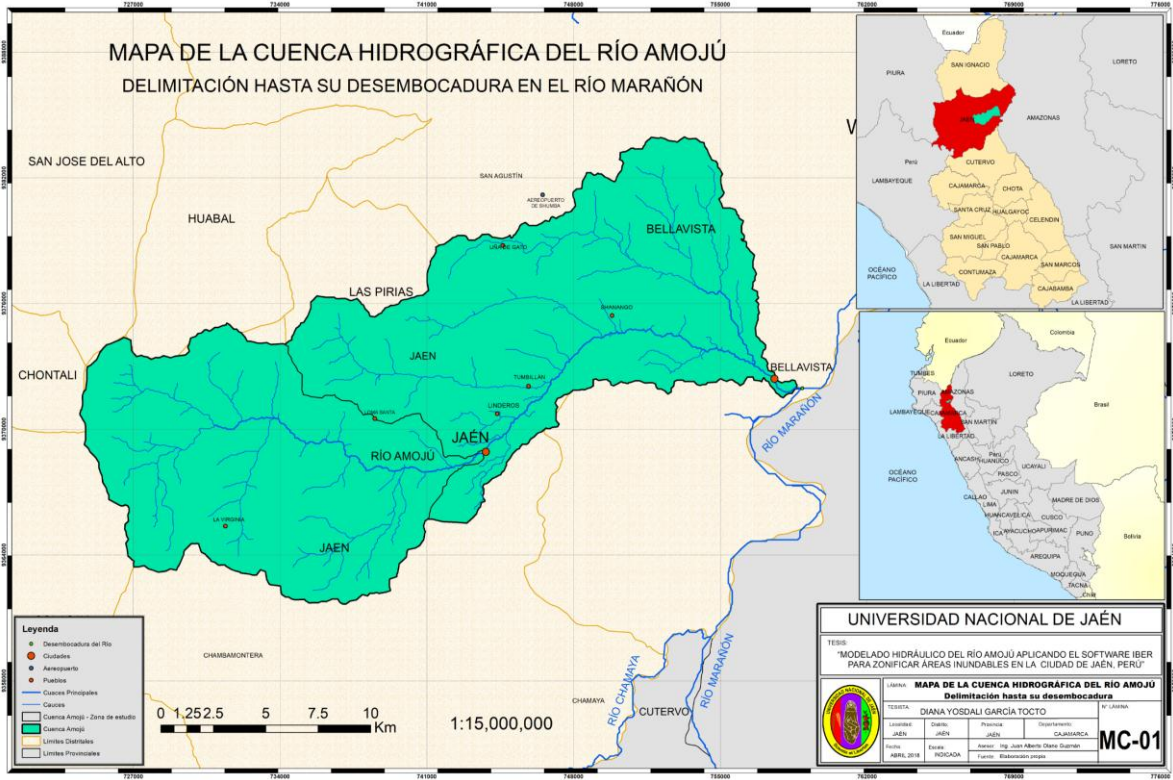


Figura 9. Delimitación de la cuenca del río Amojú hasta su desembocadura

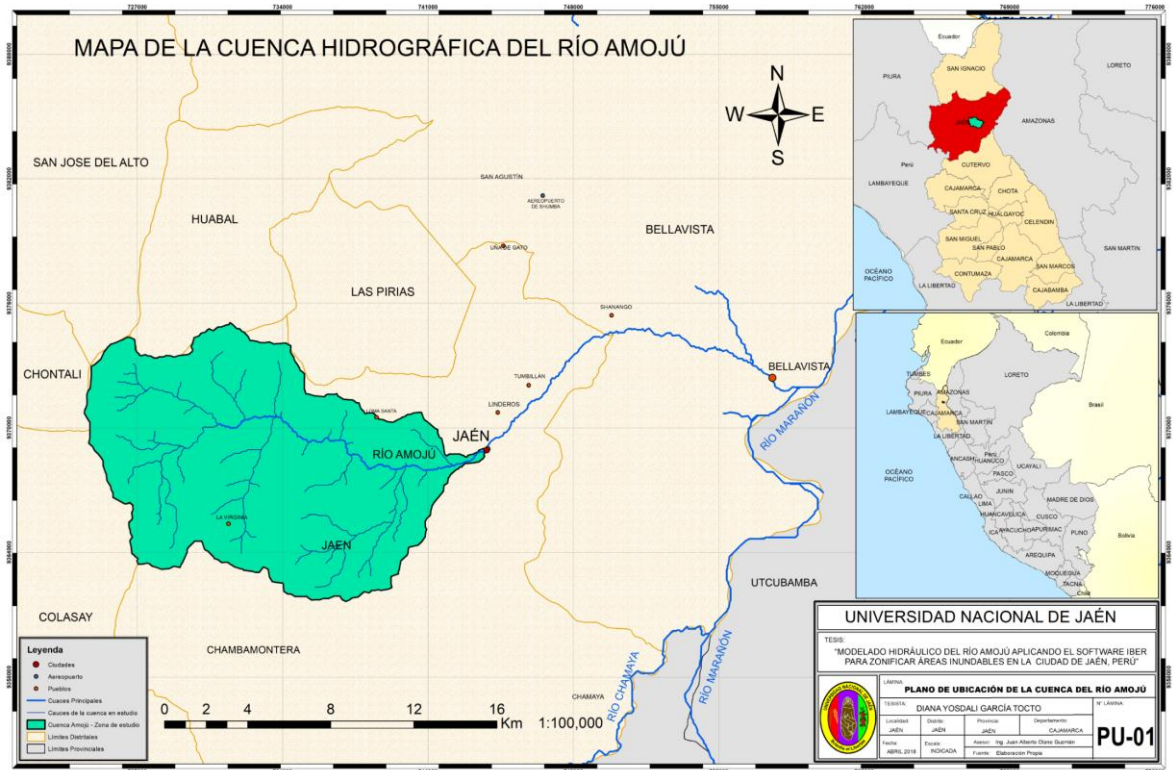


Figura 10. Delimitación de la cuenca del río Amojú – Zona en estudio

La cabecera de cuenca está formada por el Bosque Señor de Huamantanga, un área de conservación municipal que da vida al río Amojú. Se caracteriza por presentar abundantes precipitaciones que alcanzan sus máximos niveles en los meses de enero a abril y sus niveles mínimos en septiembre a diciembre, con una humedad relativa del 80% y un clima variado, con un rango de temperatura de 18 a 25°C (Romero, 2014).

En la Figura 11 se observa el relieve de la cuenca hidrográfica del río Amojú, el cual servirá para el estudio geomorfológico de la cuenca, dicho mapa fue trabajado en ArcGIS.



Figura 11. Relieve de la cuenca del río Amojú – Zona en estudio

3.1.2. TRAMO DEL RÍO EN ESTUDIO

El tramo de análisis se ubica en ambos márgenes del río Amojú y tiene una longitud de 2150.00 m de eje de tránsito en el río. Comprendiendo la zona urbana, donde existe mayor desarrollo poblacional, la zona en estudio del modelamiento hidráulico está comprendida entre el sector El Parral hasta los sectores San Camilo, donde el desarrollo urbano de esta ciudad está situado cerca del río Amojú, zonificado en El Parral, Jaén-centro y San Camilo.

A continuación, se ha desarrollado una descripción general del tramo en estudio, zonificado en el Sector El Parral, zonal central de Jaén y San Camilo, teniendo en cuenta que, según el reglamento para delimitación y mantenimiento de Fajas Marginales, la ribera de un cauce es el área comprendida entre el nivel mínimo de sus aguas y el nivel máximo creciente; además la faja marginal de un río es área inmediata superior a la fuente de agua en su máxima creciente, y para el cálculo de su ancho mínimo se rige en base a su modelamiento hidráulico o huellas máximas, según la información disponible.

En sector El Parral las riberas del río se encuentran protegidas por muros de contención, existiendo una alta concentr

ación de bolonería a las orillas, y la presencia de vegetación propia del río Amojú, las viviendas se encuentran cercanas como se aprecia en la Figura 12; además existen algunas zonas de cultivo en el extremo del tramo en estudio.



Figura 12. Márgenes del río en el sector El Parral

En el tramo central de la ciudad, las riberas también se encuentran protegidas por muros de contención con una altura que varía de 2.50m a 3.50m, Las viviendas se encuentran muy cercanas a las riberas del río, la presencia de bolonería y vegetación propia del río es poca, como se aprecia en la imagen Figura 13. Desde el Puente Orellana hasta el Puente Pakamuros presenta características similares con respecto a sus riberas.



Figura 13. Márgenes del río en el tramo central de la ciudad

Esta es la zona urbana central, con la presencia de edificios, calles pavimentadas, escasa presencia de vegetación en las calles, mayor concentración de la población y tránsito. El malecón adyacente a las defensas ribereñas no es pavimentado, además aguas abajo del Puente Orellana, hasta unos 150m no existe malecón, colindando las casas directamente con el muro de contención de la ribera del río, existiendo una mayor preocupación por una buena protección ribereña.

En el Sector San Camilo la margen izquierda del río está protegida por un muro de contención, que tiene una altura promedio de 3.00m, además las viviendas de esta margen colindan con el muro de protección ribereña del río.

En cambio, la margen derecha está constituida por bolonería y vegetación propia del río como se aprecia en la Figura 14, las viviendas de esta margen no se encuentran muy cercanas a la ribera del río, pero no cuenta con ninguna obra de protección ribereña, presentando un probable riesgo de inundación cuando el río está en su máxima avenida, el cual se definirá con el modelado hidráulico del río Amojú.



Figura 14. Márgenes del río en el sector San Camilo

En este sector, las calles más cercanas a la ribera no son pavimentadas, las viviendas de material noble y otras de material de adobe, además en las calles de la margen izquierda existe presencia vegetación.

Las márgenes del río del sector San Camilo – parte baja, está constituida principalmente por bolonería del cauce, habiéndose detectado en algunos espacios vegetación propia de la zona; las márgenes tienen forma de talud formados con relleno de material de desmonte, las viviendas se encuentran alejadas de la ribera del río en la margen izquierda, colindado las riberas con predios agrícolas como aprecia en la Figura 15.



Figura 15. Márgenes del río en el sector San Camilo – parte baja



Figura 16. Tramo en estudio – Modelamiento Hidráulico

3.1.3. ESTRUCTURAS EXISTENTES

Puente Orellana (Av. Orellana)

Se ubica sobre la calle Orellana, es un puente doble vía para tránsito vehicular con 30m de luz. Donde los beneficiarios directos son las personas que usan diferentes modos de transporte y transporte de carga que circulan por este eje vial, siendo una estructura que importante para el desarrollo del comercio del Mercado Roberto Segura.



Figura 17. Puente Orellana desde una vista aérea

Puente Pardo Miguel (Calle Pardo Miguel)

Se ubica sobre la calle Pardo Miguel, en un puente doble vía para tránsito vehicular con 20m de luz, donde circulan diferentes modos de transporte por este eje vial, siendo una estructura que permite la intercomunicación entre el sector Morro Solar y Jaén centro.



Figura 18. Puente Pardo Miguel desde una vista aérea

Puente Mesones Muro (Calle Mesones Muro)

Se ubica sobre la calle Mesones Muro, en un puente doble vía para tránsito vehicular con 20m de luz, donde circulan transporte liviano por este eje vial, siendo una estructura que permite la intercomunicación entre el centro de Jaén y el sector Morro Solar, cumpliendo un rol importante en el descongestionamiento vehicular, debido a que está muy cerca de la Plaza central de esta ciudad; además se observándose en la figura 19 que la comisaría se encuentra adyacente a la margen izquierda del río Amojú.



Figura 19. Puente Mesones Muro desde una vista aérea.

Puente Manco Cápac (Pról. Manco Cápac)

Se ubica sobre la prolongación Manco Cápac, en un puente doble vía para tránsito vehicular con 16m de luz, donde circulan transporte liviano por este eje vial, observándose en la figura 20 como una referencia el penal San Rafael que se encuentra adyacente a la margen izquierda del río Amojú.



Figura 20. Puente Mesones Muro desde una vista aérea

Puente Pakamuros (Av. Pakamuros)

Se ubica sobre la Av. Pakamuros, siendo un puente de doble vía con 25m de luz, por este eje vial circulan transporte liviano y pesado, observándose dicha estructura en la figura 21.



Figura 21. Puente Pakamuros desde una vista aérea

Viviendas

La ocupación del territorio en las zonas de las riberas del río Amojú ha ido progresando con el paso de los años, las condiciones de las viviendas se pueden observar en las imágenes consideradas en la descripción del tramo en estudio.

Sector El Parral: Las viviendas se encuentran separadas del río por un malecón a nivel de afirmado a la margen izquierda y en la margen derecha con una densa vegetación, donde la mayor parte de viviendas que colindan con las riberas del río son construcciones de material de adobe, techo de calamina y de un solo nivel.

Jaén – centro: Las viviendas en ambas márgenes de las riberas del río se encuentran separadas por un malecón a nivel de afirmado, sin embargo, aguas abajo del puente Orellana y Puente Manco Cápac en un tramo de 50m, las viviendas colindan con el río, separadas solo por el muro de contención de protección ribereña, donde las viviendas son construcciones de material noble de varios niveles, existiendo algunos edificios cerca al puente Mesones Muro.

Sector San Camilo: Las viviendas ubicadas en la margen izquierda se encuentran separadas del río por la calle Leoncio Prado que se encuentra a nivel de afirmado, en cambio en la margen derecha las viviendas se encuentran alejadas de la ribera del río, teniendo en cuenta que hay una vegetación densa y no existe muro de contención en esta margen del río. Dichas viviendas son construcciones de material noble variando de 1 a 3 niveles, con techo de calamina.

En la parte baja de este sector se encuentra en pleno desarrollo urbano, por lo que las viviendas se encuentran alejadas al río, existiendo algunas zonas agrícolas que colindan con el río Amojú, además se observa que este tramo no cuenta con protección ribereña. Dichas viviendas más cercanas al río, en su mayoría son construcciones de material noble, de un solo nivel y con techo de calamina.

Por lo que se ha podido observar que la mayoría de viviendas que se encuentran más cercanas al río, son construcciones más sencillas y vulnerables que las demás edificaciones.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1. IMÁGENES SATELITALES

En el presente estudio se utilizó imágenes satelitales, procesado por la NASA, del satélite SRTM Versión 3.0 Global 1, para la delimitación de la cuenca y determinación de todos los parámetros geomorfológicos, para la escala se usó la escala como referencia el material cartográfico del Instituto Geográfico Nacional (IGN) digitalizado, a escala 1/100 000, esta información se procesó en el programa ArcGIS.

Se usó bases administrativas por distritos de todo el Perú en formato (.shp), para delimitar en forma aproximada el área de la cuenca en estudio, mediante un rectángulo; que por consecuente se obtuvo un formato KMZ de dicha zona, teniendo en cuenta que pertenece a la zona WGS_1984_UTM_Zone_17S, en el programa ArcGIS.

El archivo KML fue requerido por la United States Geological Survey (USGS), agencia científica del gobierno federal de los Estados Unidos, que brinda información científica; el documento fue cargado, permitiendo establecer los puntos del rectángulo en el Earth Explorer de esta página, procediendo a obtener las imágenes satelitales de dicha zona.

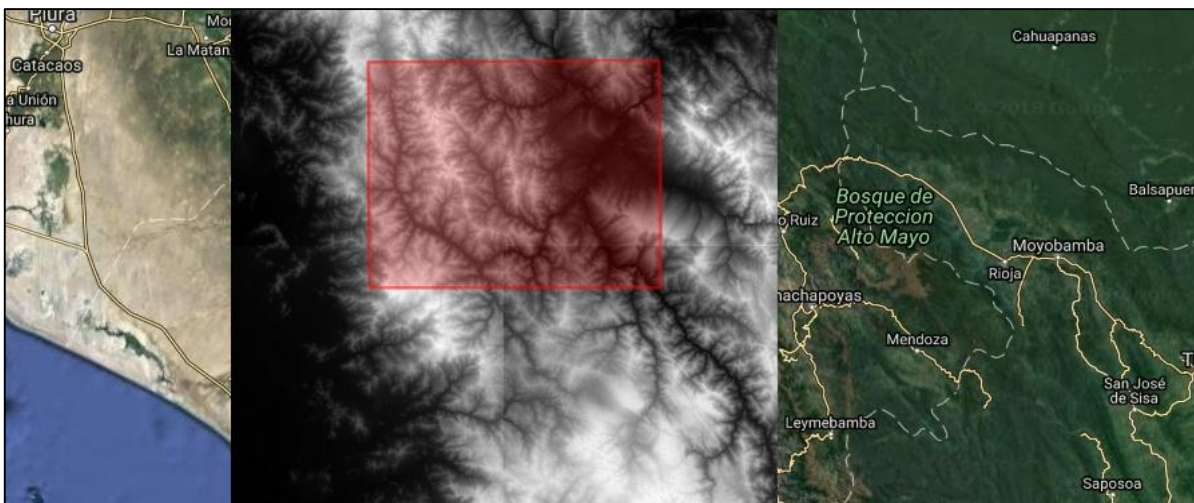


Figura 22. Imágenes del Satélite SRTM Versión 3.0 Global 1 – Procesados por la NASA

Estas Imágenes Satelitales fueron procesadas, con el fin de obtener la delimitación, y estimación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca.

También se usó imágenes satelitales con bandas espectrales para el cálculo del coeficiente de escorrentía y la clasificación del uso de suelos de la cuenca en estudio, dichas imágenes se obtuvieron del Satélite Perú–SAT y SPOT, procesadas y suministradas por la Agencia Espacial del Perú CONIDA por medio de la Universidad Nacional de Jaén, teniendo un mosaico completo del área de estudio con una resolución de 1.50m por pixel.

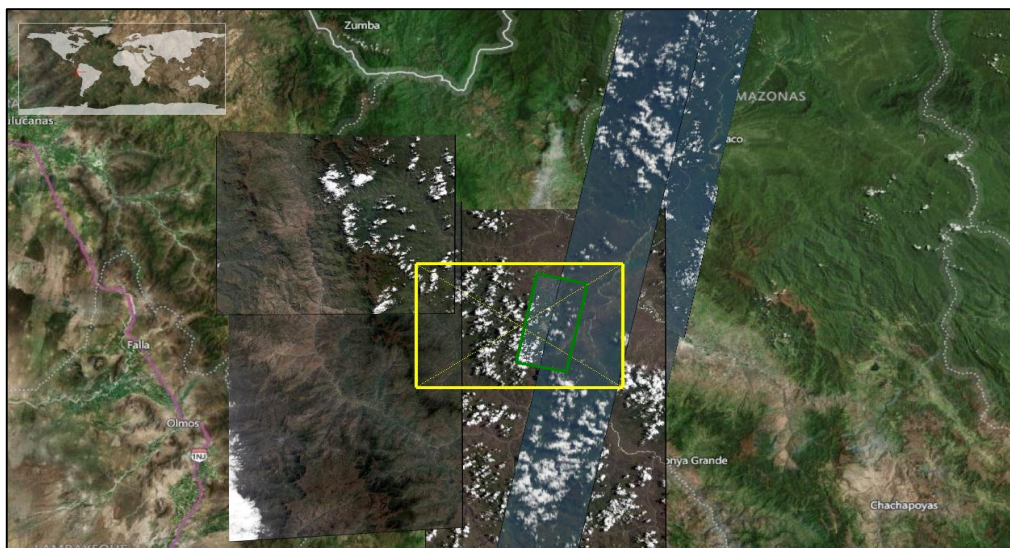


Figura 23. Imágenes de los Satélites Perú–SAT y SPOT – Procesados por CONIDA

3.2.2. TOPOGRAFÍA DE LA ZONA EN ESTUDIO

Se realizó el levantamiento topográfico con estación total del tramo en estudio del río Amojú, incluyendo sus riberas, en una longitud de 2150.00m, las secciones transversales están cada 20m de longitud y fue detallado cada 1.00m, mostrándose en los anexos la topografía en planta, el perfil longitudinal y las secciones transversales. Este tipo de levantamiento topográfico se realizó para tener a detalle la sección del río en todo el tramo en estudio para el modelamiento hidráulico.

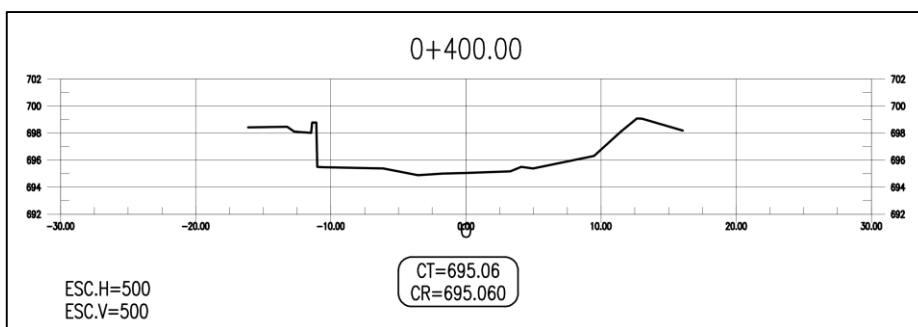


Figura 24. Sección transversal del río Amojú en la progresiva 0+000 – ubicado en el sector San Camilo

Se obtuvo la topografía de toda el área perteneciente a la zona urbana de los sectores que incluye el estudio, zonificado en Sector El Parral, Jaén – centro y Sector San Camilo, con probabilidad de inundación por la máxima avenida del río Amojú, para obtener dicha topografía se empleó la Fotogrametría haciendo uso de un vehículo volador no tripulado, conocido como Dron.

En el levantamiento se obtuvieron 766 imágenes, con una altura media de vuelo de 106m, una resolución de terreno es de 2.47cm/pix, con una distancia focal 8.8mm y los solapes fueron al 75%, con una posición de la cámara perpendicular al suelo.

Tabla 9.
Propiedades de la cámara del dron

Modelo de cámara	Imágenes	Resolución	Distancia Focal	Tamaño de píxel
FC6310 (8.8 mm)	766 imágenes	4864 x 3648	8.8 mm	2.61 x 2.61 micras

Las imágenes fueron procesadas en el software Agisoft estableciendo tres puntos de control terrestre en el puente Orellana, Mesones Muro y Pakamuros, para unir con la topografía de realizada con la estación total, obteniéndose un modelo digital de elevación que será usada en el modelamiento hidráulico con el software Iber.

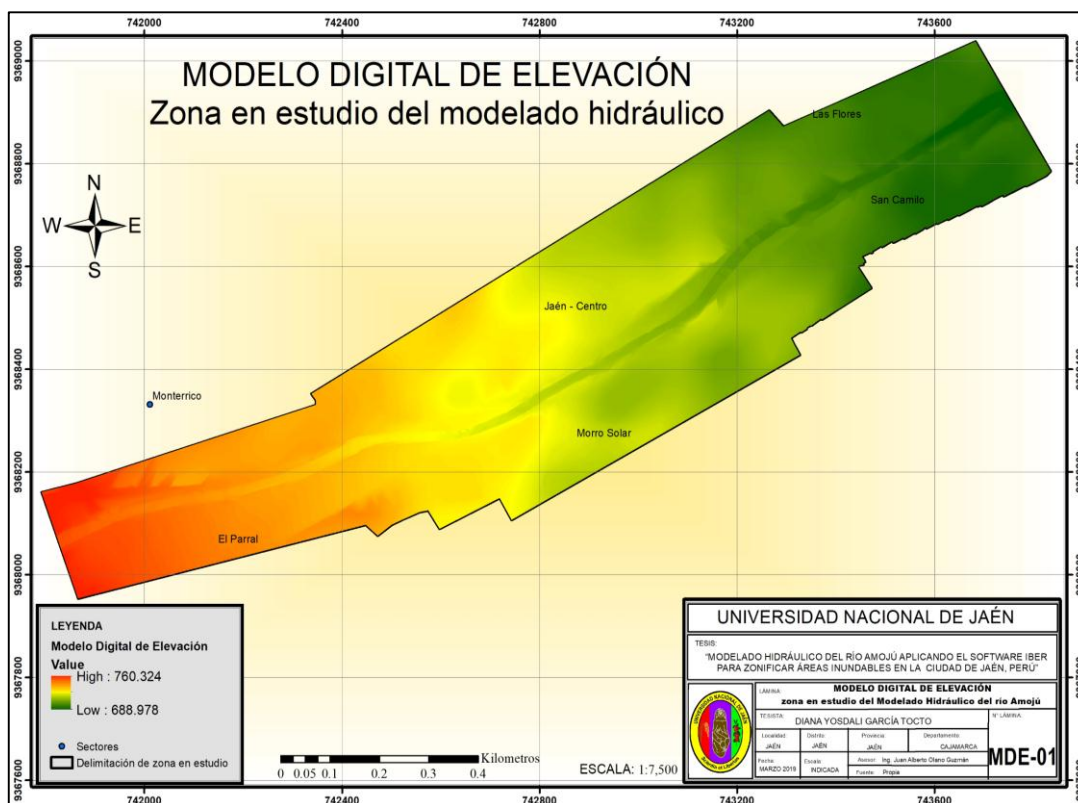


Figura 25. Modelo digital de elevación obtenido del procesamiento en el software Agisoft

También se obtuvo la ortofoto de la zona en estudio para el modelado hidráulico del río Amojú, que se muestra a continuación



Figura 26. Ortofoto de la zona en estudio para el modelado hidráulico.

3.2.3. INFORMACIÓN HÍDRICA

En la tesis de pregrado Ávila (2017), denominada «Generación de intensidades máximas de la estación pluviográfica Jaén»; donde han sido procesadas las bandas pluviográficas de la estación Jaén, para generar intensidades máximas con duraciones hasta 480 minutos, tomando la muestra pluviográfica desde el año 1964 hasta el año 1993. Dichos registros le fueron proporcionados por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

En su metodología evaluó las precipitaciones con duraciones hasta 30min, 20min y 480min; usando el modelo estadístico que se ajustó mejor para el procesamiento de las precipitaciones, siendo la distribución de Gumbel.

3.2.4. EQUIPOS

Los materiales y equipos que se emplearán será los necesarios que amerite la investigación:

- Equipos topográficos:
- Dron Phantom 4 pro
- Cámara Fotográfica
- Imágenes satelitales
- Programa Civil 3D
- Programa Agisoft
- Programa ARGIS
- Programa IBER.

Se emplearán los siguientes formatos:

- Formato para la obtención de los datos hidrológicos e hidráulicos.

3.3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

3.3.1. ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS GEOMORFOLÓGICOS

Se estimó los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú, para conocer más su comportamiento ante una avenida máxima, definida por su forma, relieve y drenaje; para ello debemos conocer una información general, para formar en primera instancia una idea general de la cuenca en estudio; por lo tanto, se expresan esta información en la tabla 10.

Tabla 10.
Información de parámetros Generales de la cuenca del río Amojú.

Parámetros Generales		
Área proyectada de la cuenca		156.640 Km ²
Perímetro de la cuenca		61.549Km
Longitud del cauce principal		25.310Km
Longitud del máximo recorrido		27.135Km
Longitud al centroide		11.709Km
Centroide	Coordenada X	733009.275
	Coordenada Y	9368165.144
	Altitud	1687.00msnm

En la figura 27 se aprecia la delimitación de la cuenca del río Amojú, con un punto de salida en función al tramo del río en estudio donde se realizará el modelamiento hidráulico, este modelo digital de elevación (MDE), que se visualiza en la imagen, fue procesado en ArcGIS obteniendo el punto más alto de la cuenca a 3172msnm y el punto más bajo a 699msnm.

Tabla 11.
Parámetros de forma de la cuenca en estudio del río Amojú

Parámetros de forma	
Índice de compacidad o Coeficiente de Gravelius (Kc)	1.387
Factor de forma (Ff)	0.213
Relación de Elongación (Re)	0.038
Relación de circularidad (Rci)	0.520
Rectángulo Equivalente o Rectángulo de Gravelius	a = 6.436 km b = 24.339 km

Los parámetros de forma de la cuenca se presentan en la tabla 11, donde el más principal es el índice de compacidad, debido a que tiene una estrecha relación con el tiempo de concentración, la infiltración y el escurrimiento superficial.

Debido a los valores que presenta la tabla mostrada anteriormente, la cuenca se clasifica como una cuenca Oval Oblonga, no encontrándose ni muy alargada, ni redonda corroborándose en la figura 27, por lo que se mantiene en un valor normal de capacidad de infiltración y tiempo de concentración.

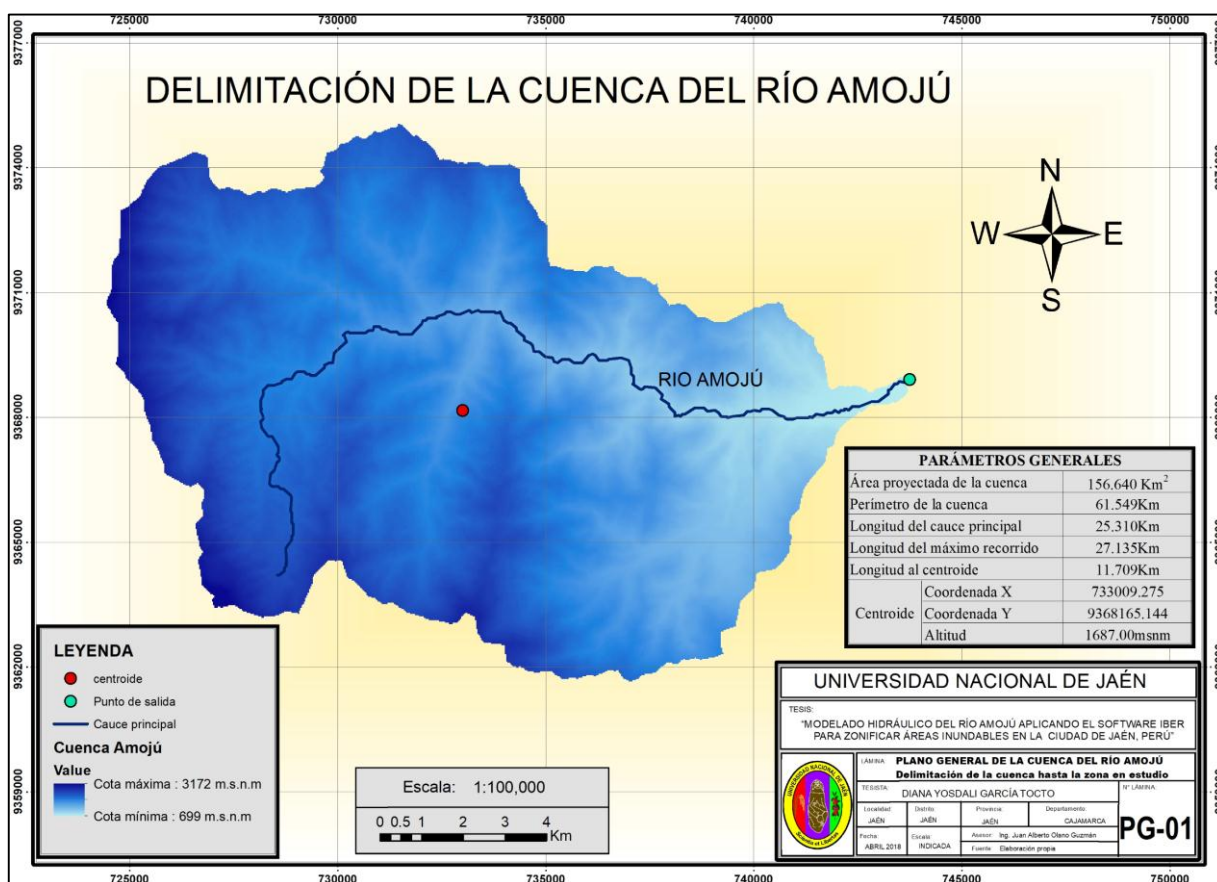


Figura 27. Delimitación de la cuenca del río Amojú

La cuenca cuenta con una pendiente fuertemente accidentada, mostrándose la escala de pendientes en la Figura 28.

Tabla 12.
Parámetros de relieve de la cuenca en estudio del río Amojú

Parámetros de relieve	
Pendiente promedio de la Cuenca	21.12%
Pendiente promedio del cauce principal	49.39%
Tiempo de Concentración	5.06 Hr
Altura Media	1859.47 msnm
Coefficiente Orográfico	0.022
Coefficiente de Masividad	0.012

El coeficiente orográfico ha servido para caracterizar el relieve de las cuencas, siendo su valor para esta cuenca de 2.207, siendo un valor bajo, por lo que se puede deducir que se trata de una cuenca no erosionable y con poco transporte de sedimento.

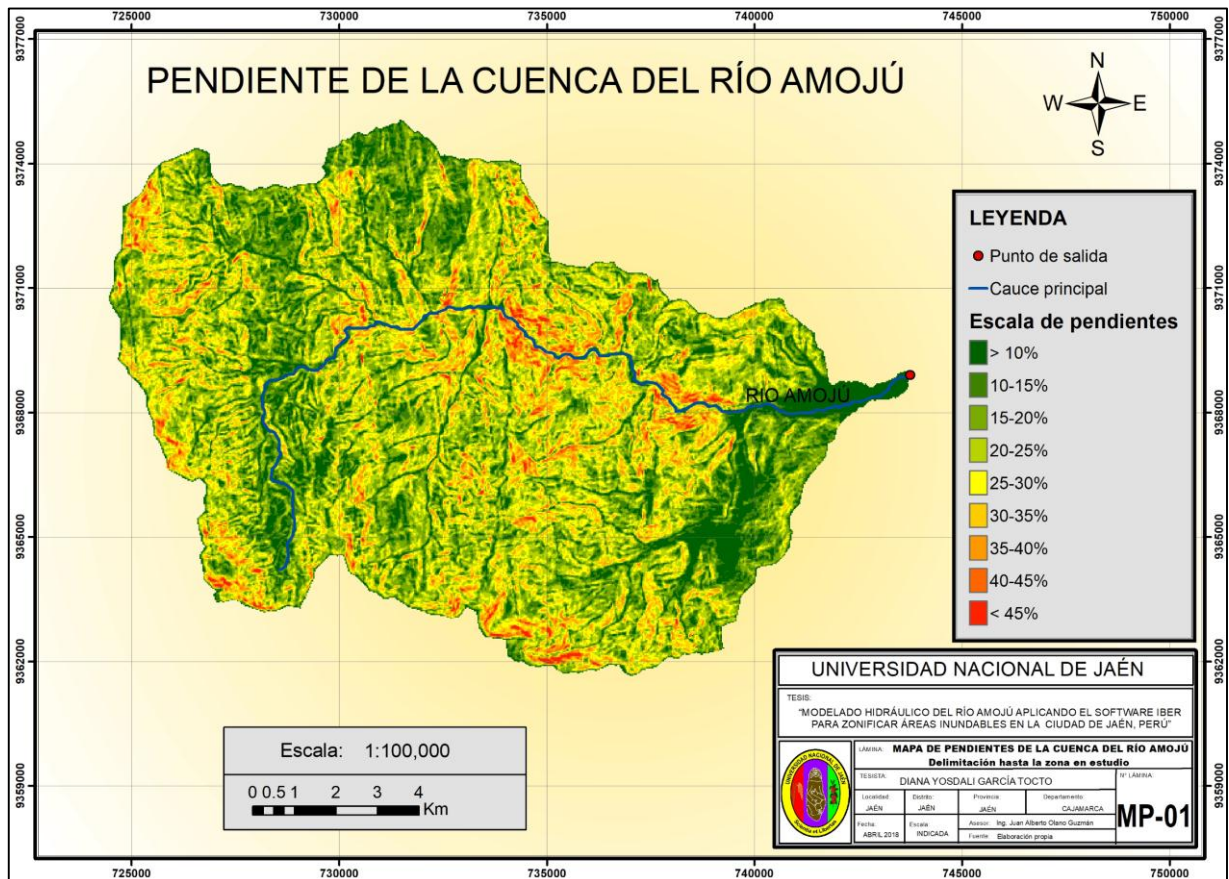


Figura 28. Escala de pendientes de la cuenca del río Amojú

El perfil longitudinal del río Amojú se muestra en la Figura 29, siendo su pendiente promedio 49.39%.

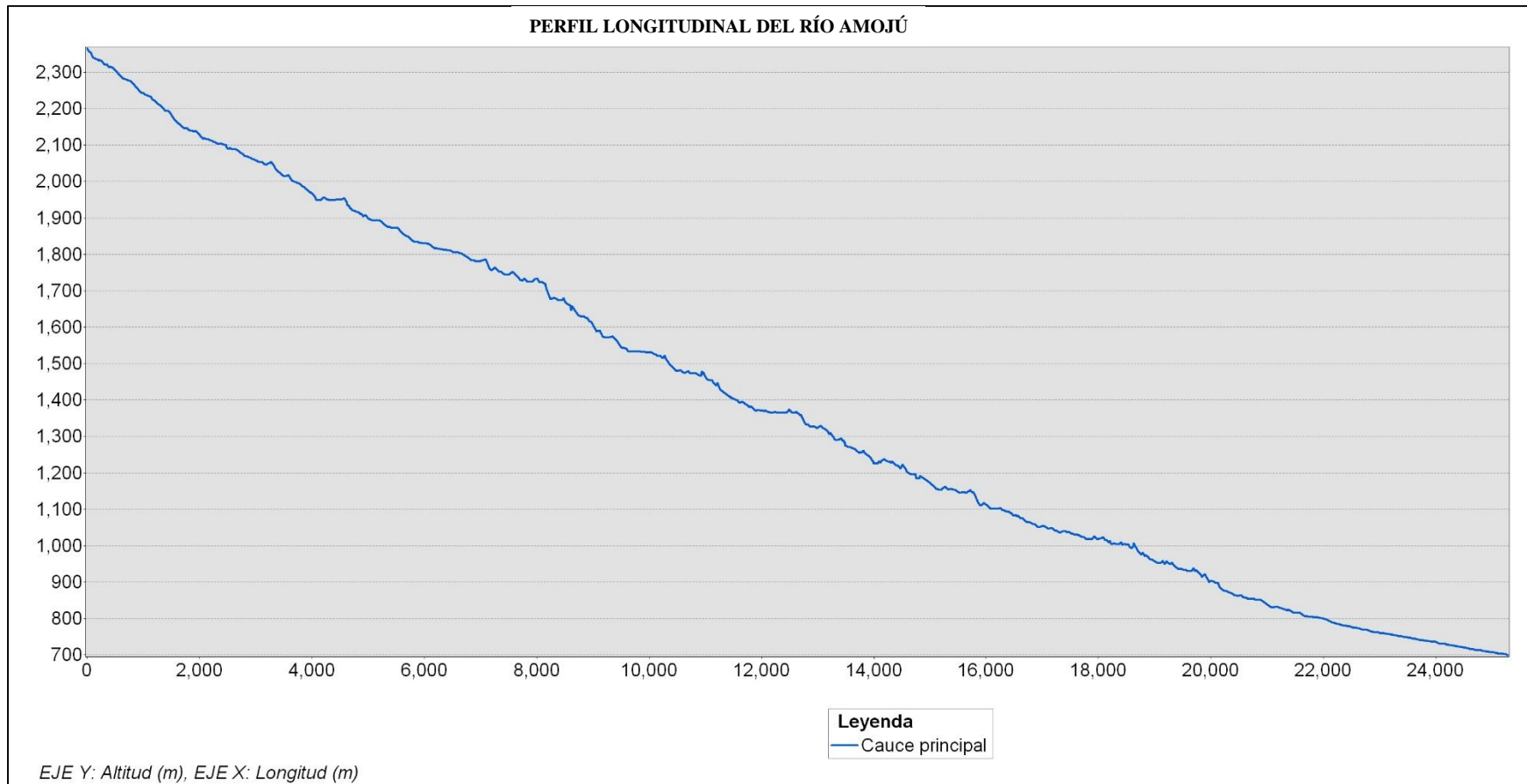


Figura 29. Perfil longitudinal del río Amojú

En el eje y-y se muestra las cotas de altitudes en unidades de m.s.n.m., y en la coordenada x-x están la longitud del río en m.

En la tabla 13 están los parámetros obtenidos de la cuenca pertenecientes a la red de drenaje, la cual está formada por el cauce principal y los cauces tributarios.

Tabla 13.
Parámetros de drenaje de la cuenca en estudio del río Amojú

Parámetros de drenaje	
Relación de confluencias	1.791
Relación de longitudes	0.812
Densidad de drenaje	0.711 km/km ²

Mientras menor sea la relación de confluencias de drenaje se acerca más a 1, se consideran con una baja relación de confluencias, un bajo flujo de infiltración, con una pendiente alta, poca vegetación, alta escorrentía directa, y cuenca degradable. Para tener una mejor visión de la red de drenaje de la cuenca en estudio, esta se puede visualizar en la Figura 30; estimando en valor de la relación de confluencias que es mayor que la unidad, se encuentra en un valor intermedio.

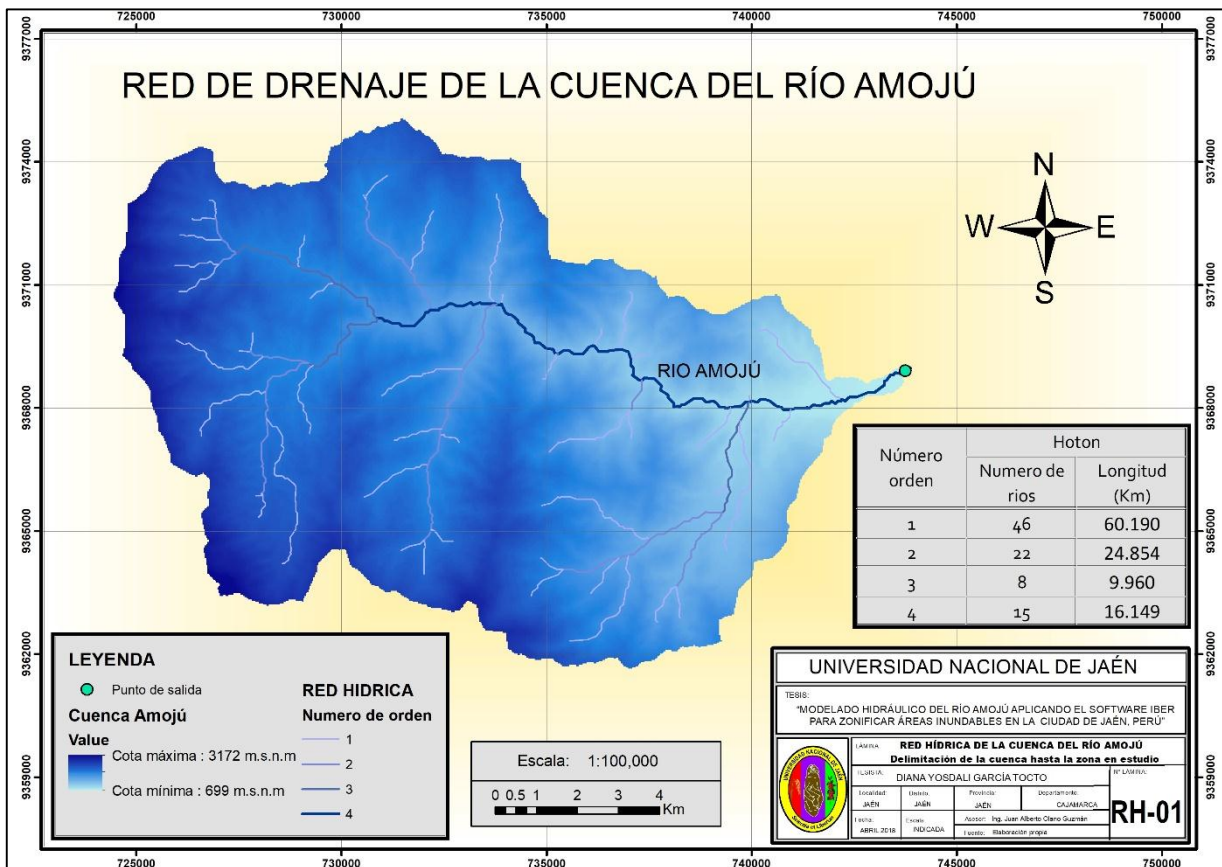


Figura 30. Red de drenaje de la cuenca del río Amojú

3.3.2. INTENSIDAD MÁXIMA ASOCIADO AL PERIODO DE RETORNO

Jaén cuenta con una estación pluviográfica, denominada Estación Jaén y está ubicada en sus coordenadas UTM según Datum WGS-84; Este: 746307.98 y Norte: 9358062.49, a una altitud de 654 m.s.n.m.

Tabla 14.
Ubicación de la Estación Meteorológica Jaén

Características de ubicación	
Código	10567
Institución Responsable	SENAMHI
Departamento	Cajamarca
Provincia	Jaén
Distrito	Jaén
Coordenadas	Latitud: 05°40'36"
	Longitud: 78°46'27"
	Altitud: 654msnm

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

En la tesis de pregrado Avila (2017) “Generación de intensidades máximas de la estación pluviográfica Jaén”, las intensidades máximas generadas a partir del procesamiento de las bandas pluviográficas de la estación Jaén, con duraciones hasta 480 minutos, tomando la muestra pluviográfica desde el año 1964 hasta el año 1993; han sido ajustadas al modelo estadístico de Gumbel, para 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 y 100 años de vida útil, con un coeficiente de determinación $R^2 > 90\%$, teniendo resultados con un alto grado de precisión.

De acuerdo a lo indicado en el «Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje» del M.T.C, en puentes y defensas ribereñas el valor máximo recomendado de Riesgo Admisible es $R=0.25$, y un tiempo de vida útil de $n=40$ años; por lo que aplicando la fórmula [13] se obtuvo un tiempo de retorno (T_r) de $139.54 \cong 140$ años. Así mismo, en base a estos parámetros se extrajo la ecuación matemática de la tesis antes mencionada, concerniente a las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia.

$$y = 295.13x^{-0.601} \quad [31]$$

Donde y es la intensidad a determinar en función de x (duración en minutos), $R^2=0.9402$, $t_c=0.082$ y $t_t=1.706$, verificando que $t_c < t_t$, indicando que las variables están bien correlacionadas.

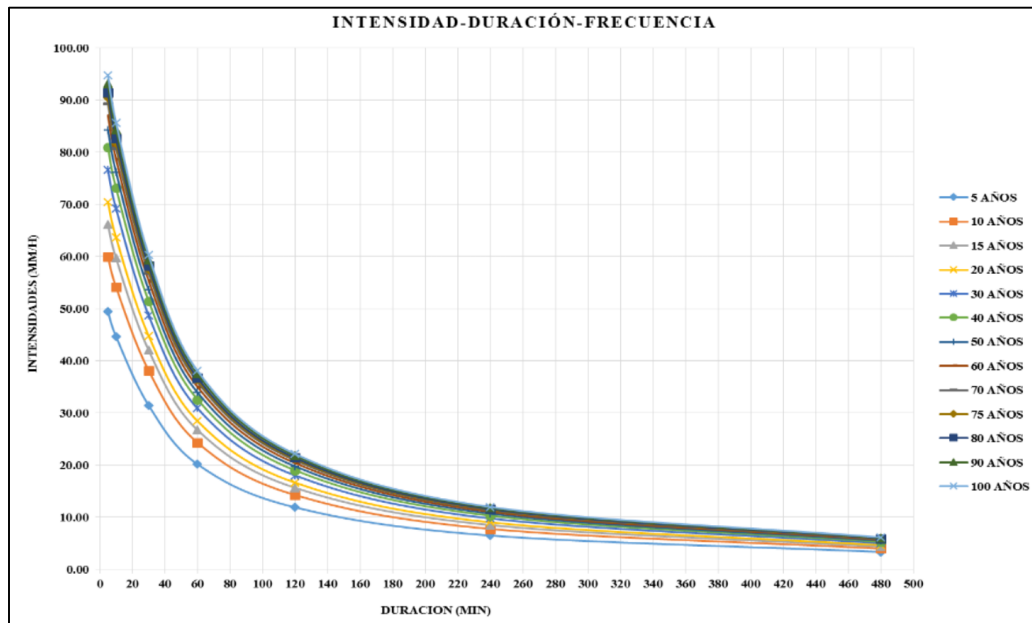


Figura 31. Gráfico de las curvas IDF para un riesgo de predicción del 25%
Fuente: Generación de intensidades máximas de la estación pluviográfica Jaén (Ávila, 2017)

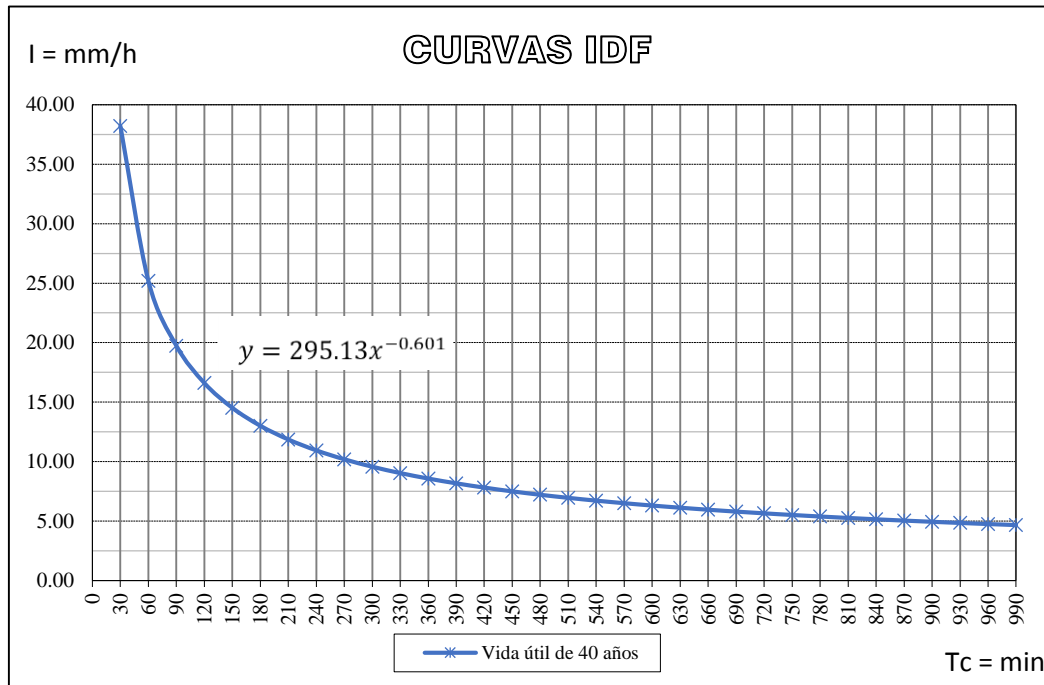


Figura 32. Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia para una vida útil de 40 años y un riesgo admisible es $R=0.25$, para una duración hasta de 990 minutos.
Fuente: Generación de intensidades máximas de la estación pluviográfica Jaén (Ávila, 2017)

En los parámetros de relieve de la cuenca en estudio del río Amojú – tabla 12, la duración (x) es de 5.06 hr, siendo 303.59 en minutos; y reemplazando (x) en la ecuación matemática [31], el resultado de la intensidad máxima es de 9.51mm/hr. Después se calculó las intensidades en unidades de mm/hr para diferentes duraciones expresadas en minutos, procediendo al procesamiento de datos, donde se obtuvieron las Precipitaciones acumuladas y sin acumular en milímetros, para intervalos de tiempo cada 30 minutos, mostrándose en la siguiente tabla.

Tabla 15.
Tormenta de diseño - método del bloque alterno

Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	P. Acumulada (mm)	Profundidad Incremental	Tiempo (min)		Precipitación (mm)
				de	a	
30	38.22	19.11	19.11	0	30	0.94
60	25.20	25.20	6.09	30	60	0.98
90	19.75	29.62	4.42	60	90	1.02
120	16.61	33.22	3.60	90	120	1.07
150	14.53	36.32	3.10	120	150	1.12
180	13.02	39.06	2.74	150	180	1.18
210	11.87	41.54	2.48	180	210	1.24
240	10.95	43.81	2.27	210	240	1.32
270	10.20	45.92	2.11	240	270	1.41
300	9.58	47.89	1.97	270	300	1.53
330	9.04	49.74	1.85	300	330	1.67
360	8.58	51.50	1.76	330	360	1.85
390	8.18	53.17	1.67	360	390	2.11
420	7.82	54.77	1.60	390	420	2.48
450	7.51	56.30	1.53	420	450	3.10
480	7.22	57.77	1.47	450	480	4.42
510	6.96	59.18	1.41	480	510	19.11
540	6.73	60.55	1.37	510	540	6.09
570	6.51	61.87	1.32	540	570	3.60
600	6.31	63.15	1.28	570	600	2.74
630	6.13	64.39	1.24	600	630	2.27
660	5.96	65.59	1.20	630	660	1.97
690	5.81	66.77	1.18	660	690	1.76
720	5.66	67.91	1.14	690	720	1.60
750	5.52	69.03	1.12	720	750	1.47
780	5.39	70.11	1.08	750	780	1.37
810	5.27	71.18	1.07	780	810	1.28
840	5.16	72.22	1.04	810	840	1.20
870	5.05	73.24	1.02	840	870	1.14
900	4.95	74.23	0.99	870	900	1.08
930	4.85	75.21	0.98	900	930	1.04
960	4.76	76.17	0.96	930	960	0.99
990	4.67	77.11	0.94	960	990	0.96

A partir de estas precipitaciones sin acumular, calculada para diferentes en intervalos de tiempo, se representó el Hietograma de diseño representando dichas precipitaciones en milímetros y la duración de la lluvia en minutos.

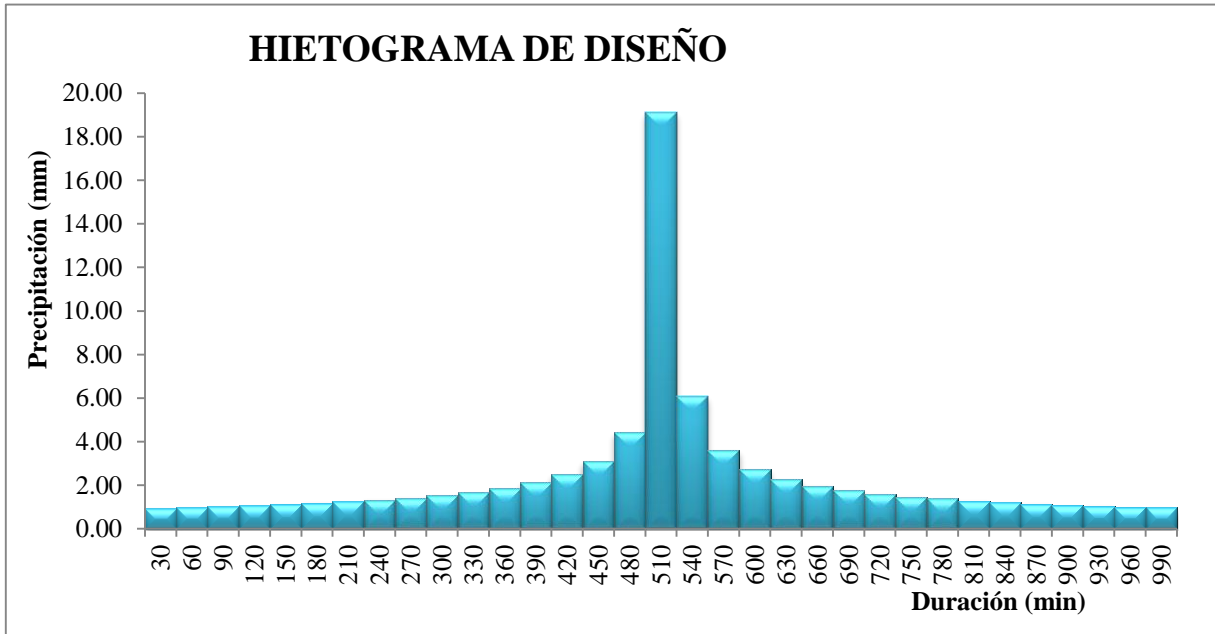


Figura 33. Hietograma de diseño para un tiempo de retorno de 140 años

3.3.3. DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO.

3.3.3.1. MÉTODO SCS PARA ABSTRACCIONES

Para el cálculo del número de curva, primero se identificó los porcentajes de áreas que pertenecen a cada grupo hidrológico del suelo, trabajados a partir del mapa del tipo de suelos obtenido en base al estudio del Gobierno Regional de Cajamarca (2012) “Estudio de suelos de y capacidad de uso mayor de las tierras departamento de Cajamarca” y aprobado por el Ministerio del Ambiente (MINAM).

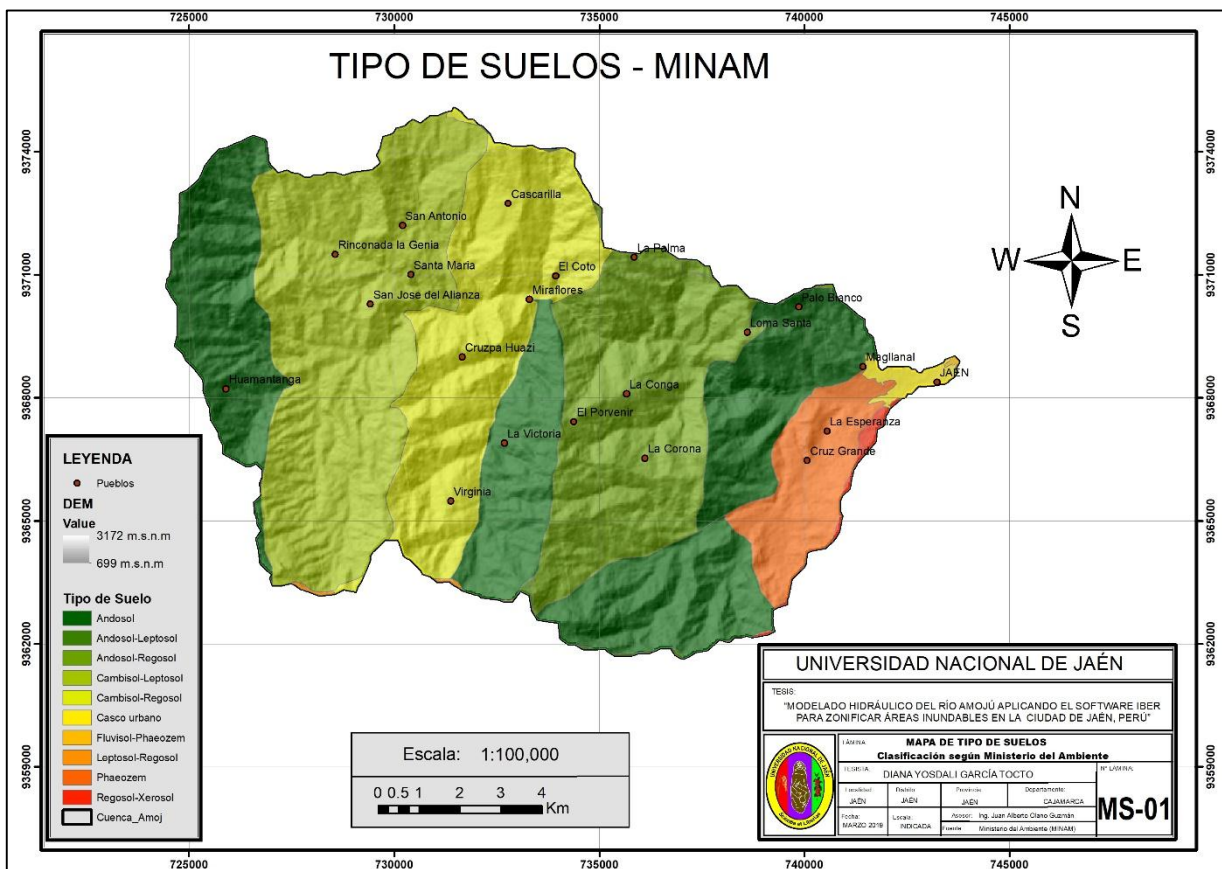


Figura 34. Mapa de tipo de suelos - MINAM

Fuente: Gobierno Regional de Cajamarca (2012) “Estudio de suelos de y capacidad de uso mayor de las tierras departamento de Cajamarca” – MINAM.

En base a esta clasificación Geológica – Edafológica, se evaluaron las características que presenta cada tipo de suelo, y se clasificó según los grupos hidrológicos del suelo tipo de A, B, C y D del Soil Conservation Service, características descritas en el capítulo anterior; dicha clasificación se realizó mediante el comparativo en la siguiente tabla:

Tabla 16.
Tormenta de diseño - método del bloque alterno

Cambisol – Regosol (B-R)	Grupo A
<ul style="list-style-type: none"> • Relieve: ondulado • Texturas: ligera a media. • Drenaje: bueno a excesivo. • Reacción: ligera a moderadamente ácida. • Pendiente: empinada a fuertemente empinada. • Aptitud: instalación de pastos y forestales. • Fertilidad: baja a media. • Suelos superficiales a moderadamente profundos. • Ligeramente pedregosa y erosión moderada a severa. • Capacidad de retención de humedad: en función a la profundidad. • Desarrollo a partir de rocas areniscas, cuarcitas, lutitas y calizas. • Otros lugares: suelos desarrollados a partir de materiales de origen aluvio-coluvial jóvenes [compuesto por arena, grava, arcilla o limo]. • Localización: terrazas medias, deposiciones en laderas de colina, montañas y piedemonte 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de escurrimiento: bajo (tasa alta de infiltración). • Composición: arenas o gravas profundas. • Drenaje: bien a excesivamente bien drenados. • Suelos profundos depositados por el viento. • Limos, agregados y arena profunda.
Andosoles (T)	Grupo B
<ul style="list-style-type: none"> • Buena capacidad para almacenar humedad. • Potencial agrícola. • Suelos superficiales a moderadamente profundos. • Textura: media • Drenaje: bueno • Alta capacidad de retención de humedad. • Fertilidad media • Desarrollo moderado in situ • Aptitud: actividades pecuarias y forestales, pastoreo controlado. • Relieve: ondulado ocupados por pastos naturales y vegetación arbustiva. • Depósitos de materiales detríticos gruesos y finos. • Se encuentran principalmente en laderas de montañas, así como también sobre depósitos coluvio-aluviales [constituidos por gravas, arenas y arcillas] de piedemonte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Suelos moderadamente profundos a profundos. • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento. • Margo arenosos [arena, limo y arcilla]
Andosol - Leptosol (T-L)	Grupo - B
<ul style="list-style-type: none"> • Perfil: A(B)C, AC, AR. • Suelo asociado al Leptosol. • Muy superficiales a superficiales • Textura ligera a media • Drenaje bueno a excesivo • Material litológico: areniscas, cuarcitas, calizas, lutitas y rocas volcánicas. • Cubiertos de vegetación arbustiva, cultivos agrícolas en pequeñas superficies 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Suelos moderadamente profundos a profundos. • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento.

Continuación

<ul style="list-style-type: none"> • Se localizan en laderas de colina, montañas y piedemonte. • Tiene una permeabilidad moderada a moderadamente rápida • Con pendientes moderadamente empinada a fuertemente empinada. • Fertilidad natural media, con contenido de materia orgánica que va de media a alta. • Aptitud para pastos, cultivos agrícolas propios de la zona como papa, maíz, cereales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Margo arenosos [arena, limo y arcilla]
Andosol – Regosol (T-R)	Grupo – B
<ul style="list-style-type: none"> • Textura media. • Permeabilidad moderada. • Perfil AB, AC • Superficiales a muy superficiales • Drenaje bueno a excesivo. • Cubiertos por bosques naturales, vegetación arbustiva, pastos naturales, cultivos agrícolas, presenta afloramientos rocosos. • Origen de descomposición de materiales volcánicos – andesíticos. • Desarrollados a partir de materiales no consolidados de origen aluvio coluvial, suelos jóvenes. • Materiales provenientes de la descomposición principalmente de rocas calizas, areniscas, cuarcitas y lutitas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Margo arenosos • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento.
Cambisol – Leptosol (B-L)	Grupo – B
<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente desarrollados • Relieve ondulado • Paisaje dominante empinado • Texturas ligeras a medias. • Drenaje bueno a excesivo • Ocupado por bosques naturales, vegetación arbustiva, vegetación escasa y afloramientos rocosos y pequeñas parcelas de cultivos agrícolas. • Formados a partir de rocas calizas, areniscas y cuarcitas. • Suelos muy superficiales a moderadamente profundos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Margo arenosos • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento.
Fluvisol – Phaeozem (J - H)	Grupo – A
<ul style="list-style-type: none"> • Suelos profundos a muy profundos. • Permeabilidad moderada a moderadamente lenta. • Textura media a pesada • Drenaje bueno a imperfecto • Actualmente está ocupado por cultivos agrícolas, frutales y por vegetación arbustiva (huarango, huayo y otras plantas de hábito xerófilo). • Proviene de la descomposición de sedimentos fluviales, aluviales y coluviales [gravas, arenas y arcillas.] transportados por las quebradas que desembocan en los ríos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de escurrimiento: bajo (tasa alta de infiltración). • Composición: arenas o gravas profundas. • Drenaje: bien a excesivamente bien drenados. • Suelos profundos depositados por el viento. • Limos, agregados y arena profunda.
Leptosol – Regosol (L - R)	Grupo – B
<ul style="list-style-type: none"> • Texturas moderadamente gruesas, • Drenaje excesivo • Poca capacidad de retención de humedad 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Margo arenosos

Continuación

<ul style="list-style-type: none"> • suelos son muy superficiales a superficiales • Con abundantes afloramientos rocosos y erosión moderada a severa. • Desarrollo insitu a partir de rocas areniscas cuarzosas, lutitas y rocas volcánicas, otros son desarrollados a partir de depósitos de materiales detríticos gruesos derivados de estas mismas rocas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. <p>Suelos poco profundos depositados por el viento.</p>
Phaeozen (H)	Grupo – B
<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente profundos a muy profundos • Moderadamente profundos a muy profundos • Buena capacidad de retención de humedad. • Drenaje bueno • Texturas medias en superficie y pesadas en profundidad. • Suelos desarrollados a partir de depósitos de material detrítico fino de diferente naturaleza, areniscas, cuarcitas, lutitas y en algunos casos de calizas, de origen aluvia y coluvial 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Margo arenosos • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento.
Regosol - Xerosol (R-X)	Grupo – B
<ul style="list-style-type: none"> • Son superficiales a muy superficiales • Texturas medias a moderadamente gruesa • Drenaje excesivo a algo excesivo • Tienen una permeabilidad moderada a moderadamente rápida. • Constituidos por depósitos de materiales detríticos gruesos derivados de rocas areniscas cuarzosas, lutitas, margas y calizas 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasa de infiltración: moderada • Margo arenosos • Drenaje: bien a moderadamente bien drenados. • Textura: moderadamente fina a moderadamente gruesas. • Suelos poco profundos depositados por el viento.

Fuente: Gobierno Regional de Cajamarca (2012) “*Estudio de suelos de y capacidad de uso mayor de las tierras departamento de Cajamarca*” y Singh (1992) “*Elementary Hydrology*”.

En cuanto al casco urbano se ha considerado como Grupo – A, debido a que son excesivamente bien drenados, excepto que no tienen tasas altas de infiltración.

A partir de este estudio comparativo se obtuvo como resultado dos tipos de suelo; Grupo A y Grupo B, donde el área y porcentaje de influencia del área total de cada grupo hidrológico se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 17.
Grupos hidrológicos del suelo

Área Km ²	Porcentaje %	Grupo Hidrológico del Suelo	Definición
128.471	17.983	Grupo A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento
28.169	82.017	Grupo B	Suelos pocos profundos depositados por el viento, marga arenosa

En la siguiente figura fueron graficados los tipos de suelo según su grupo hidrológico, teniendo un grupo A con un área de 28.169 km² y un grupo B con un área de 128.471 km², representando el 17.983% y 82.017% del área total.

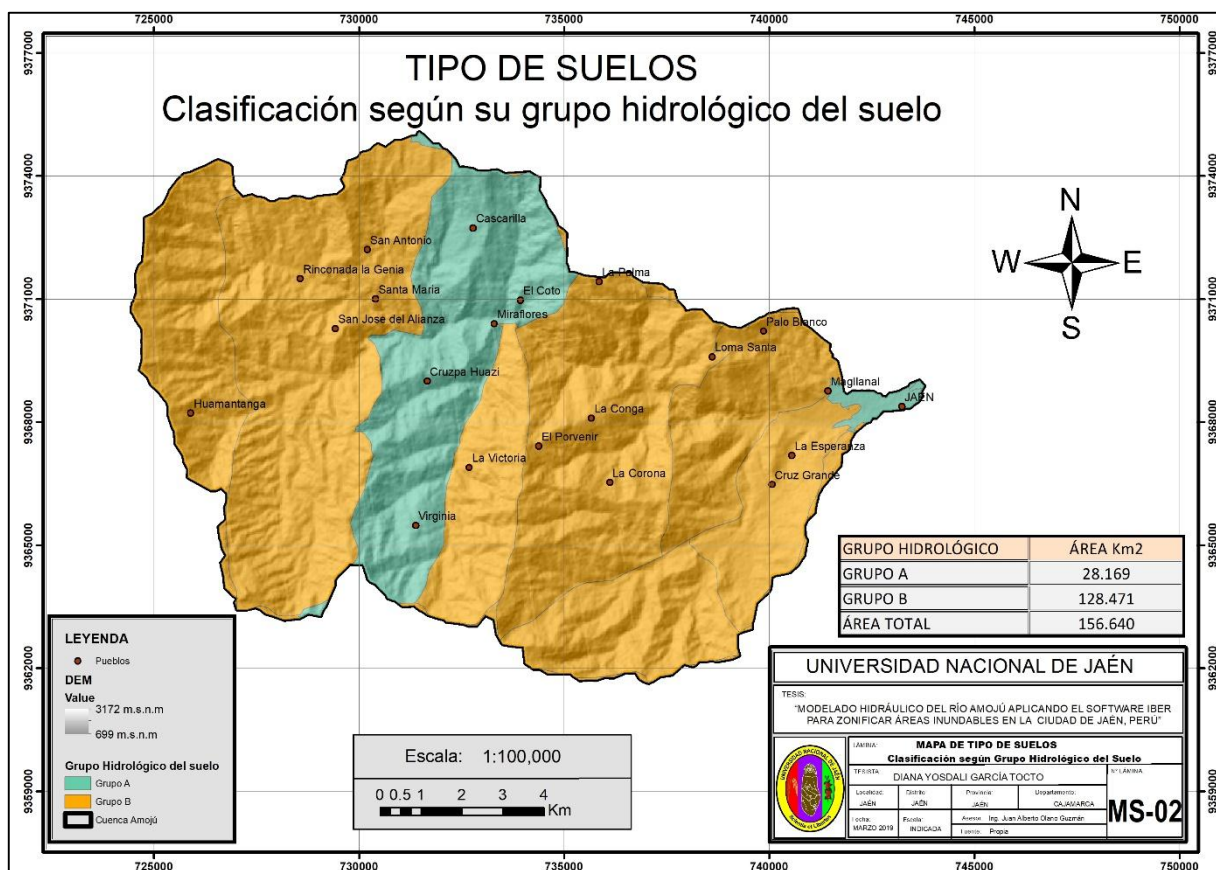


Figura 35. Mapa de tipo de suelos según su grupo hidrológico

A continuación, se calculó los porcentajes de cada área según su uso de suelos, resultados obtenidos del procesamiento de las imágenes con bandas espectrales, suministrados por CONIDA, del satélite peruano PerúSAT, datos que fueron calibrados con los mapas de cobertura vegetal – MINAM; obteniendo el siguiente mapa de uso de suelos y cobertura vegetal para el cálculo del Número de curva.

El uso de tierra fue clasificado en Tierra cultivada (sin tratamiento de conservación), Pastizales (condiciones pobres), Vegas de ríos, Bosques con cubierta pobre y cubierta buena, y para la zona urbana se clasificó en áreas abiertas, áreas comerciables, calles (pavimentadas y tierra), y residencial, representándose en la siguiente figura.

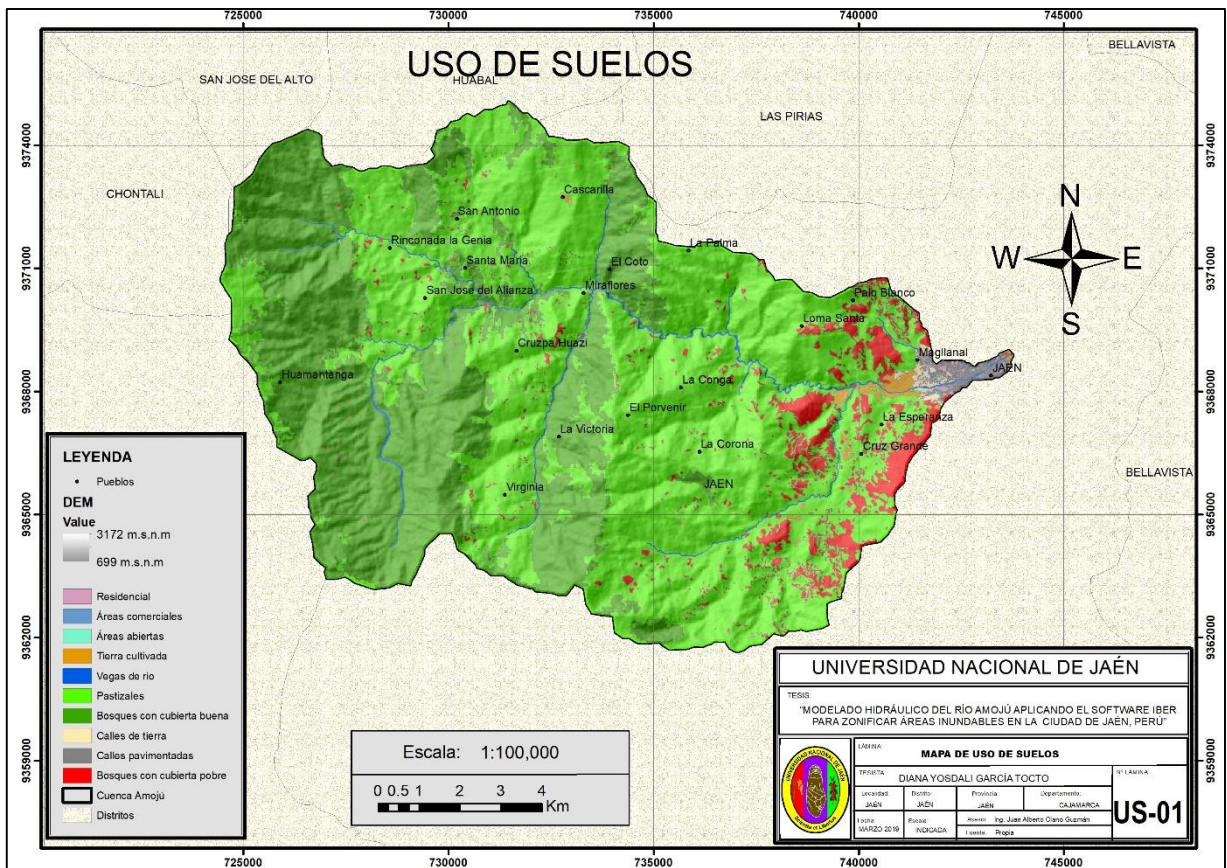


Figura 36. Mapa de uso de suelos de la cuenca del río Amojú.

Del mapa anterior, se obtuvieron las siguientes áreas y porcentajes, en función de uso de suelo.

Tabla 18.
Áreas de uso de suelos

Uso de suelos	Área km ²	Porcentaje %
Bosque con cubierta buena	1.716	1.096
Pastizales o campo de animales en condiciones pobres	91.756	58.577
Vegas de ríos en condiciones óptimas	0.884	0.565
Bosques con cubierta pobre	8.541	5.452
Bosque con cubierta buena	52.110	33.267
Áreas abiertas	0.027	0.017
Áreas comerciales de negocios	0.178	0.114
Calles pavimentadas	0.194	0.124
Calles de tierra	0.619	0.395
Zona residencial	0.615	0.393
Total	156.640	100.000

Teniendo en cuenta el grupo hidrológico del suelo, y las áreas según su uso de suelo, se procedió a calcular el número de curva ponderado (CN) en la siguiente tabla y para condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$.

Tabla 19.
Cálculo del Número de Curva

USO DEL SUELO		AREA km ²	GRUPO HIDROLOGICO DEL SUELO							
			A				B			
			Área (km ²)	%	CN	PROD.	Área (km ²)	%	CN	PROD.
Tierra cultivada	Sin tratamientos de conservación	1.7162	0.1646	0.1051	72	0.0756	1.5517	0.9906	81	0.8024
Pastizales	Condiciones pobres	91.7557	19.0663	12.1720	68	8.2770	72.6895	46.4054	79	36.6603
Vegas de río	Condiciones óptimas	0.8843	0.2152	0.1374	30	0.0412	0.6691	0.4272	58	0.2478
Bosques	Cubierta pobre	8.5407	0.3927	0.2507	45	0.1128	8.1480	5.2018	66	3.4332
	Cubierta Buena	52.1101	7.2144	4.6057	25	1.1514	44.8958	28.6617	55	15.7640
Áreas abiertas	Condiciones aceptables	0.0268	0.0148	0.0094	49	0.0046	0.0121	0.0077	69	0.0053
Áreas comerciales	85% impermeable	0.1780	0.1754	0.1120	89	0.0997	0.0026	0.0017	92	0.0016
Calles	Pavimentadas	0.1935	0.1932	0.1234	98	0.1209	0.0003	0.0002	98	0.0002
	Tierra	0.6194	0.2111	0.1347	72	0.0970	0.4084	0.2607	82	0.2138
Residencial	Menor a 1/8 acre	0.6151	0.5217	0.3331	77	0.2564	0.0934	0.0596	85	0.0507
TOTAL		156.640	28.169			10.24	128.471			57.18
CN ponderado = CN(A)+CN(B)							67.42			

El uso de suelos de tierra cultivada se consideró sin tratamientos de conservación, pastizales para condiciones pobres y áreas abiertas como condiciones aceptables, debido a que se optó por la condición más crítica; además en el uso residencial se consideró como menor a 1/8 acre, porque según el plan de desarrollo urbano, los lotes en la ciudad de Jaén son en promedio de 120m², siendo el valor de 1/8 acre = 500m².

Se consideró un Número de Curva para condiciones húmedas CN(III), ya que es el caso más crítico para máximas avenidas; para ello se empleó la ecuación [12], obteniendo un resultado del CN (III) de 82.635.

Para el cálculo de la Precipitación efectiva se tuvo en cuenta el principio de continuidad expresada en la ecuación [7] del marco teórico, y considerando el 20% de retención máxima para una tormenta dada, para ello primero se calculó la retención máxima (S) que está en función del número de curva, utilizando la ecuación [10] del capítulo anterior y obteniendo como resultado 2.101 pulgadas, convertidos a milímetros el valor es de 53.380mm; siendo la abstracción inicial (I_a) de 10.676mm.

Tabla 20.
Cálculo de Precipitaciones Efectivas

Tiempo (min)	Lluvia acumulada (mm)	Abstracciones acumuladas		Exceso de lluvia acumulado (mm)	Exceso de lluvia (mm)
		I_a	F_a		
30	19.11	10.68	7.28	1.15	1.15
60	25.20	10.68	11.42	3.11	1.96
90	29.62	10.68	13.98	4.96	1.86
120	33.22	10.68	15.85	6.69	1.73
150	36.32	10.68	17.32	8.32	1.63
180	39.06	10.68	18.53	9.85	1.53
210	41.54	10.68	19.56	11.31	1.45
240	43.81	10.68	20.44	12.69	1.38
270	45.92	10.68	21.23	14.02	1.33
300	47.89	10.68	21.93	15.29	1.27
330	49.74	10.68	22.56	16.51	1.22
360	51.50	10.68	23.13	17.69	1.18
390	53.17	10.68	23.66	18.83	1.14
420	54.77	10.68	24.15	19.95	1.11
450	56.30	10.68	24.60	21.02	1.08
480	57.77	10.68	25.02	22.07	1.05
510	59.18	10.68	25.41	23.09	1.02
540	60.55	10.68	25.78	24.09	1.00
570	61.87	10.68	26.13	25.06	0.97
600	63.15	10.68	26.46	26.01	0.95
630	64.39	10.68	26.77	26.94	0.93
660	65.59	10.68	27.07	27.85	0.91
690	66.77	10.68	27.35	28.74	0.90
720	67.91	10.68	27.62	29.61	0.87
750	69.03	10.68	27.88	30.48	0.86
780	70.11	10.68	28.12	31.31	0.84
810	71.18	10.68	28.36	32.14	0.83
840	72.22	10.68	28.59	32.96	0.81
870	73.24	10.68	28.80	33.76	0.80
900	74.23	10.68	29.01	34.54	0.78
930	75.21	10.68	29.21	35.32	0.78
960	76.17	10.68	29.41	36.08	0.76
990	77.11	10.68	29.60	36.84	0.75

La precipitación efectiva, que es igual a la sustracción de la precipitación total menos la abstracción inicial (I_a) y la abstracción continuada (F_a), expresada en la ecuación [7]; donde la abstracción continuada se calculó desarrollando las ecuaciones [6] y [9].

En base a los resultados anteriores se graficó el Hietograma de Precipitaciones iniciales y precipitaciones efectivas.

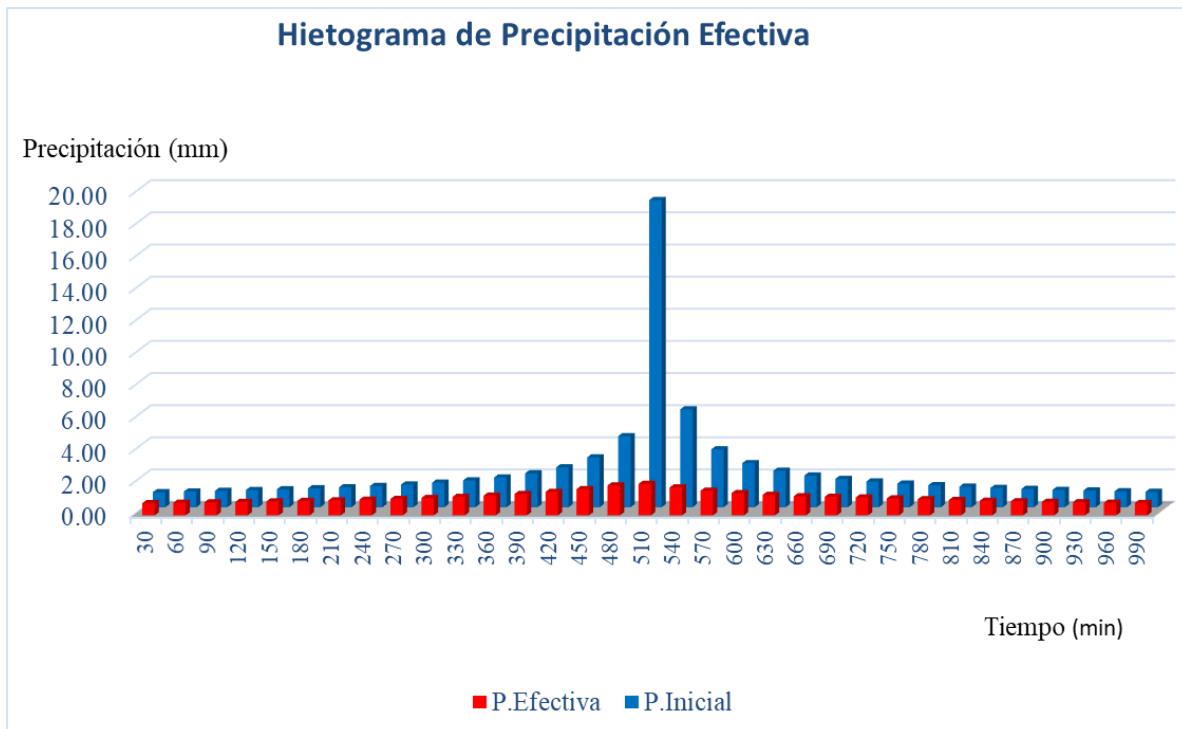


Figura 37. Histograma de Precipitaciones Iniciales Vs Precipitaciones Efectivas

3.3.3.2. HIDROGRAMA UNITARIO SINTÉTICO DE SNYDER

Según el MTC (2008), afirma que el rango de aplicación de este método es de 30 a 30 000 km², y siendo el caso, que la cuenca en estudio posee un área de 156.64km², estando dentro del rango; por lo que se procedió a usar dicho método, para ello se procedió a realizar los cálculos correspondientes, tomando como datos básicos los parámetros geomorfológicos y fisiográficos de la cuenca.

Para el cálculo de los componentes básicos de dicho hidrograma, se utilizaron las fórmulas que pertenecen a estimación de caudales, hidrograma unitario sintético de Snyder expresadas en el Marco Teórico - Capítulo II, donde dichos resultados se indican en la siguiente tabla, con sus unidades correspondientes:

Tabla 21.
Componentes básicos del Hidrograma Unitario de Snyder

Componentes del HU	Símbolo	Resultados	Unidad de medida
Tiempo de rezago	T_R	3.036	horas
Duración de la lluvia	t_s	0.552	horas
Tiempo Pico	T_p	5.566	horas
Caudal Pico por unidad de área	u_p	122.991	$\text{Ft}^3/\text{s} \cdot \text{mi}^2 \cdot \text{in}$
Caudal Pico Total	U_p	8.292	$\text{m}^3/\text{s}(\text{mm})$
Tiempo base	t_b	16.698	horas
Intervalo de tiempo 50% de u_p	W_{50}	4.260	horas
Intervalo de tiempo 75% de u_p	W_{75}	2.434	horas

Para el cálculo del caudal pico por milla cuadrada u_p , se consideró el coeficiente que depende de la topografía de la cuenca C_p con un valor de 0.80 y se empleó la ecuación [20], debido a que se consideró que el hidrograma unitario a construir corresponde a una precipitación efectiva cuya duración no coincide con el tiempo pico. Además, el valor obtenido de caudal pico total con la ecuación [21] fue en unidades $\text{ft}^3/\text{s} \cdot \text{in}$, por lo que se realizó la conversión a $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{mm}$.

La duración de la escorrentía superficial o tiempo base del hidrograma unitario t_b , se estimó como 3 veces el tiempo pico (T_p), debido que la cuenca en estudio tiene un área pequeña y el resultado con la ecuación [22] es excesivamente alto.

En base a los resultados obtenidos de los intervalos de tiempo en horas, correspondiente al 50% (W_{50}) y 75% (W_{75}) del caudal pico por unidad de área, se estimaron el caudal y el tiempo de cada coordenadas del hidrograma unitario, además, cada intervalo de tiempo se ubicó en el hidrograma unitario, de tal forma que trazando una línea vertical que pasa por el caudal pico, la tercera parte queda a la izquierda de la línea y las dos terceras partes a la derecha por lo que:

- El punto A, se estimó el tiempo pico menos la tercera parte de W_{50} .
- El punto B, se estimó el tiempo pico menos la tercera parte de W_{75} .
- El punto C, se estimó como equivalente al tiempo pico.
- El punto D, se estimó la suma del tiempo pico y las dos terceras partes de W_{75} .
- El punto E, se estimó la suma del tiempo pico y las dos terceras partes de W_{50} .
- El punto F, se estimó como equivalente al tiempo base.

Tabla 22.
Coordenadas del Hidrograma Unitario de Snyder

Puntos	T (horas)	Q (m3/s*mm)	Q (m3/s*cm)
0	0	0	0.000
A	4.15	4.15	41.460
B	4.75	6.22	62.190
C	5.57	8.29	82.920
D	7.19	6.22	62.190
E	8.41	4.15	41.460
F	16.70	0.00	0.000

Con dichas coordenadas se dibujó el Hidrograma Unitario Sintético de Snyder, que se muestra en la siguiente figura:

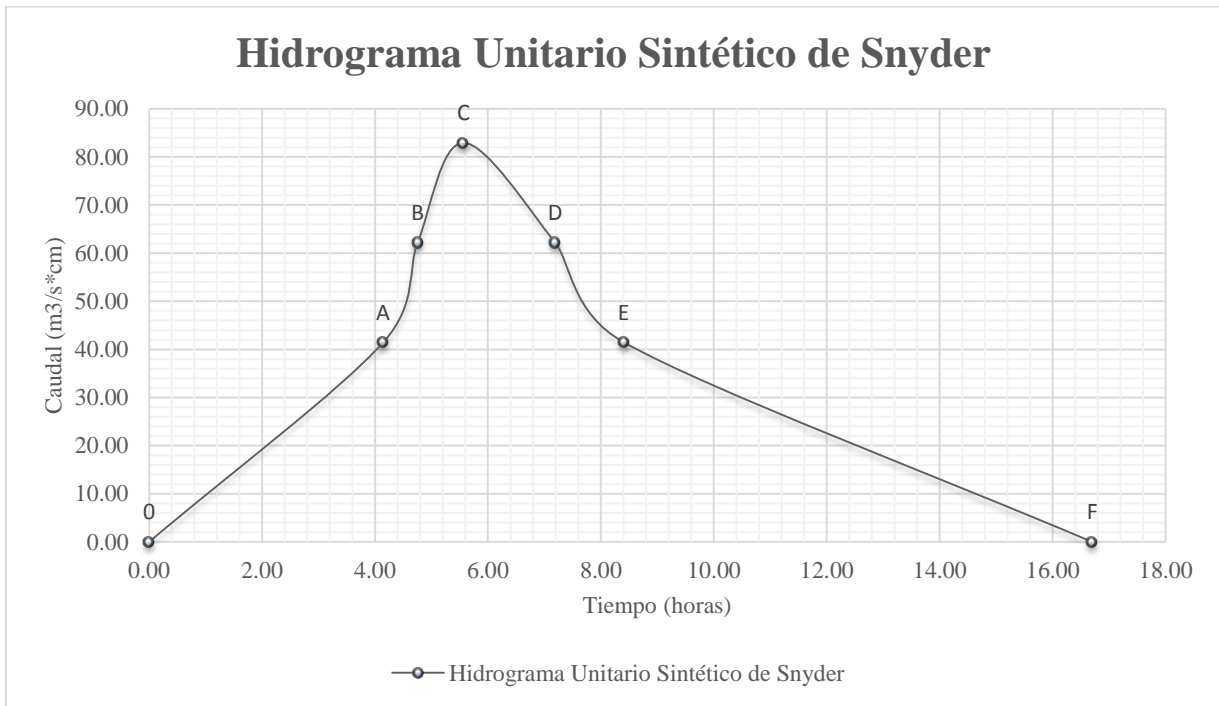


Figura 38. Hidrograma Sintético de Snyder de la cuenca del río Amojú.
Para un riesgo admisible de 0.25, una vida útil de 40 años y un tiempo de retorno de 140 años

En base a las coordenadas que indican tiempo y caudal por caudal pico por centímetro, se procedió a completar los caudales en intervalos de tiempo de 30 minutos o 0.50horas, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23.
*Caudales en m³/s*cm en intervalos de tiempo de 0.50 horas*

Tiempo (horas)	Caudal (m ³ /s*cm)	Tiempo (horas)	Caudal (m ³ /s*cm)	Tiempo (horas)	Caudal (m ³ /s*cm)
0.00	0.000	6.00	77.374	12.00	23.489
0.50	5.000	6.50	70.988	12.50	20.989
1.00	10.000	7.00	64.601	13.00	18.489
1.50	15.001	7.50	56.889	13.50	15.989
2.00	20.001	8.00	48.374	14.00	13.488
2.50	25.001	8.50	40.990	14.50	10.988
3.00	30.001	9.00	38.490	15.00	8.488
3.50	35.002	9.50	35.989	15.50	5.988
4.00	40.002	10.00	33.489	16.00	3.488
4.50	58.862	10.50	30.989	16.50	0.988
5.00	74.490	11.00	28.489	16.70	0.000
5.50	81.939	11.50	25.989		

Con los caudales del hidrograma unitario Sintético de Snyder y con la lluvia de diseño o exceso de lluvia, se determinó el hidrograma de diseño; mediante el proceso de convolución.

Tabla 24.
Caudales resultantes en m³/s en intervalos de tiempo de 0.50 horas

Tiempo (horas)	Caudal Resultante (m ³ /s)	Tiempo (horas)	Caudal Resultante (m ³ /s)	Tiempo (horas)	Caudal Resultante (m ³ /s)	Tiempo (horas)	Caudal Resultante (m ³ /s)
0.00	0.00	8.50	107.02	16.70	107.36	25.00	25.77
0.50	0.00	9.00	110.51	17.00	104.22	25.50	22.48
1.00	0.58	9.50	113.08	17.50	100.85	26.00	19.44
1.50	2.13	10.00	115.22	18.00	97.33	26.50	16.64
2.00	4.61	10.50	116.97	18.50	93.63	27.00	14.08
2.50	7.96	11.00	118.32	19.00	89.73	27.50	11.74
3.00	12.12	11.50	119.31	19.50	85.62	28.00	9.63
3.50	17.04	12.00	119.92	20.00	81.29	28.50	7.74
4.00	22.70	12.50	120.17	20.50	76.74	29.00	6.06
4.50	29.04	13.00	120.05	21.00	70.92	29.50	4.60
5.00	37.65	13.50	119.59	21.50	64.08	30.00	3.34
5.50	49.22	14.00	118.80	22.00	56.83	30.50	2.29
6.00	62.41	14.50	117.67	22.50	50.07	31.00	1.44
6.50	75.01	15.00	116.22	23.00	43.92	31.50	0.79
7.00	85.80	15.50	114.44	23.50	38.35	32.00	0.34
7.50	94.73	16.00	112.37	24.00	33.47	32.50	0.07
8.00	101.83	16.50	110.01	24.50	29.31	33.00	0.00

En base a los intervalos de tiempo en horas y los caudales en m³/s de la tabla anterior, se graficó el Hidrograma Unitario.

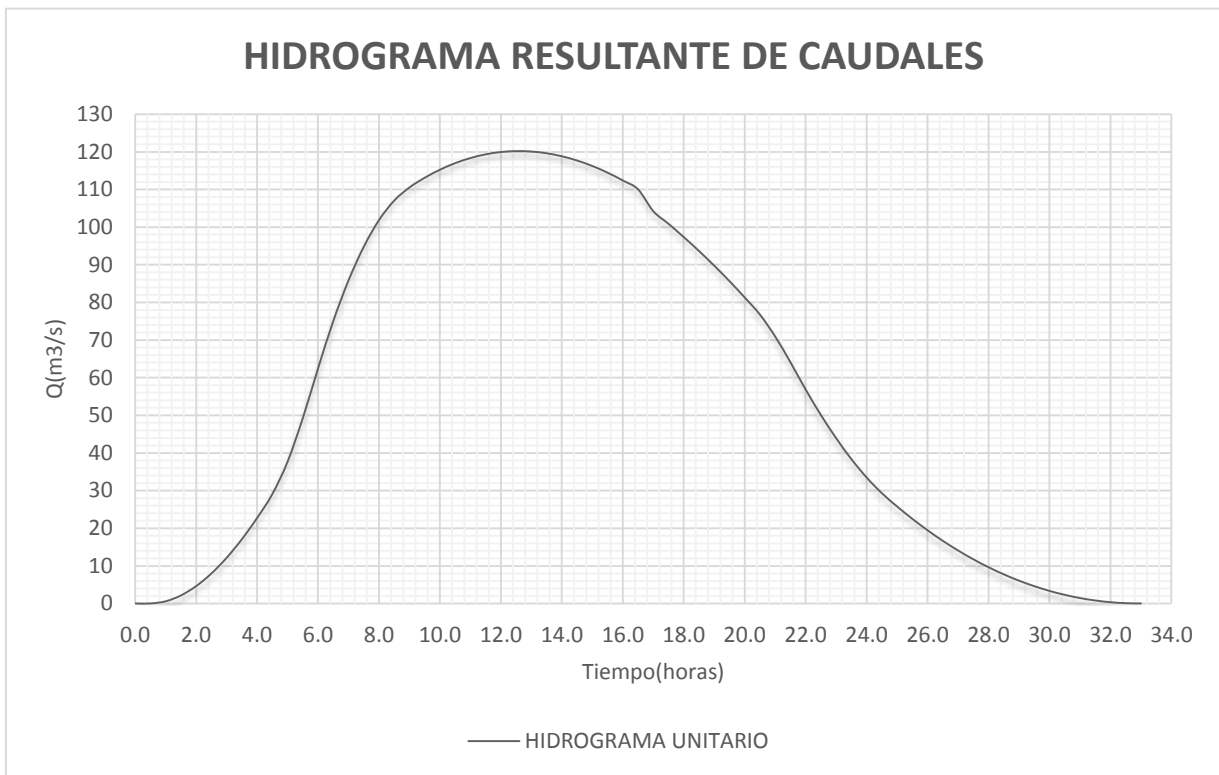


Figura 39. Hidrograma Resultante de caudales de diseño de la cuenca del río Amojú Para un riesgo admisible de 0.25, una vida útil de 40 años y un tiempo de retorno de 140 años, considerando su punto de salida de la cuenca en el punto extremo de la ciudad de Jaén.

El caudal máximo calculado es de 120.17 m³/s, en un intervalo de 12.50 horas, de acuerdo como se indica en la tabla 24; estimado con un riesgo admisible de 0.25; una vida útil de 40 años y un tiempo de retorno de 140 años para la cuenca del río Amojú, considerando su punto de salida de la cuenca en el punto extremo de la ciudad de Jaén.

Según el MTC (2008) «Manual de Carreteras: Hidrología, Hidráulica y Drenaje», indica que el caudal sólido se puede considerar por lo menos dos veces mayor que el caudal líquido; de acuerdo a la determinación de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú, se concluyó que dicha cuenca no es erosionable; debido a esto, se estimó que caudal sólido para la presente investigación es el 25% del caudal líquido calculado; siendo el resultado del caudal total (Q_T) un valor de 150.212m³/s, el cual será utilizado como caudal máximo de diseño para el modelado hidráulico.

3.3.4. MAPA DE USO DE SUELOS DE LA ZONA EN ESTUDIO

El mapa de uso de suelos de la zona en estudio utilizado en el modelado hidráulico para la zonificación de áreas inundables, se generó en base a lo que se muestra en la Ortofoto, y se clasificó en zona urbana, suelo desnudo, río, cultivos y vegetación dispersa.

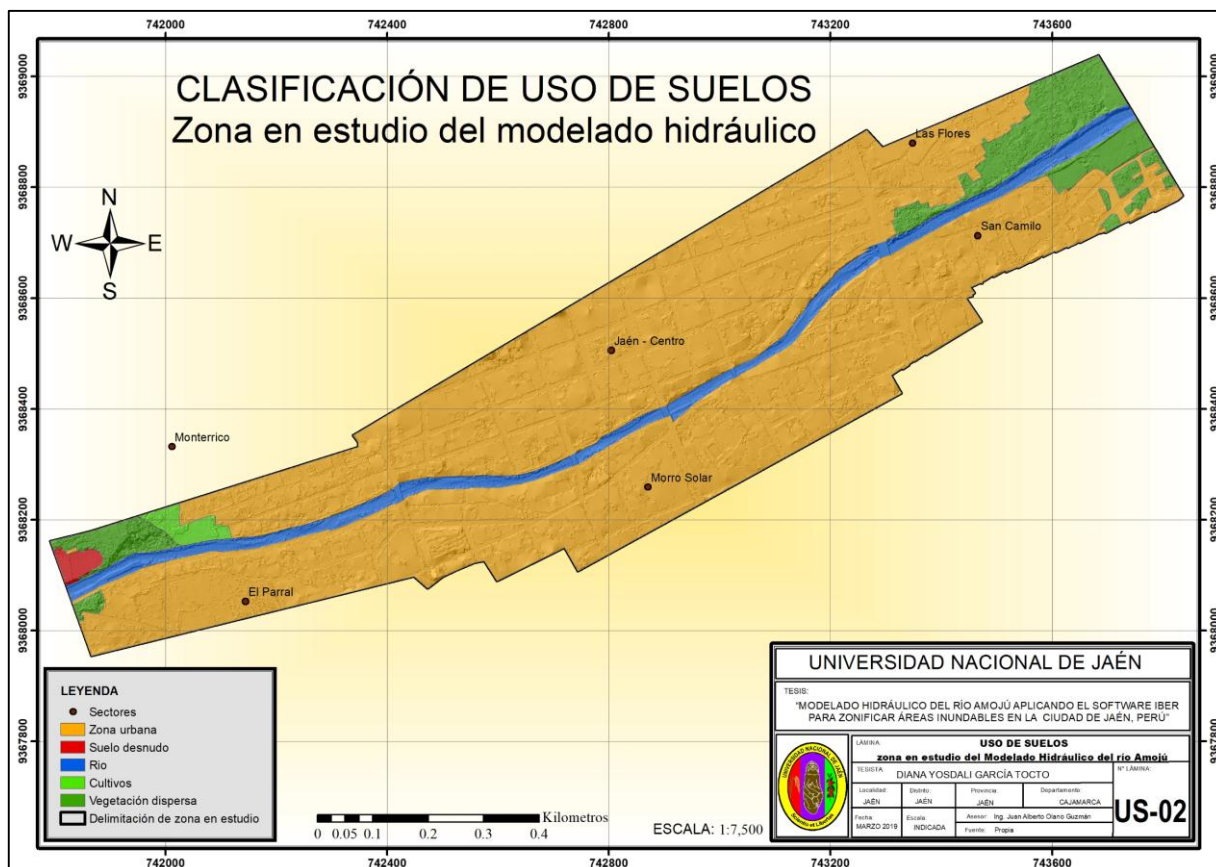


Figura 40. Mapa de uso de suelos de la zona en estudio.

Mapa de uso de suelos de la zona de influencia del estudio hidráulico del río Amojú para zonificar áreas de inundación en la ciudad de Jaén.

Los valores de los coeficientes de rugosidad (n) de las unidades de uso de suelo se asignaron de acuerdo a los valores de Manning, e indicados en Chow (2004), también mediante la metodología según Cowan y los descritos en los manuales de usuario de IBER.

Para los cultivos y vegetación dispersa se utilizaron los valores de Manning (n) de la tabla 7, donde se indican los coeficientes de rugosidad en Chow (2004), para planicies de inundación y corrientes naturales, según las condiciones del área de estudio que se observaron en campo, siendo los valores par cultivos $n=0.030$ y vegetación dispersa $n=0.050$.

Para el suelo desnudo se estimó un valor de $n=0.023$, según lo descrito en los manuales de usuario de IBER (2015). Para el cálculo del valor de Manning para el río, se calculó por la Metodología de Cowan, con los valores de la tabla 6, haciendo uso de la fórmula [26], y la observación en campo, considerando los siguientes criterios para las condiciones del canal:

Material involucrado; que se refiere a la rugosidad superficial del perímetro mojado, en campo se observó que presenta partículas gruesas; por lo que se optó por grava gruesa.

Grado de irregularidad; verificando las secciones de transversales del perímetro mojado de la topografía y la ortofoto, se observa los muros de contención existentes como protección ribereña, siendo unas fronteras lisas; sin embargo, aguas abajo del Puente Pakamuros, a una margen no cuenta con muros de protección ribereña, ocurriendo lo mismo en parte baja del sector San Camilo, y parte alta del Parral, por lo que se consideró un grado menor.

Variaciones de sección transversal en forma y tamaño; verificando las secciones de transversales de la topografía del tramo en estudio, se observa que su sección transversal del río no tiene cambios abruptos, considerándose los cambios gradualmente.

Efecto relativo a las obstrucciones; debido a que en el río no existe presencia de troncos, y los puentes existentes en el tramo en estudio no cuentan con pilares, pero teniendo en cuenta los estribos pronunciados en la sección del río de algunos puentes, se consideró como un efecto menor.

Vegetación; se pudo observar en campo, que la vegetación sumergida en el río es una cantidad despreciable, pero en las riberas del río que no cuentan con protección de Muros de Contención, se observa la presencia de arbustos y matorrales, por lo que se consideró como vegetación media.

Grados de efectos por meandros; con respecto al alineamiento del canal del río, se calculó a la sinuosidad, obteniendo el valor de 0.98 al dividir la longitud del tramo y la longitud en línea recta del río en el tramo de estudio, siendo menor a 1.20; por lo tanto, se consideró que tiene una sinuosidad menor.

De acuerdo al análisis anterior, se presentan los resultados de los valores de Manning para cada condición del canal en la siguiente tabla:

Tabla 25.
Método de Cowan para determinar el número de Manning en el río Amojú

Condiciones del canal	Descripción	Símbolo	Valores
Material involucrado	Grava gruesa	n0	0.028
Grado de irregularidad	Menores	n1	0.005
Variaciones de sección transversal	Ocasionalmente alternamente	n2	0.005
Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	n3	0.010
Vegetación	Media	n4	0.010
Grados de los efectos por meandros	Menor	m5	1.000
Cálculo de $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5$			0.058

Debido a que no se contaba con información detallada del coeficiente de rugosidad para zonas urbanas, se asumieron las condiciones más críticas, que generen obstrucción severa al paso del flujo en caso de una inundación. Por lo que los valores de las condiciones del canal son los más elevados, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 26.
Método de Cowan para determinar el número de Manning en la zona urbana

Condiciones del canal	Descripción	Símbolo	Valores
Material involucrado	Grava gruesa	n0	0.028
Grado de irregularidad	Severo	n1	0.020
Variaciones de sección transversal	Frecuentemente alternante	n2	0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Severo	n3	0.060
Vegetación	Media	n4	0.100
Grados de los efectos por meandros	Menor	m5	1.300
Cálculo de $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \times m_5$			0.290

Después de haber calculado todos los números de Manning para diferente tipo de uso, se presenta la siguiente tabla resumen de todos los resultados obtenidos:

Tabla 27.
Número de Manning para los Usos de suelos

Uso de Suelo	Número de Manning
Cultivos	0.030
Vegetación dispersa	0.050
Suelo desnudo	0.023
Río	0.058
Zonas urbanas	0.290

3.3.5. MODELADO HIDRÁULICO EN IBER

La introducción de datos necesarios para la modelación bidimensional se realiza dentro del mismo programa, antes de cargar los datos espaciales y asignar los datos de flujo, primero se deben configurar los parámetros del sistema de unidades a usar (sistema métrico internacional) y definir nombre del proyecto y la carpeta donde se guardarán los archivos.

3.3.5.1. IMPORTACIÓN DE ORTOFOTO Y MAPA DE USO DE SUELO

La ortofoto del tramo en estudio, se ingresó en formato en formato jpg, debidamente georreferenciada y en tamaño real; la cual permitió tener una mejor visualización del área en el cual se realizó el estudio.

El entorno de preproceso de IBER trabaja directamente con el formato SHP, por lo cual se ha graficado con anterioridad los diferentes usos de suelo mediante el procesamiento de la ortofoto de la zona en estudio, y se definió un atributo que contiene el identificador de las unidades del uso del suelo, siendo importado en formato DXF; además se colapsó la geometría con la finalidad de eliminar líneas duplicadas. Luego se procedió a generar las superficies

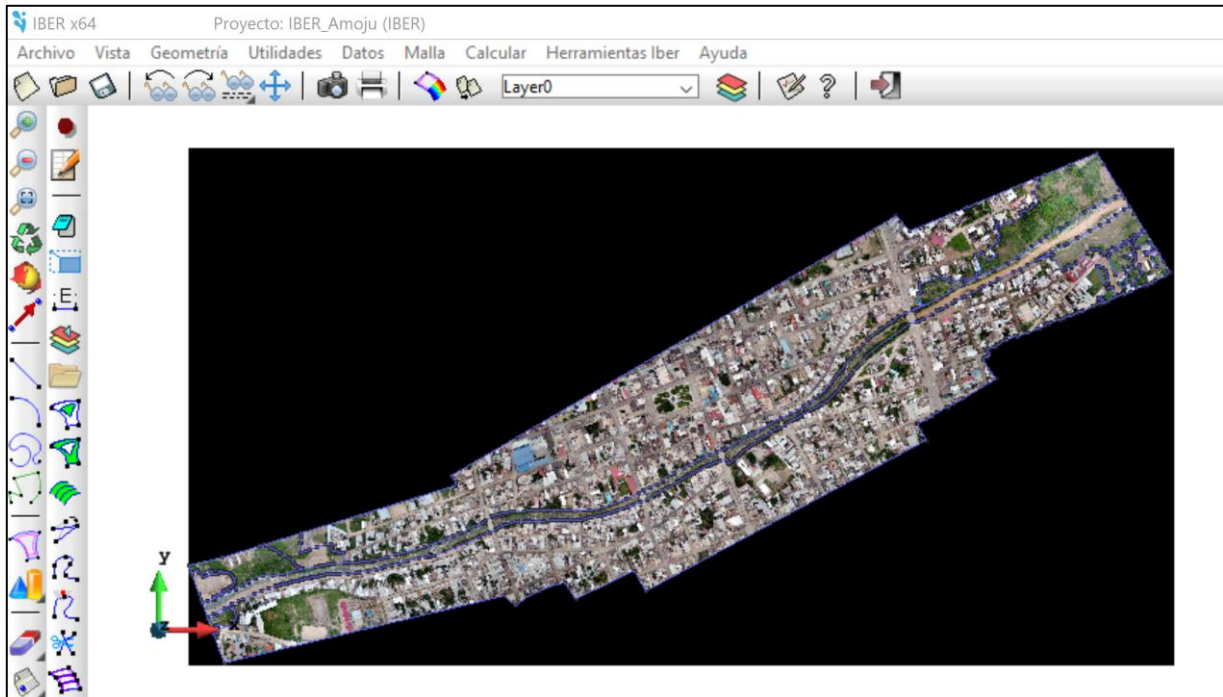


Figura 41. Importación de ortofoto y mapa de uso de suelos en IBER

Se aprecia la delimitación la zona de influencia del estudio hidráulico del río Amojú para zonificar áreas de inundación en la ciudad de Jaén.

3.3.5.2. ASIGNACIÓN DE COEFICIENTES DE RUGOSIDAD (n)

Se procedió a asignar los valores de uso de suelos estimados en la tabla 27, para cada área delimitada en el mapa de uso de suelos que se importó en el IBER, haciendo referencia a cada superficie asignada.

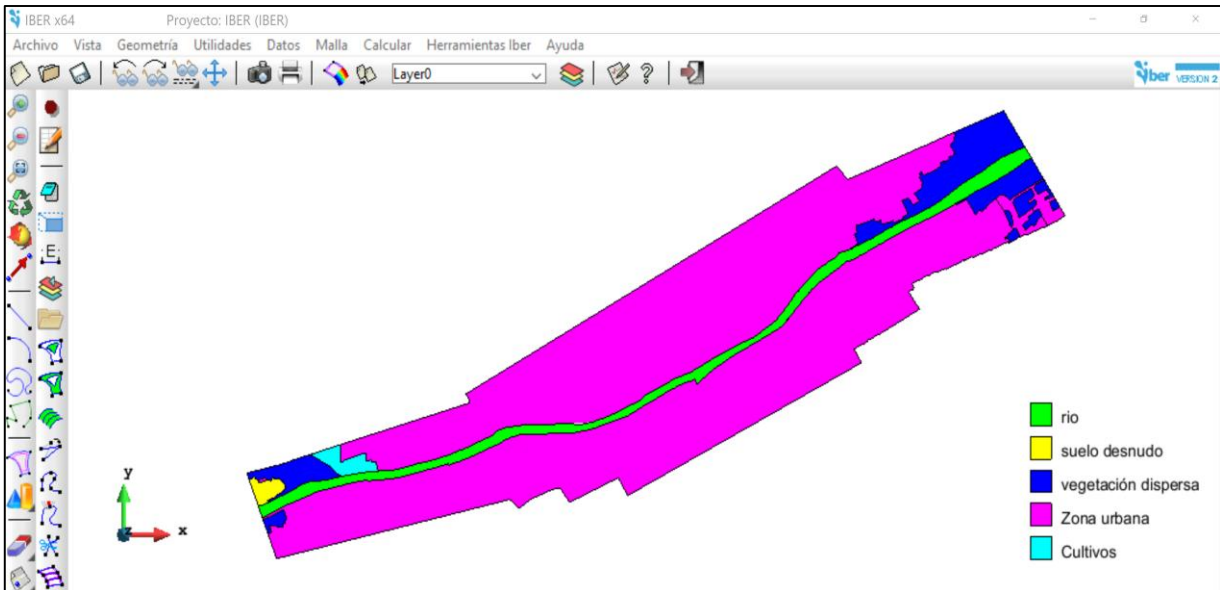


Figura 42. Mapa de uso de suelos generado en IBER

3.3.5.3. ASIGNACIÓN DE CONDICIONES DE CONTORNO Y DATOS DE FLUJO

Se asignaron las condiciones de contorno de ingreso y salida de flujo; para ello en las condiciones de entradas se asignó el caudal total calculado.

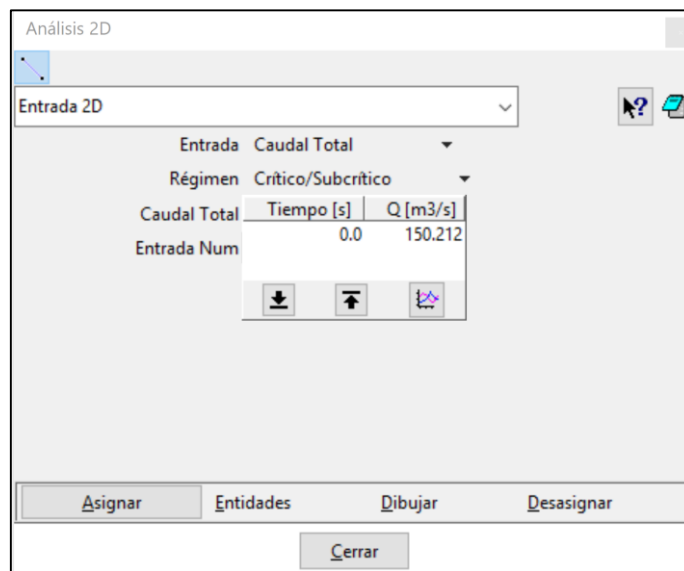


Figura 43. Condiciones hidrodinámicas de contorno

Para las condiciones de ingreso, se debe definir seleccionando el contorno por donde ingresa el flujo de agua dentro del cauce del río, para luego introducir las condiciones de borde de ingreso como son: tipo de régimen de flujo (subcrítico/crítico) y los valores de caudal total. Para la condición de salida de flujo se asignan al igual que las condiciones de ingreso, en este se introduce solo el tipo de régimen de flujo asumiéndose para este caso un régimen de flujo de salida supercrítico/crítico.

3.3.5.4. GENERACIÓN DE LA MALLA

Se definió el tamaño de la celda que se utilizó en la modelación, para este caso se consideró asignar un tipo de malla no estructurada, ya que este se adecua mejor a las irregularidades que presenta los tramos del cauce del río; considerando el tamaño de celda de 1 metro para el cauce del río y una malla de 3 metros para la zona urbana y 6 metros para el resto de la superficie; este criterio se tomó debido a que una malla más fina permite tener mejores detalles en los resultados.

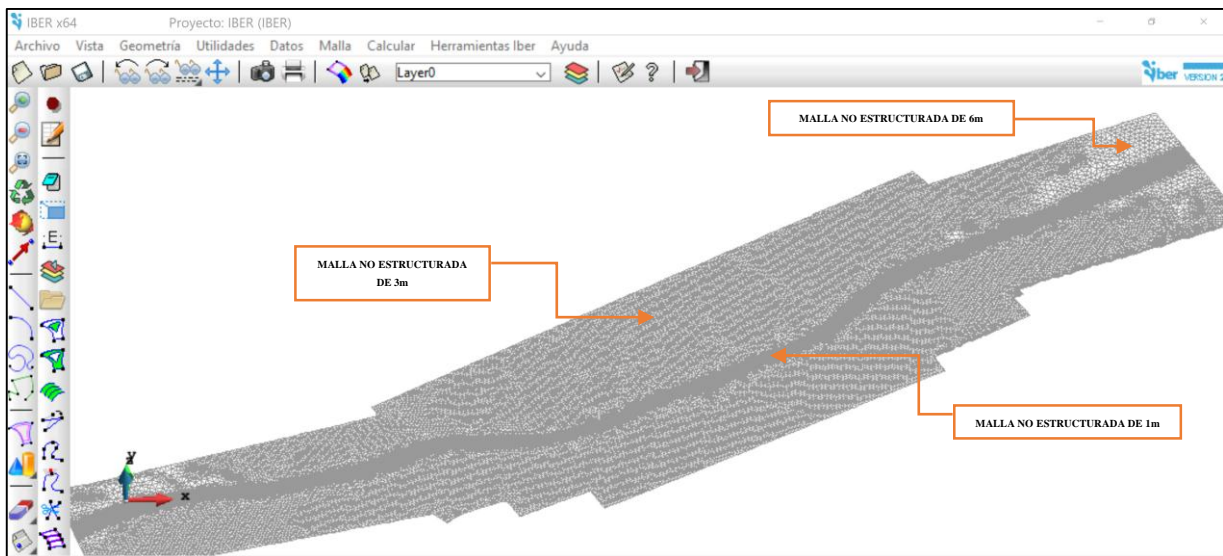


Figura 44. Malla no estructurada de la zona en estudio
Generada 1m para el río, 3m para la zona urbana y 6m para el resto de la superficie (cultivos, suelo desnudo y vegetación dispersa).

3.3.5.5. ASIGNACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

El Modelo Digital de Terreno (DEM) fue convertido en ArcGIS de un formato TIFF a un archivo ASCII, y fue importado a IBER porque la malla generada requiere tener datos de elevación.

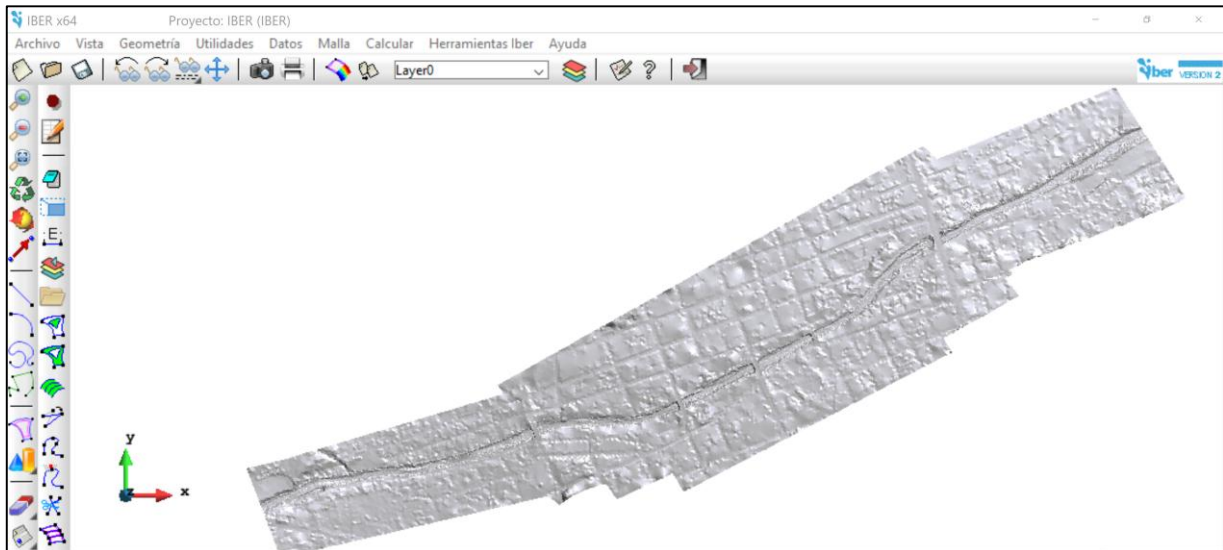


Figura 45. Elevación generada de malla no estructurada en IBER.

3.3.5.6. CORRIDA DEL MODELO 2D

Una vez introducido todos los datos para la modelación se procede a modelar, considerando como el instante inicial (0 segundos), tiempo máximo de simulación (1600 segundos) y el intervalo de reporte de resultados que se desea (cada 20 segundos); todos estos datos en función a la duración de los hidrogramas de entrada. El número de procesadores para el análisis 2D (4 procesadores), número de Courant-Friedrichs-L Levy para conseguir un esquema numérico estable ($CFL=0.45$) y el limite seco mojado (0.01m).

Información de salida para "current" Mon Apr 08 14:08:34

Simulation time	Time step	Time	Qin	Qout
0.000	1.00000	13:08:56:85	0.000	0.000
20.024	0.02679	13:09:12:87	150.212	0.000
40.003	0.02595	13:09:30:28	150.212	0.000
60.022	0.02592	13:09:50:72	150.212	0.000
80.011	0.02525	13:10:10:22	150.212	0.000
100.007	0.02479	13:10:30:81	150.212	0.000
120.009	0.02475	13:10:52:12	150.212	0.000
140.017	0.02433	13:11:13:99	150.212	0.000
160.022	0.02380	13:11:37:30	150.212	0.000
180.005	0.02353	13:12:02:97	150.212	0.000
200.023	0.02347	13:12:29:12	150.212	0.000
220.004	0.02344	13:12:55:76	150.212	0.000
240.021	0.02343	13:13:23:35	150.212	0.000
260.008	0.02343	13:13:50:74	150.212	0.000
280.016	0.02342	13:14:19:87	150.212	0.000
300.016	0.02347	13:14:49:15	150.212	0.000
320.008	0.02345	13:15:20:05	150.212	0.000
340.022	0.02342	13:15:51:02	150.212	0.000
360.018	0.02342	13:16:23:57	150.212	0.000
380.021	0.02342	13:16:56:03	150.212	0.000
400.001	0.02342	13:17:29:39	150.212	0.000

Cerrar

Figura 46. Procesamiento del modelo

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la modelación hidráulica bidimensional del río Amojú. Dicha modelación comprende los Sectores EL Parral, Jaén – centro y San Camilo, abarcando 05 puentes, áreas de las viviendas localizadas en los márgenes del río y las zonas agrícolas.

4.1. ANÁLISIS DEL PERFIL DEL RÍO

4.1.1. PERFIL HIDRÁULICO

Se generó el perfil hidráulico del río Amojú del tramo en estudio mediante el uso del modelo matemático de IBER, para ello se exportó ráster de las cotas de agua del software IBER en formato txt, para generar los puntos del perfil hidráulico el ArcGIS.

En el perfil hidráulico se visualiza la variación del calado del agua a lo largo de su recorrido en un perfil longitudinal e hidráulico que tiene una longitud de 2.150 kilómetros, desde la progresiva 0+000 hasta la progresiva 2+150 como se indica en la figura.

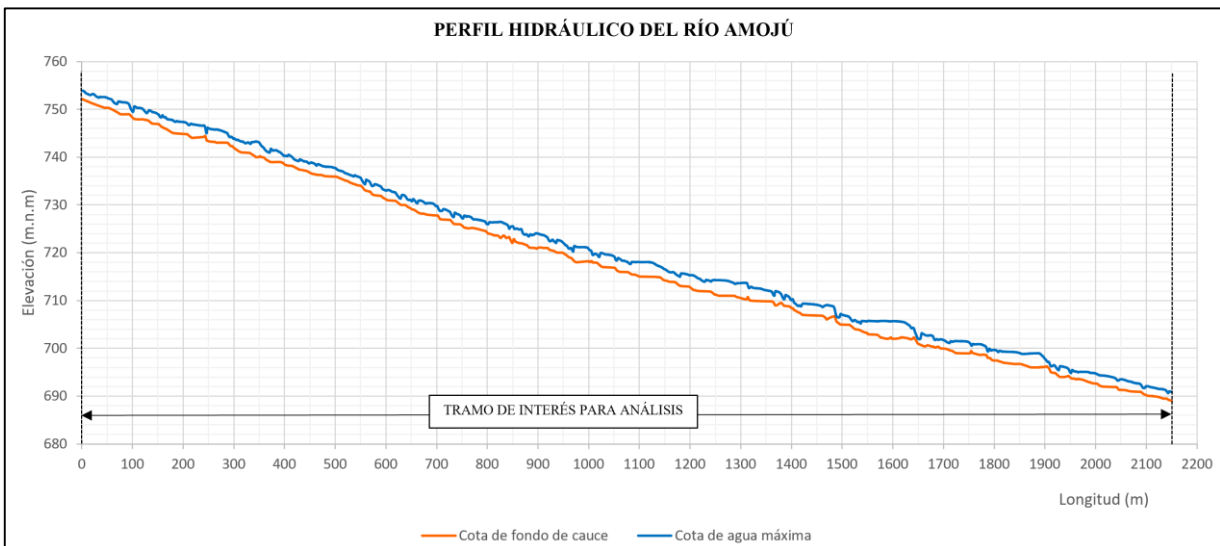


Figura 47. Perfil hidráulico del río Amojú del tramo de estudio

Valores obtenidos en el segundo 1600 de simulación.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. SECCIONES TRANSVERSALES

Se generaron 107 secciones transversales con un ancho de 30 metros a cada lado del eje del alineamiento, desde la progresiva 0+020 hasta la progresiva 2+140, incluyendo los niveles máximos de agua obtenidas del modelamiento hidráulico en IBER en el paso 1600 de la simulación, siendo de ayuda para identificar los puntos críticos de desborde.

4.1.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Se obtuvieron los tirantes máximos del flujo, velocidad máxima y número de froude para cada sección a 1600 segundos de la simulación del modelo en IBER, tomando el tramo en análisis la secciones a partir de la progresiva 0+020 hasta la progresiva 2+140, debido que la progresiva 0+000 y 2+150 están influenciados por las condiciones de contorno de entrada y salida.

Tabla 28.
Parámetros hidráulicos de la progresiva 0+20 a 2+140 del río Amojú

Progresiva	Tirante Máximo	Velocidad Máxima	Número de Froude	Progresiva	Tirante Máximo	Velocidad Máxima	Número de Froude
0 + 020.00	1.893	5.440	1.290	0 + 520.00	1.826	5.185	1.491
0 + 040.00	2.126	4.975	1.093	0 + 540.00	2.150	4.401	1.211
0 + 060.00	2.040	4.793	1.228	0 + 560.00	1.920	5.393	1.421
0 + 080.00	2.529	5.334	0.910	0 + 580.00	2.404	4.519	1.410
0 + 100.00	2.041	6.342	1.820	0 + 600.00	2.187	5.785	1.898
0 + 120.00	2.273	4.736	1.596	0 + 620.00	1.804	5.680	1.588
0 + 140.00	2.460	4.648	1.548	0 + 640.00	1.837	4.893	1.339
0 + 160.00	2.762	5.162	1.318	0 + 660.00	1.863	5.373	1.286
0 + 180.00	2.657	5.398	2.038	0 + 680.00	2.590	4.789	1.488
0 + 200.00	2.515	4.947	0.970	0 + 700.00	2.100	5.442	1.257
0 + 220.00	2.810	5.019	1.467	0 + 720.00	2.050	5.355	1.450
0 + 240.00	2.480	4.374	0.892	0 + 740.00	2.258	4.526	1.010
0 + 260.00	2.770	4.737	0.982	0 + 760.00	2.537	5.005	0.890
0 + 280.00	2.363	4.710	1.140	0 + 780.00	2.020	4.621	1.067
0 + 300.00	2.475	6.362	1.756	0 + 800.00	1.952	5.609	1.390
0 + 320.00	2.139	5.645	1.231	0 + 820.00	3.465	4.760	0.630
0 + 340.00	2.984	4.833	0.778	0 + 840.00	3.659	5.298	2.198
0 + 360.00	2.005	6.080	2.190	0 + 860.00	3.183	5.160	0.930
0 + 380.00	2.470	5.048	1.030	0 + 880.00	3.025	6.118	1.308
0 + 400.00	2.363	5.868	1.410	0 + 900.00	3.770	4.259	0.790
0 + 420.00	2.445	5.729	1.460	0 + 920.00	2.080	5.412	1.243
0 + 440.00	2.826	5.299	1.130	0 + 940.00	2.612	4.474	1.494
0 + 460.00	2.704	5.067	1.241	0 + 960.00	2.369	6.213	2.120
0 + 480.00	2.141	4.893	1.219	0 + 980.00	3.140	5.100	0.800
0 + 500.00	1.860	4.240	1.008	1 + 000.00	3.033	4.508	1.044

Continuación

Progresiva	Tirante Máximo	Velocidad Máxima	Número de Froude	Progresiva	Tirante Máximo	Velocidad Máxima	Número de Froude
1 + 020.00	2.213	5.974	1.526	1 + 600.00	3.710	4.553	0.400
1 + 040.00	2.690	4.405	0.857	1 + 620.00	3.891	4.228	0.480
1 + 060.00	2.845	4.662	1.634	1 + 640.00	2.710	4.870	2.256
1 + 080.00	2.039	5.470	1.582	1 + 660.00	2.545	4.899	1.545
1 + 100.00	3.100	4.464	0.926	1 + 680.00	2.554	4.707	1.672
1 + 120.00	3.058	3.958	0.600	1 + 700.00	1.822	4.812	1.473
1 + 140.00	2.370	4.707	1.136	1 + 720.00	2.434	4.478	0.780
1 + 160.00	2.022	5.560	1.385	1 + 740.00	2.537	3.347	0.675
1 + 180.00	1.882	5.630	1.370	1 + 760.00	2.657	3.960	0.830
1 + 200.00	2.703	4.642	0.860	1 + 780.00	2.200	4.500	1.000
1 + 220.00	2.519	5.088	1.473	1 + 800.00	2.429	5.610	1.379
1 + 240.00	2.359	4.982	1.045	1 + 820.00	2.480	4.070	0.840
1 + 260.00	3.260	4.180	0.630	1 + 840.00	2.500	3.510	0.710
1 + 280.00	2.920	3.956	1.269	1 + 860.00	2.651	4.900	1.010
1 + 300.00	3.610	4.760	0.695	1 + 880.00	2.960	3.300	0.510
1 + 320.00	2.960	5.263	0.930	1 + 900.00	1.715	5.310	2.017
1 + 340.00	2.600	4.890	0.990	1 + 920.00	1.592	5.306	1.976
1 + 360.00	2.140	4.837	1.120	1 + 940.00	2.034	3.820	2.186
1 + 380.00	2.479	4.771	1.207	1 + 960.00	2.050	5.006	1.099
1 + 400.00	2.010	5.728	1.550	1 + 980.00	3.075	3.858	0.680
1 + 420.00	2.352	5.750	1.608	2 + 000.00	2.670	3.673	0.772
1 + 440.00	2.340	3.600	0.750	2 + 020.00	2.321	3.960	0.830
1 + 460.00	1.907	4.081	0.956	2 + 040.00	1.920	4.619	1.138
1 + 480.00	2.918	3.139	0.652	2 + 060.00	2.318	4.130	1.316
1 + 500.00	2.337	5.395	1.060	2 + 080.00	1.860	4.330	1.066
1 + 520.00	1.743	5.751	1.650	2 + 100.00	2.070	4.500	1.414
1 + 540.00	2.190	4.885	0.801	2 + 120.00	1.932	3.902	0.937
1 + 560.00	2.860	3.846	0.570	2 + 140.00	2.066	4.247	1.804
1 + 580.00	3.710	3.030	0.440				

De la modelación hidráulica con IBER, en un instante de 1600 segundos de la simulación, se exportó en los ráster con un tamaño de celda de 0.5 pixel, con el cual se seccionaron y se generaron los valores de la tabla en ArcGIS.

Los resultados de cada parámetro hidráulico serán analizados con detalle por separado en los títulos siguientes de la investigación, los mapas del seccionamiento de ráster exportados para la obtención de dichos resultados se encuentran en los anexos.

4.1.4. TIRANTES MÁXIMOS DEL FLUJO

Los valores máximos de tirantes del flujo obtenidos como resultado del ráster exportado de IBER para 1600 segundos de la simulación, permitieron realizar el siguiente mapa en ArcGIS para el análisis de los calados del tramo en estudio.

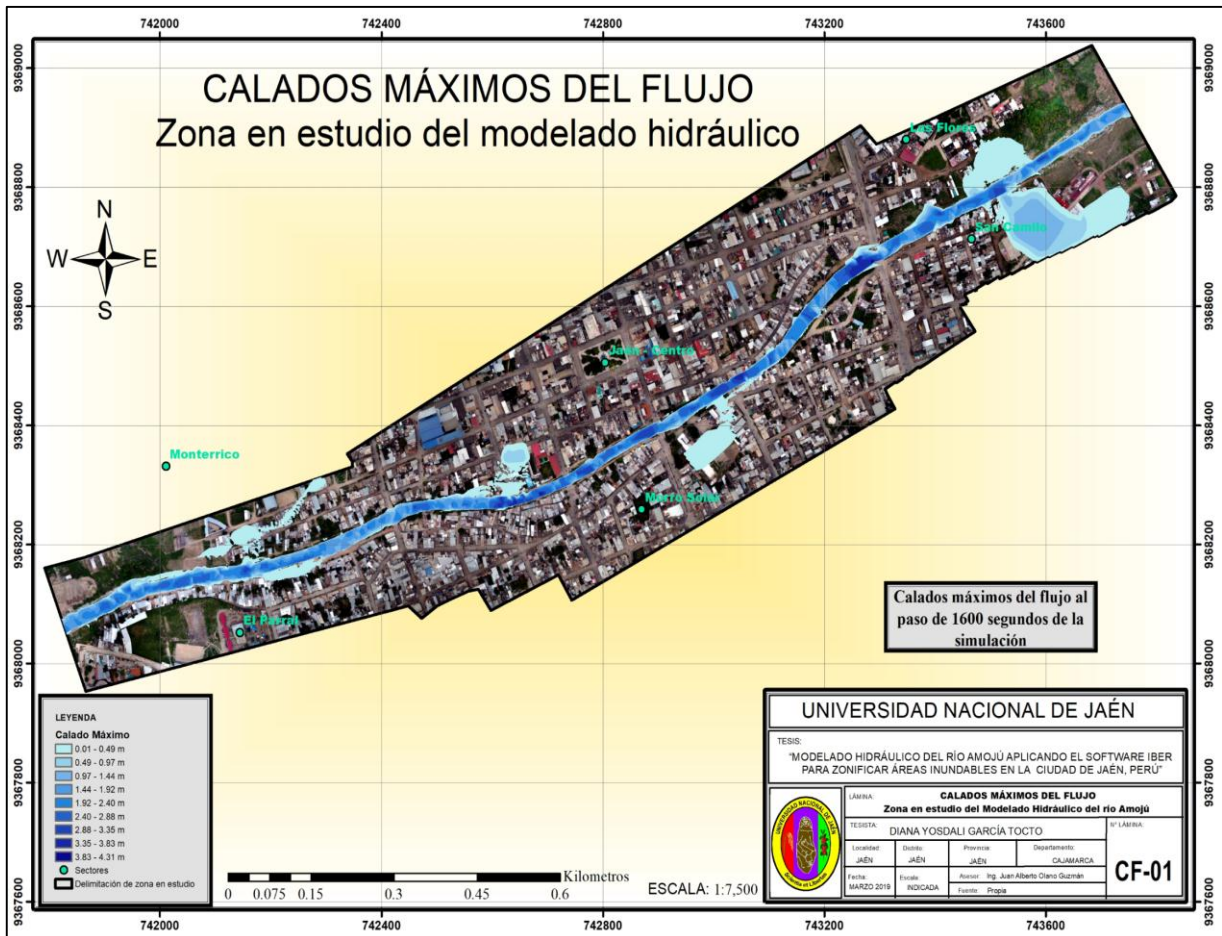


Figura 48. Profundidades del río Amojú del tramo de estudio Generado a partir del ráster en el segundo 1600 de simulación.

Se observa que los tirantes máximos se encuentran a la altura de los puentes, también donde el río muestra pequeñas curvaturas y en otros puntos donde las secciones del río son más angostas y los tirantes mínimos están en las inundaciones.

Para realizar un análisis más a detalle se seccionó cada 20m a lo largo del tramo de estudio en ArcGIS, extrayendo los valores presentado en la tabla 28 de parámetros hidráulicos, con el cual se realizó el siguiente gráfico.

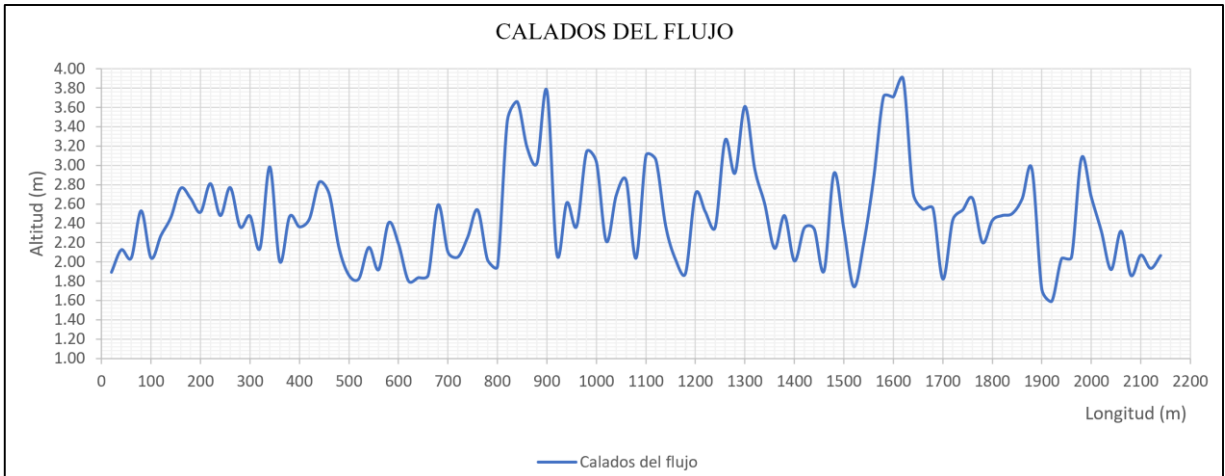


Figura 49. Valores de calados del flujo

Dichos valores fueron generados a partir del seccionamiento del río Amojú del tramo de estudio, a 1600 segundos de simulación.

Fuente: Elaboración propia

Se observa calados con valores de 3.60m a 3.80m entre las progresivas 0+840 y 0+900, debido que aquí se produce una inundación, tramo ubicado aguas arriba del puente Pardo Miguel; en la progresiva 1+300 a la altura del puente Manco Cápac, también se produce un calado de 3.61m debido que en este punto la sección es más angosta; y el calado máximo generado del seccionamiento es de 3.89 metros, ubicado en la progresiva 1+620.00 altura del puente Pakamuros, este aumento del tirante se debe que aquí existe un estrechamiento de la sección por los estribos del puente.

4.1.5. VELOCIDADES DEL FLUJO

Los valores máximos de velocidades del flujo obtenidos como resultado del ráster exportado de IBER para 1600 segundos de la simulación, permitieron realizar el siguiente mapa en ArcGIS para el análisis de las variaciones de velocidades del tramo en estudio.

Se observa que el curso del flujo en este tramo en estudio cuenta con frecuencia velocidades altas, siendo la velocidad máxima 7.28m/s y la velocidad promedio 4.82 m/s; esto se debe a la sección del río generada con los muros de encausamiento.

Las velocidades máximas se encuentran a la altura de los puentes, también donde el río muestra pequeñas curvaturas y en otros puntos donde las secciones del río son más angostas y las velocidades mínimas están en las inundaciones.

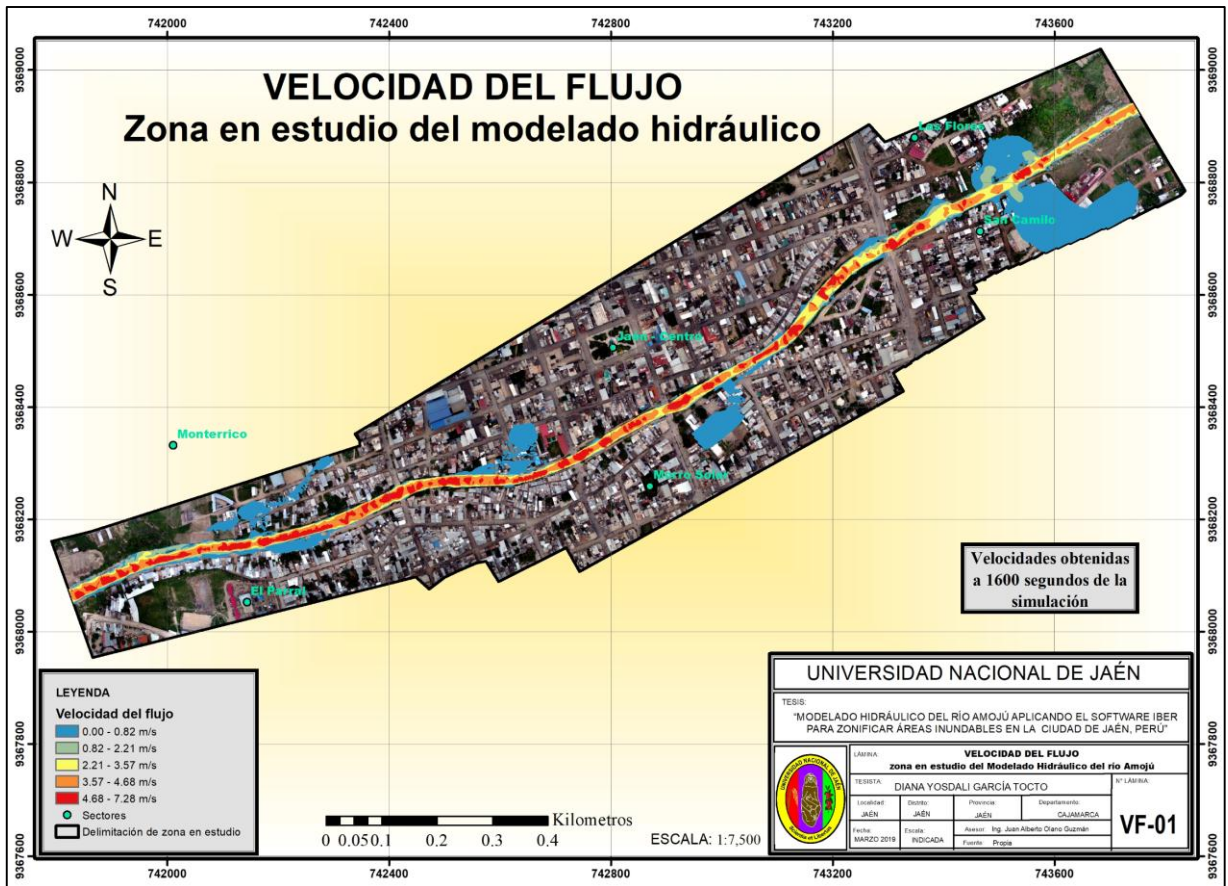


Figura 50. Velocidades del río Amojú del tramo de estudio Generado a partir del ráster en el segundo 1600 de simulación.

Para realizar un análisis más a detalle se seccionó cada 20m a lo largo del tramo de estudio en ArcGIS, extrayendo los valores presentado en la tabla 28 de parámetros hidráulicos, con el cual se realizó el siguiente gráfico.

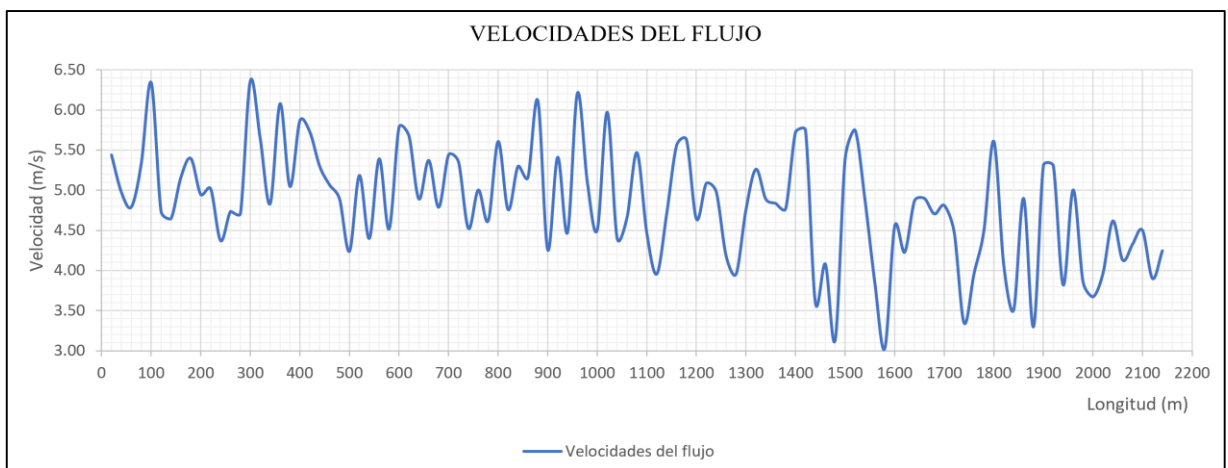


Figura 51. Velocidades del flujo Valores extraídos del seccionamiento del río Amojú del tramo de estudio, a 1600 segundos de simulación.

Se observa que las velocidades se mantienen en una variación constante debido al ancho reducido por la presencia de muros de encauzamiento que producen variaciones de la sección u otras obstrucciones y las profundidades de los tirantes.

Además, se observa que hay un cambio de velocidad que varía de 5.75m/s a 3.60m/s, que va desde la progresiva 1+420 a 1+440, ubicado aguas arriba del puente Pakamuros y aguas debajo del puente Manco Cápac, esto se debe que la sección en el Puente Manco Cápac tiene una sección bien angosta y luego se observa en la ortofoto un aumento considerable de la sección del río, produciendo la disminución de la velocidad del flujo, ocurriendo el mismo caso en la variación de la velocidad de 5.75m/s a 3.03m/s entre las secciones 1+520 y 1+580, debido a la presencia de obstrucciones en el cauce. También en la sección de la progresiva 1+740, la velocidad es 3.347m/s, siendo un valor bajo por la presencia de inundación y un calado alto.

4.1.6. RÉGIMEN DE FLUJO

Los valores máximos de velocidades del flujo obtenidos como resultado del ráster exportado de IBER para 1600 segundos de la simulación, permitieron realizar el siguiente mapa en ArcGIS para el análisis de las variaciones de velocidades del tramo en estudio.

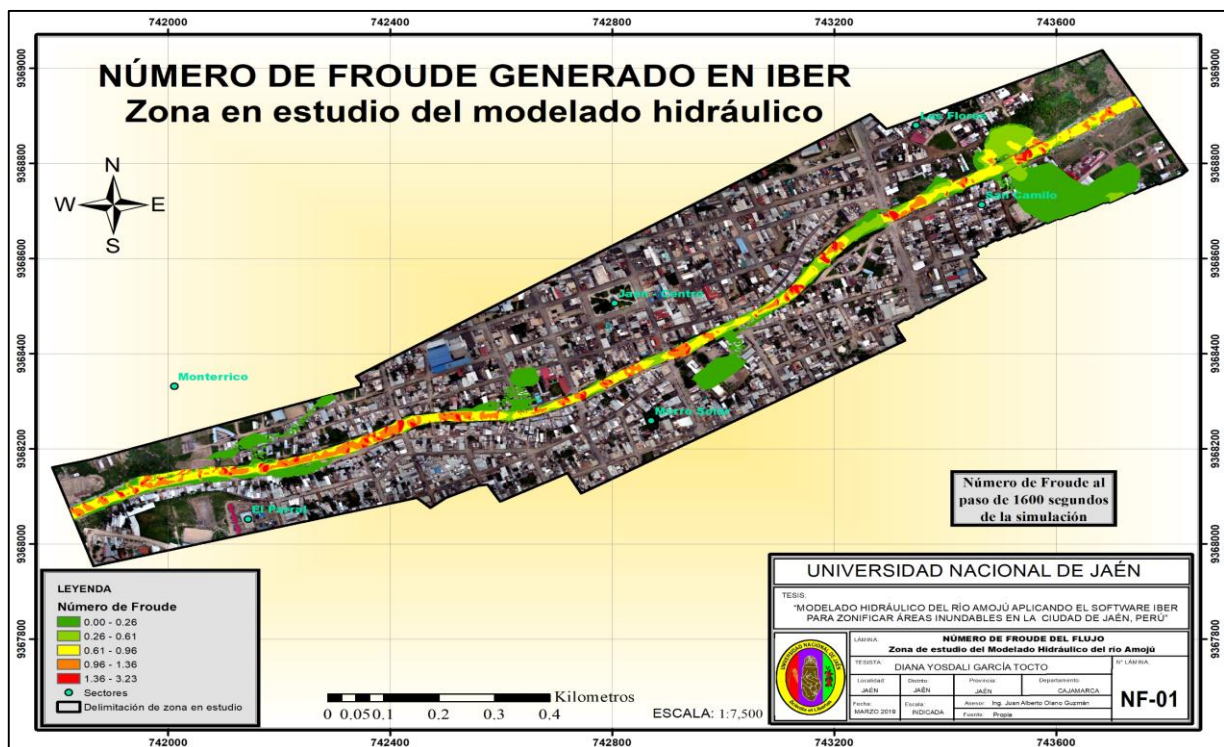


Figura 52. Números de Froude del flujo del río Ajojú del tramo de estudio Generado a partir del ráster en el segundo 1600 de simulación.

Se observa que los valores se mantienen se mantienen una tendencia creciente hasta llegar a la zona de desborde, también se observan que los mayores valores del número de froude se encuentran en las secciones estrechas como los puentes y otras, donde se notan variaciones del régimen del flujo.

Los puntos más altos indican que se han producido cambios de régimen en el flujo debido a la presencia de obstrucciones en el cauce o cambios de la sección del cauce, a una sección más angosta o estrechamientos en los puentes. Para realizar un análisis más a detalle se seccionó cada 20m a lo largo del tramo de estudio en ArcGIS, extrayendo los valores presentado en la tabla 28 de parámetros hidráulicos, con el cual se realizó el siguiente gráfico.

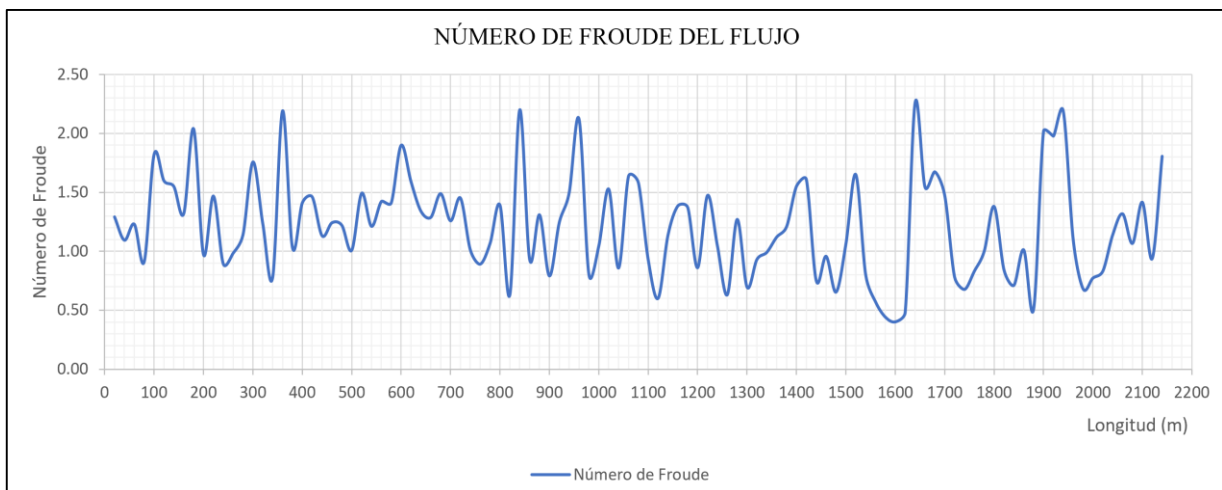


Figura 53. Número de froude del flujo

Valores extraídos del seccionamiento del río Amojú del tramo de estudio, a 1600 segundos de simulación.

De la sección de la 0+800 a la progresiva 0+820 el número de froude disminuye de 1.39 a 0.63, debido que en la progresiva 0+820 se produce inundación; y luego en la progresiva 0+840 vuelve a ascender el valor de Froude a 2.198, debido a la reducción de sección, generando un cambio de régimen de flujo de subcrítico a supercrítico.

De la progresiva 0+900 a 0+960, ubicado en el Puente Pardo Miguel el número de froude aumenta de 0.790 a 2.120, produciendo un cambio de régimen por la variación de la sección producto del estrechamiento por los estribos del puente, ocurriendo el mismo caso entre las progresivas 1+620 y 1+640, donde se ubica el puente Pakamuros, que el valor del número de froude varía de 0.480 a 2.256, produciendo un cambio de régimen del flujo.

4.2. CALIBRACIÓN DEL CAUDAL MÁXIMO

El caudal máximo fue calibrado con la huella máxima, para ello se realizó una visita a campo, donde se observó y midió la altura dejada por la huella del agua dejada por la máxima avenida, siendo la sección de calibración ubicada en la progresiva 0+960.00, a 2 metros aguas abajo del puente Pardo Miguel.



Figura 54. Medición en campo de la huella de agua de la máxima avenida.

La altura del tirante máximo ubicado en la sección 0+960, a 5.50m del eje del río es de 2.37m, como indica en la tabla 28 de parámetros hidráulicos, se comparó con la altura medida en campo es de 2.34m; resultando una diferencia aceptable de 0.03 metros.

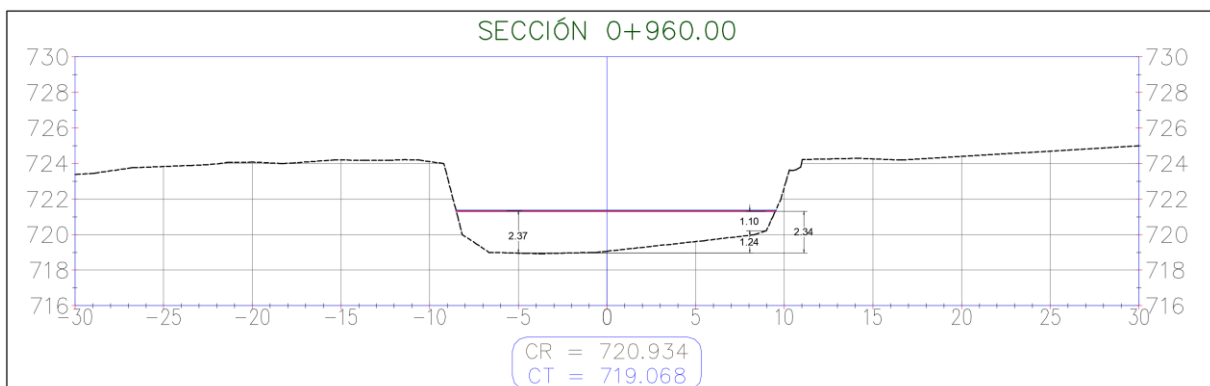


Figura 55. Comparativo de las medidas en campo y tirante del flujo en la sección de la progresiva 0+960.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE INUNDACIÓN

Para la obtención de los mapas de inundación se eligió a 1600 segundos de simulación para el modelo bidimensional para un tiempo de retorno 140 años, en donde se calculó el valor de las áreas afectadas a partir del ráster exportado de la modelación hidráulica en IBER, y calculadas en ArcGIS; siendo el área total inundada de 4.76 hectáreas, como se aprecia en el siguiente mapa de inundaciones.

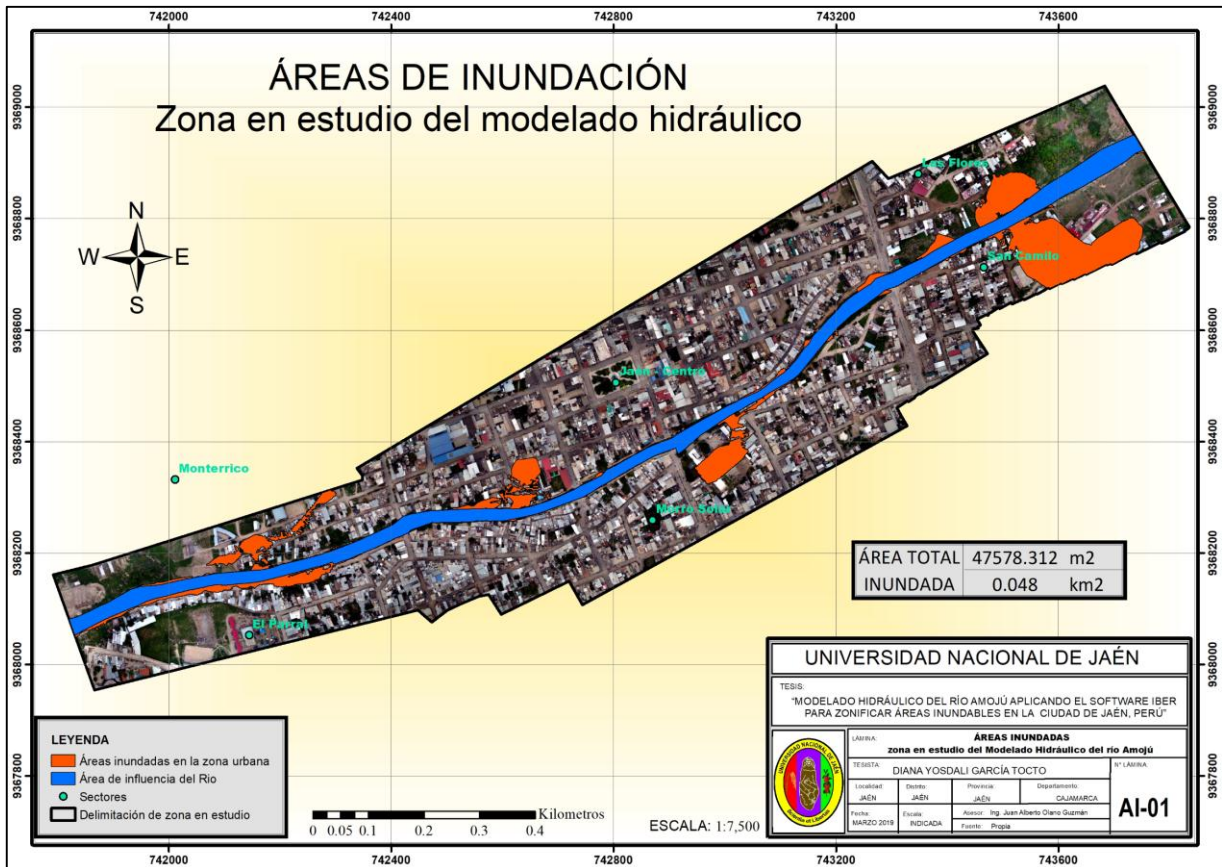


Figura 56. Áreas de inundación del río Amojú del tramo de estudio Generado a partir del ráster en el segundo 1600 de simulación.

A partir de estos resultados se identificaron las áreas inundadas, procediendo a zonificarlas por tramos, aguas arriba del Puente Orellana zona 01, entre el puente Orellana y puente Pardo Miguel es la zona 2, entre el puente Pardo Miguel y el puente Mesones Muro es la zona 3, entre el puente Mesones Muro y Manco Cápac es la zona 4, entre el puente Manco Cápac y el puente Pakamuros la zona 5 y la última zona aguas abajo del puente Pakamuros; siendo en total 06 zonas identificadas y analizada en cada margen del río, como se muestran a continuación en la siguiente figura.

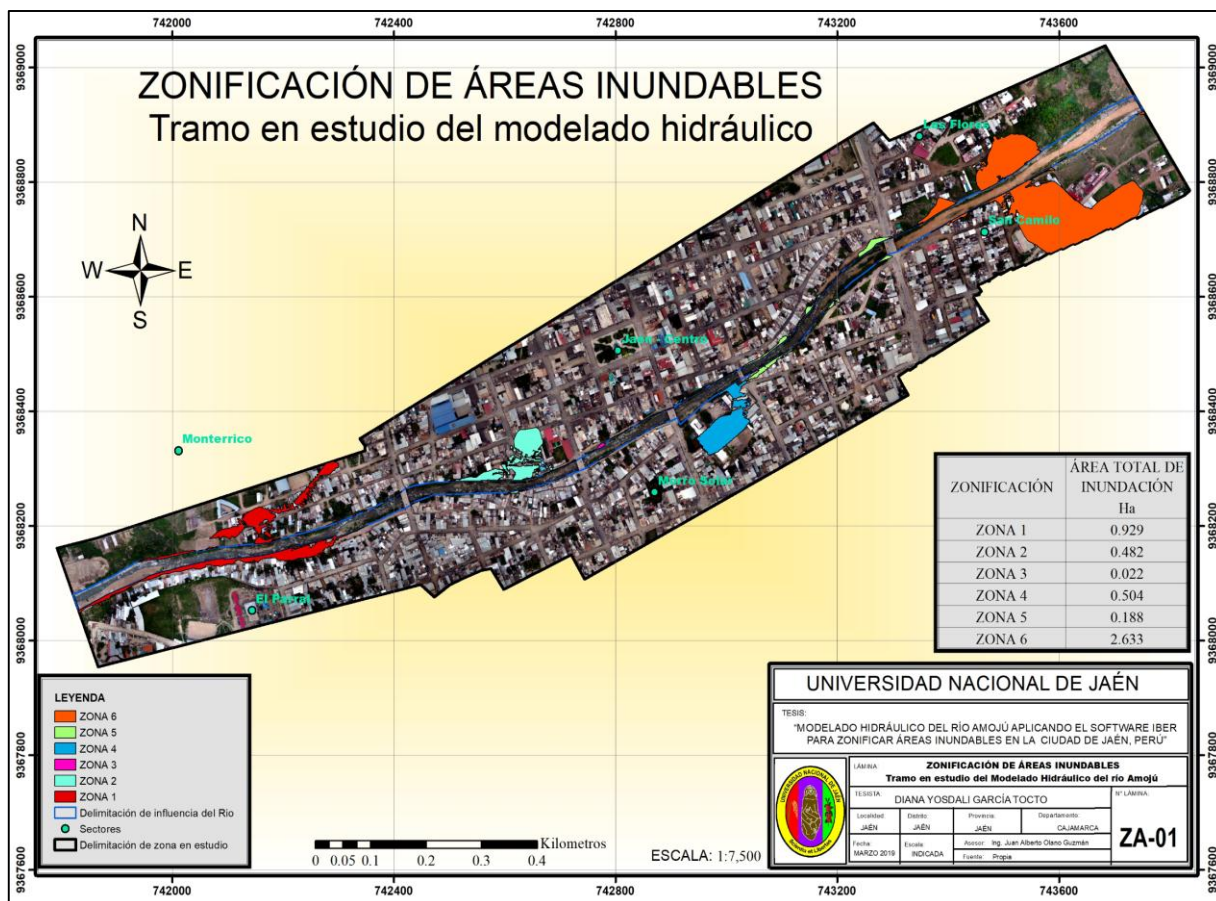


Figura 57. Zonificación de áreas de inundación del río Amojú del tramo de estudio

A partir de esta zonificación se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 29.
Áreas inundables generadas a lo largo de los márgenes del río

ZONIFICACIÓN	MARGEN IZQUIERDA	MARGEN DERECHA	ÁREA TOTAL DE INUNDACIÓN M2	ÁREA TOTAL DE INUNDACIÓN Ha
	M2	M2		
ZONA 1	4778.950	4507.901	9286.851	0.929
ZONA 2	4736.128	79.837	4815.965	0.482
ZONA 3	184.243	35.539	219.783	0.022
ZONA 4	88.024	4950.442	5038.466	0.504
ZONA 5	1088.654	794.058	1882.711	0.188
ZONA 6	7134.551	19199.989	26334.540	2.633

Se observa que la mayor área de inundación se encuentra en la zona 6 – Margen derecha que corresponde al sector San Camilo.

V. CONCLUSIONES

- De los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Amojú, la cuenca cuenta con un área de 156.64km^2 , con un índice de compacidad de 1.387, clasificándose como Oval Oblonga; es decir, no se encuentra ni muy alargada, ni muy redonda; por lo tanto, la inundación no es muy instantánea; además cuenta con un coeficiente orográfico de 0.022, indicando que es una cuenca no erosionable y con una relación de confluencias de 1.791, indicando escorrentía directa media.
- De las intensidades procesadas, se estimaron las precipitaciones efectivas utilizando el método SCS de abstracciones, las mismas que alcanzaron un valor máximo de 1.15mm. Para ello, se generó el mapa de tipo de suelo de la cuenca, la que nos permitió determinar que 128.471km^2 corresponde a suelos poco profundos, depositados por el viento (marga arenosa) y 28.169 km^2 corresponde a arenas profundas. Por otro lado, se generó el mapa de uso de suelos cuyas clasificaciones resaltantes corresponden: 91.756 km^2 pastizales, 52.110 km^2 bosques con cubierta buena y 8.541km^2 bosques con cubierta pobre. A partir de ello se calculó el valor del número de curva, cuyo resultado fue 82.635 para condiciones húmedas.
- El caudal líquido máximo calculado por el método de Snyder es de $120.17\text{ m}^3/\text{s}$, para un periodo de retorno $T=140$ años, determinado en función a una vida útil de $n=40$ años y riesgo admisible de $R=0.25$ para puentes y defensas ribereñas. Además, se estimó el caudal sólido como el 25% del caudal líquido máximo, resultando un caudal máximo total de $150.212\text{m}^3/\text{s}$, valor calibrado con la huella del agua de la máxima avenida.

- Del modelo digital de elevación del terreno, y la sección del cauce del río en la zona del modelado hidráulico, se determinó una cota mínima de 688.79 m.s.n.m. y una cota máxima es de 752.18 m.s.n.m., la pendiente promedio del perfil del cauce fue 2.9%, con una topografía poco accidentada, con secciones del cauce angostas y delimitadas por los muros de encauzamiento, los que generan velocidades altas e inundaciones en algunos tramos.
- Respecto a la modelación hidráulica del tramo en estudio, las zonas con mayores áreas de inundación para un tiempo de retorno de 140 años y un riesgo admisible de 0.25, se encuentran en la zona 1 con 0.929 hectáreas inundables; zonas 2, con 0.482 hectáreas inundables; zona 5, con 0.504 hectáreas inundables; y la mayor área de inundación se encuentra en la zona 6 – Margen derecha que corresponde al sector San Camilo con un área de inundación de 2.633 hectáreas.

VI. RECOMENDACIONES

- De acuerdo a los resultados de esta investigación, se recomienda a la municipalidad provincial de Jaén y al Instituto de Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) tomar acciones de prevención de desastres en los mapas con mayores áreas de inundación que se encuentran en la zona, con 0.929 hectáreas inundables; zonas 2, con 0.482 hectáreas inundables; zona 5, con 0.504 hectáreas inundables; y la mayor área de inundación se encuentra en la zona 6 – Margen derecha que corresponde al sector San Camilo con un área de inundación de 2.633 hectáreas.
- Del mismo modo se recomienda a las autoridades elaborar planes de defensa ribereña considerando el caudal líquido máximo que es de 120.17 m³/s, para un periodo de retorno T=140 años, determinado en función a una vida útil de n=40 años y riesgo admisible de R=0.25 para puentes y defensas ribereñas y caudal sólido como el 25% del caudal líquido máximo, resultando un caudal máximo total de 150.212m³/s, el mismo que constituye un alto riesgo ante una máxima avenida.
- Para casos de modelación hidráulica donde se tomen en cuenta zonas urbanas, se ha asignado coeficientes de rugosidad altos calculados con la metodología de Cowan, considerando las condiciones más críticas para estos lugares con el objetivo de simular una resistencia al flujo sobre estos, para futuras investigaciones se recomienda realizar un estudio con énfasis en el cálculo de estos coeficientes de rugosidad en zonas urbanas.
- Se recomienda a la municipalidad provincial de Jaén tomar acciones en las áreas inundables, teniendo en cuenta los calados mayores en las áreas inundables de la zona urbana para diseños de defensas ribereñas, debido a los riesgos de inundación. También, tomar en cuenta la velocidad del flujo para determinar el tipo de estructura de defensa ribereña.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F.J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Morelos, México: Limusa.
- Autoridad Nacional del Agua (2015). Política y estrategia nacional de los Recursos Hídricos. Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. Editorial Cartomén E.I.R.L. Lima, Perú. Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2015-07708.
- Avila Vásquez Angélica (2017). Generación de Intensidades Máximas de la Estación Pluviográfica Jaén Jaén, Perú. Facultad de Ingeniería, Tesis de Pregrado.
- Cahuana, A., & Yugar, W. (2009). Material de Apoyo Didáctico para la Enseñanza y Aprendizaje de la Asignatura de Hidrología Civ-233 (Tesis de pregrado). Universidad Mayor de San Simón, Facultad de Ciencias y Tecnología, Cochabamba, Bolivia.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, Colombia: Mc GRAW - HILL. Primera edición
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Bogotá, Colombia: Mc GRAW - HILL. ISBN 958-600-228-4
- Departamento de Asuntos Económicos y Sociales – División de Estadística (2000). *Manual de sistemas de información geográfica y cartografía digital*. New York, Naciones Unidas. ISBN 92-1-161-426 -0.
- Díez, A. (2001). Geomorfología e Hidrología Fluvial del Río Alberche: modelos y S.I.G para la gestión de riberas (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Geológicas, Madrid, España.
- Fattorelli, S., & Fernández, P. (2011). *Diseño Hidrológico* (2da. ed.). Zaragoza, España: GASA – GN.
- Felicísimo Pérez, Ángel Manuel (1994). *Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones. Oviedo. ISBN 84-7848-475-2.
- García Mendivelso, Diego Andrés (2017). Tesis de maestría: *Comparación de los resultados de la simulación de flujo de un modelo físico a escala con el modelo numérico utilizado por el software IBER 2D*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.
- Gracia Sánchez, Jesús y Maza Álvarez, José Antonio (1997). *Morfología de Ríos*. Capítulo 11. Manual de Ingeniería de Ríos. Instituto de Ingeniería de la UNAM.

- Henaos, J. E. (1988). *Introducción al manejo de cuencas hidrográficas*. Universidad Santo Tomás. Centro de enseñanza desescolarizada. Bogotá.
- IBER (2015). “Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas”, ESPAÑA: Manual de Referencia Hidráulico IBER.
- Insley, Ray K., Kohler, Max A. y Paulus, Joseph L.H. (1977). *Hidrología para ingenieros*. [trad.] Universidad de los Andes Cetith. (2da. ed.). Editorial Mc Graw hill Latinoamérica S.A Bogotá. pág. 354. ISBN 0-07-090914-8.
- Labrador García Mauricio, Évora Brondo Juan Antonio & Arbelo Pérez Manuel (2012). *Satélites de Teledetección para la gestión del territorio*. Gobierno de Canarias. ISBN 13:978-84-695-3276-8.
- Martín Vide Juan P. (2002). *Ingeniería de ríos*. Primera edición. Editorial Alfaomega Grupo editor S.A. El manto, México.
- Mendoza Dueñas Jorge (2010). *Topografía*. Lima, Perú.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2008). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje* (2da. ed.). Lima, Perú.
- Ojha, C.S.P.; Berndtsson, R. & Bhunya, P. (2008). *Engineering Hydrology*. Oxford University Press. EE. UU.
- Ortiz Vera O. (2015). “*Similitud de sistemas hidrológicos altoandinos y transferencia de información hidrometeorológica*”. ISSN 01187.8336 Tecnología y ciencias del Agua, Vol. VI, núm.4, julio-agosto de 2015, pp.25-44.
- Quirós Rosado, Elia (2014). *Introducción a la Fotogrametría y Cartografía aplicadas a la Ingeniería Civil*. Universidad de Extremadura. Cáceres, España. ISBN 978-84-697-1317-4.
- Reglamento para la delimitación de Fajas Marginales en cursos fluviales y cuerpos naturales y artificiales - R.J. N° 300-2011-ANA. Lima, Perú.
- Robles Montero (2016). Tesis de Maestría: *Implementación de modelos Unidimensionales para la Simulación del Funcionamiento Hidráulicos de sistemas de Lagunas y Canales*. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
- Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la hidráulica Fluvial*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.

- Romero Jerónimo, A. (2014). Factores Biológicos, sociales y paisajísticos del área de conservación Municipal bosque de Huamantanga – Distrito de Jaén para el desarrollo del Ecoturismo. Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ciencias Sociales. Escuela Profesional de Turismo. Trujillo, Perú.
- Santamaría Peña, Jacinto (2011). *La Cartografía y las proyecciones cartográficas*. Universidad de la Rioja. Logroño, España. ISBN 978-84-694-0867-4.
- Singh, V.P (1992). *Elementary Hydrology*. Department of Civil Engineering, Louisiana State University. Prentice Hall. EE. UU.
- Soil Conservation Service (1969). *Hydrology*. National Engineering Handbook. USDA. Washington, D.C.
- Tejada, H. E. (2014). Estudio hidrológico de máximas avenidas de la subcuenca Juana ríos- cuenca Chancay- Lambayeque. Universidad Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Ingeniería Civil, Lambayeque, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/UNPRG/107>
- Tomas, Ochoa R. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Primera edición, Eco Ediciones, Bogotá, Colombia, 670 pp.
- Schroeder, Wolfgang (1994). *Regularización y control de ríos*. Universidad de Piura, Piura.
- Valdivia Guevara, Jimmy Gabriel (2014). *Determinación del área de inundación por máxima avenida de la quebrada Amojú, en la zona urbana de la ciudad de Jaén – Cajamarca* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.
- Velásquez, A. A. (2015). *Modelamiento Hidrológico e Hidráulico del Rio Santa, Tramo Asentamiento Humano las Flores, Distrito de Carhuaz, Ancash* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ingeniería Agrícola, Lima, Perú.
- Vergara Sánchez, Miguel A. (1993). *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Primera Edición. México D. F, Ediciones Alfaomega.
- Villón, M. (2002). *Hidrología* (2da. ed.). Lima, Perú: Villón.

ANEXOS

ANEXO 1: Información Pluviométrica para Intensidades Máximas

Años	Riesgo	Tiempo de retorno	Duración						
			5 min	10 min	30 min	60 min	120 min	240 min	480 min
"N"	J (%)	Tr (años)	Intensidades Máximas (mm/h)				$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \times \text{Ln} \times [-\text{Ln} \times (1 - \frac{1}{Tr})]$		
40	2	1980	121.15	109.53	77.1	48.51	28.11	15.17	7.79
	5	780	107.05	96.77	68.12	42.94	24.92	13.47	6.92
	10	380	96.15	86.91	61.19	38.63	22.46	12.16	6.25
	15	246	89.59	80.98	57.02	36.04	20.98	11.36	5.84
	20	179	84.8	76.64	53.96	34.15	19.89	10.78	5.54
	25	139	80.95	73.16	51.52	32.63	19.02	10.32	5.31
	30	112	77.7	70.21	49.45	31.34	18.29	9.93	5.1
	40	78	72.26	65.29	45.99	29.19	17.06	9.27	4.77
	50	58	67.64	61.11	43.05	27.37	16.02	8.71	4.48
	60	44	63.42	57.29	40.36	25.7	15.06	8.2	4.22
	70	33	59.28	53.55	37.73	24.07	14.13	7.7	3.97
	75	29	57.15	51.62	36.37	23.23	13.65	7.44	3.83
	80	25	54.89	49.58	34.94	22.33	13.14	7.17	3.69
	90	17	49.47	44.67	31.49	20.19	11.91	6.52	3.36
	100	1	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: tesis de pregrado Avila (2017) "Generación de intensidades máximas de la estación pluviográfica Jaén"

ANEXO 2: Proceso de convolución de precipitaciones: $Q(t)=Pe(t)*HU(t)$

Tiempo (horas)	Caudal (m ³ /s/cm)	Precipitación efectiva (cm) por intervalos																											Caudal Resorte							
		0.000	0.015	0.036	0.138	0.173	0.163	0.153	0.145	0.138	0.133	0.127	0.122	0.118	0.114	0.111	0.108	0.105	0.102	0.100	0.097	0.095	0.093	0.091	0.090	0.087	0.086	0.084		0.083	0.081	0.080	0.078	0.078	0.076	0.075
0.00	0.000	0.000																																		0.000
0.50	5.000	0.000																																	0.000	
1.00	10.000	0.000	0.575	0.000																															0.575	
1.50	15.001	0.000	1.151	0.978	0.000																														2.129	
2.00	20.001	0.000	1.726	1.956	0.928	0.000																													4.610	
2.50	25.001	0.000	2.302	2.934	1.856	0.866	0.000																												7.957	
3.00	30.001	0.000	2.877	3.912	2.783	1.792	0.814	0.000																											12.118	
3.50	35.002	0.000	3.452	4.890	3.711	2.598	1.628	0.766	0.000																										17.045	
4.00	40.002	0.000	4.028	5.868	4.639	3.464	2.442	1.532	0.727	0.000																									22.699	
4.50	58.862	0.000	4.603	6.846	5.567	4.330	3.256	2.298	1.454	0.691	0.000																								29.044	
5.00	74.490	0.000	6.774	7.824	6.495	5.196	4.070	3.063	2.181	1.383	0.663	0.000																							37.647	
5.50	81.039	0.000	8.572	11.512	7.422	6.062	4.883	3.829	2.908	2.074	1.226	0.635	0.000																						49.225	
6.00	77.374	0.000	9.429	14.569	10.922	6.928	5.697	4.595	3.635	2.765	1.989	1.271	0.610	0.000																					62.411	
6.50	70.988	0.000	8.904	16.026	13.822	10.194	6.511	5.361	4.362	3.456	2.652	1.906	1.221	0.592	0.000																				75.008	
7.00	64.601	0.000	8.169	15.133	15.204	12.901	9.581	6.127	5.090	4.148	3.315	2.542	1.831	1.184	0.572	0.000																			85.795	
7.50	56.889	0.000	7.434	13.884	14.357	14.191	12.125	9.016	5.817	4.839	3.978	3.177	2.441	1.776	1.143	0.556	0.000																		94.734	
8.00	48.374	0.000	6.547	12.635	13.172	13.401	13.338	11.409	8.559	5.530	4.641	3.813	3.052	2.368	1.715	1.112	0.539	0.000																	101.829	
8.50	40.990	0.000	5.567	11.126	11.987	12.294	12.595	12.550	10.832	8.138	5.304	4.448	3.662	2.960	2.286	1.668	1.078	0.524	0.000																107.020	
9.00	38.490	0.000	4.717	9.461	10.556	11.188	11.555	11.851	11.915	10.298	7.804	5.084	4.272	3.553	2.858	2.224	1.617	1.049	0.509	0.000															110.511	
9.50	35.989	0.000	4.429	8.017	8.976	9.853	10.515	10.873	11.251	11.328	9.876	7.480	4.852	4.145	3.400	2.780	2.157	1.573	1.018	0.499	0.000														119.083	
10.00	33.489	0.000	4.141	7.528	7.696	8.378	9.260	9.895	10.322	10.697	10.864	9.467	7.185	4.737	4.001	3.337	2.696	2.098	1.526	0.999	0.486	0.000													115.221	
10.50	30.989	0.000	3.854	7.039	7.142	7.099	7.874	8.714	9.394	9.814	10.259	10.413	9.092	6.970	4.573	3.893	3.235	2.622	2.035	1.498	0.972	0.475	0.000												116.966	
11.00	28.489	0.000	3.566	6.550	6.678	6.666	6.672	7.409	8.272	8.931	9.412	9.833	10.001	8.821	6.729	4.449	3.774	3.147	2.544	1.998	1.458	0.951	0.464	0.000										118.324		
11.50	25.989	0.000	3.278	6.061	6.214	6.233	6.265	6.278	7.034	7.865	8.565	9.021	9.444	9.703	8.515	6.546	4.313	3.671	3.053	2.497	1.943	1.426	0.928	0.453	0.000									119.308		
12.00	23.489	0.000	2.991	5.572	5.750	5.800	5.858	5.895	5.960	6.688	7.543	8.210	8.665	9.162	9.367	8.284	6.347	4.196	3.561	2.997	2.429	1.901	1.393	0.905	0.448	0.000									119.922	
12.50	20.989	0.000	2.703	5.083	5.286	5.367	5.451	5.512	5.597	5.667	6.414	7.230	7.885	8.406	8.845	9.113	8.032	6.174	4.070	3.496	2.915	2.376	1.857	1.358	0.886	0.436	0.000								120.169	
13.00	18.489	0.000	2.415	4.594	4.822	4.934	5.044	5.129	5.233	5.321	5.435	6.148	6.944	7.650	8.115	8.605	8.835	7.813	5.989	3.996	3.401	2.852	2.321	1.810	1.345	0.872	0.431	0.000							120.954	
13.50	15.989	0.000	2.128	4.105	4.358	4.501	4.637	4.747	4.870	4.976	5.103	5.209	5.904	6.736	7.385	7.895	8.343	8.595	7.579	5.880	3.887	3.327	2.785	2.263	1.793	1.308	0.862	0.418	0.000						114.442	
14.00	13.489	0.000	1.840	3.616	3.894	4.068	4.230	4.364	4.506	4.630	4.772	4.891	5.003	5.728	6.503	7.185	7.654	8.116	8.337	7.441	5.719	3.802	3.249	2.716	2.241	1.744	1.293	0.836	0.416	0.000					118.795	
14.50	10.988	0.000	1.552	3.127	3.431	3.635	3.823	3.981	4.143	4.284	4.440	4.574	4.698	4.854	5.530	6.327	6.966	7.446	7.873	8.185	7.238	5.595	3.713	3.168	2.689	2.179	1.724	1.254	0.833	0.407	0.000				117.668	
15.00	8.488	0.000	1.264	2.638	2.967	3.202	3.416	3.598	3.779	3.939	4.109	4.256	4.393	4.558	4.686	5.380	6.134	6.776	7.223	7.729	7.962	7.080	5.464	3.621	3.138	2.615	2.155	1.672	1.249	0.814	0.401	0.000				116.216
15.50	5.988	0.000	0.977	2.149	2.503	2.769	3.009	3.215	3.415	3.593	3.777	3.938	4.088	4.252	4.400	4.559	5.216	5.967	6.573	7.091	7.518	7.788	6.915	5.328	3.586	3.051	2.585	2.090	1.665	1.220	0.802	0.391	0.000			114.442
16.00	3.488	0.000	0.689	1.660	2.039	2.336	2.603	2.832	3.052	3.247	3.446	3.621	3.782	3.966	4.114	4.281	4.420	5.074	5.789	6.453	6.898	7.355	7.607	6.743	5.276	3.487	3.016	2.508	2.082	1.627	1.203	0.782	0.389	0.000		112.374
16.50	0.988	0.000	0.401	1.171	1.575	1.903	2.196	2.449	2.688	2.902	3.114	3.303	3.477	3.670	3.828	4.003	4.150	4.299	4.922	5.683	6.277	6.747	7.183	7.417	6.677	5.131	3.447	2.926	2.498	2.034	1.604	1.173	0.778	0.382	0.000	110.009
16.70	0.000	0.000	0.114	0.682	1.111	1.470	1.789	2.066	2.325	2.556	2.783	2.985	3.172	3.373	3.542	3.725	3.881	4.037	4.171	4.832	5.528	6.140	6.590	7.004	7.345	6.494	5.073	3.344	2.915	2.441	2.005	1.564	1.146	0.765	0.376	107.362
17.00	0.000	0.000	0.193	0.647	1.037	1.382	1.683	1.961	2.210	2.451	2.667	2.867	3.077	3.257	3.446	3.611	3.775	3.916	4.095	4.700	5.407	5.997	6.426	6.936	7.143	6.419	4.920	3.331	2.848	2.406	1.995	1.555	1.147	0.752	104.219	
17.50	0.000	0.000	0.183	0.604	0.975	1.300	1.598	1.865	2.120	2.350	2.562	2.781	2.971	3.168	3.341	3.513	3.662	3.845	3.983	4.598	5.281	5.848	6.363	6.745	7.061	6.246	4.901	3.254	2.807	2.346	1.944	1.530	1.128	100.853		
18.00	0.000	0.000	0.171	0.568	0.917	1.234	1.519	1.788	2.032	2.257	2.485	2.685	2.890	3.072	3.241	3.408	3.595	3.740	3.896	4.491	5.149	5.791	6.188	6.668	6.849	6.203	4.789	3.208	2.737	2.333	1.912	1.504	1.079	97.329		
18.50	0.000	0.000	0.161	0.534	0.871	1.174	1.457	1.714	1.957	2.189	2.399	2.612	2.802	2.988	3.153	3.345	3.497	3.658	3.805	4.379	5.099	5.632	6.118	6.407	6.823	6.600	4.720	3.128	2.721	2.295	1.880	1.393	93.634			
19.00	0.000	0.000	0.151	0.507	0.828	1.125	1.396	1.646	1.893	2.113	2.334	2.533	2.726	2.899	3.066	3.254	3.421	3.572	3.710	4.336	4.959	5.587	5.934	6.443	6.666	5.973	4.603	3.110	2.677	2.256	1.807	1.311	1.000		91.000	
19.50	0.000	0.000	0.144	0.482	0.794	1.079	1.341	1.597	1.828	2.056	2.263	2.464	2.644	2.846	3.011	3.183	3.341	3.484	3.674	4.217	4.903	5.400	5.911	6.295	6.570	5.825	4.456	3.000	2.632	2.207	1.750					

ANEXO 3: Parámetros del procesamiento en Agisoft

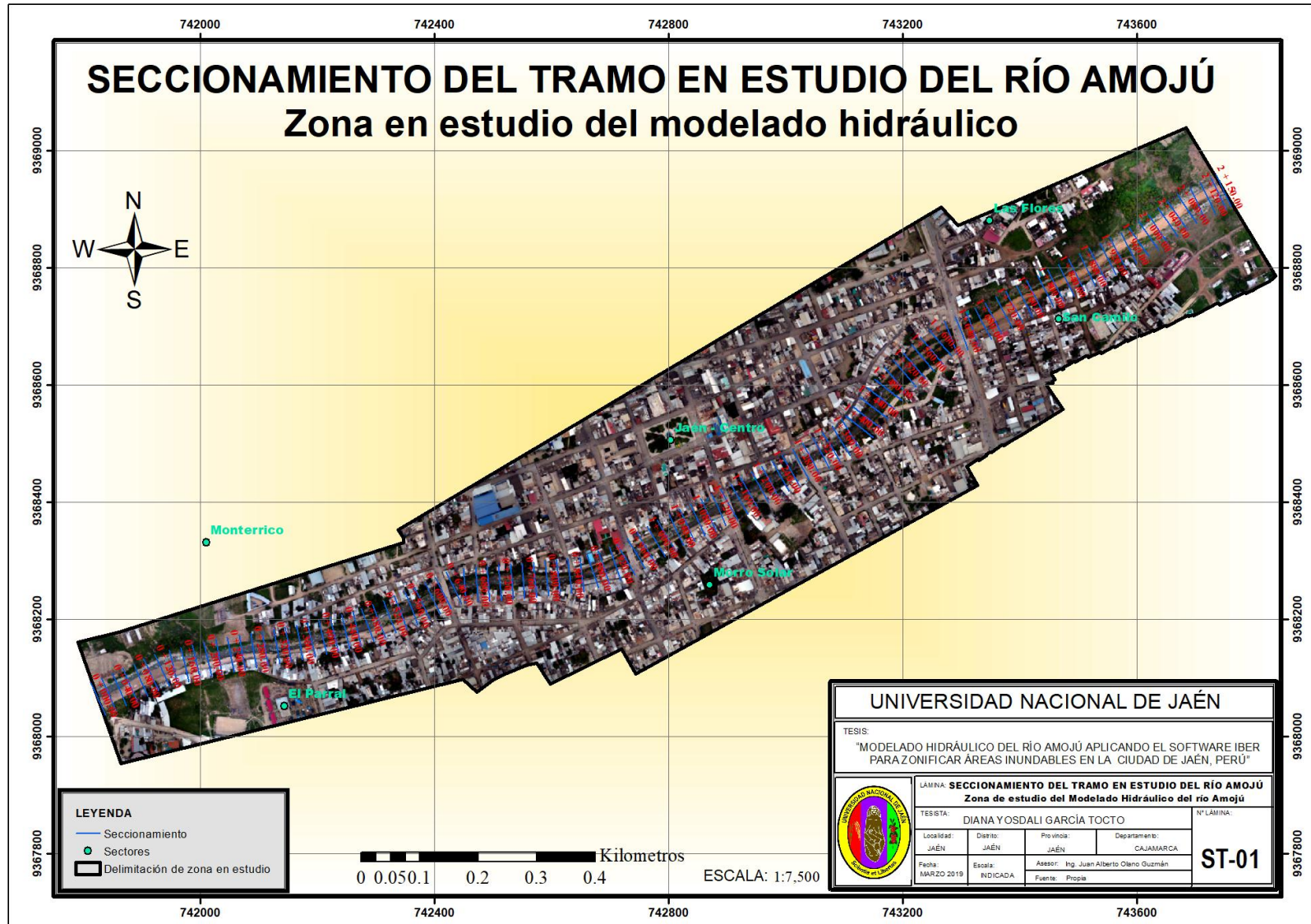
Parámetros	Valores
Generales	
Cámaras	766
Cámaras orientadas	759
Marcadores	3
Formas	
Polilíneas	466
Polígonos	13064
Sistema de coordenadas	WGS 84/UTM zone17S (EPSG:32717)
Ángulo de rotación	Guiñada, cabeceo, alabeo
Nube de puntos	
Puntos	457,026 de 503,224
RMS error de reproyección	0.158634 (1.11432 pix)
Error de reproyección máximo	1.31248 (44.2678 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	6.49084 pix
Superposición efectiva	4.89797
Parámetros de orientación	
Precisión	Media
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	30,000
Puntos de enlace por foto	3,000
Adaptativo ajuste del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de puntos homólogos	15 minutos 15 segundos
Tiempo de orientación	9 minutos 10 segundos
Parámetros de optimización	
Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Compensar rolling-shutter	Sí
Tiempo de optimización	4 minutos 6 segundos
Nube de puntos densa	
Puntos	108,658,822
Parámetros de reconstrucción	
Calidad	Media
Filtrado de profundidad	Moderado
Tiempo de generación de mapas de profundidad	1 hora 9 minutos
Tiempo de generación de nube de puntos densa	1 hora 17 minutos

Continuación

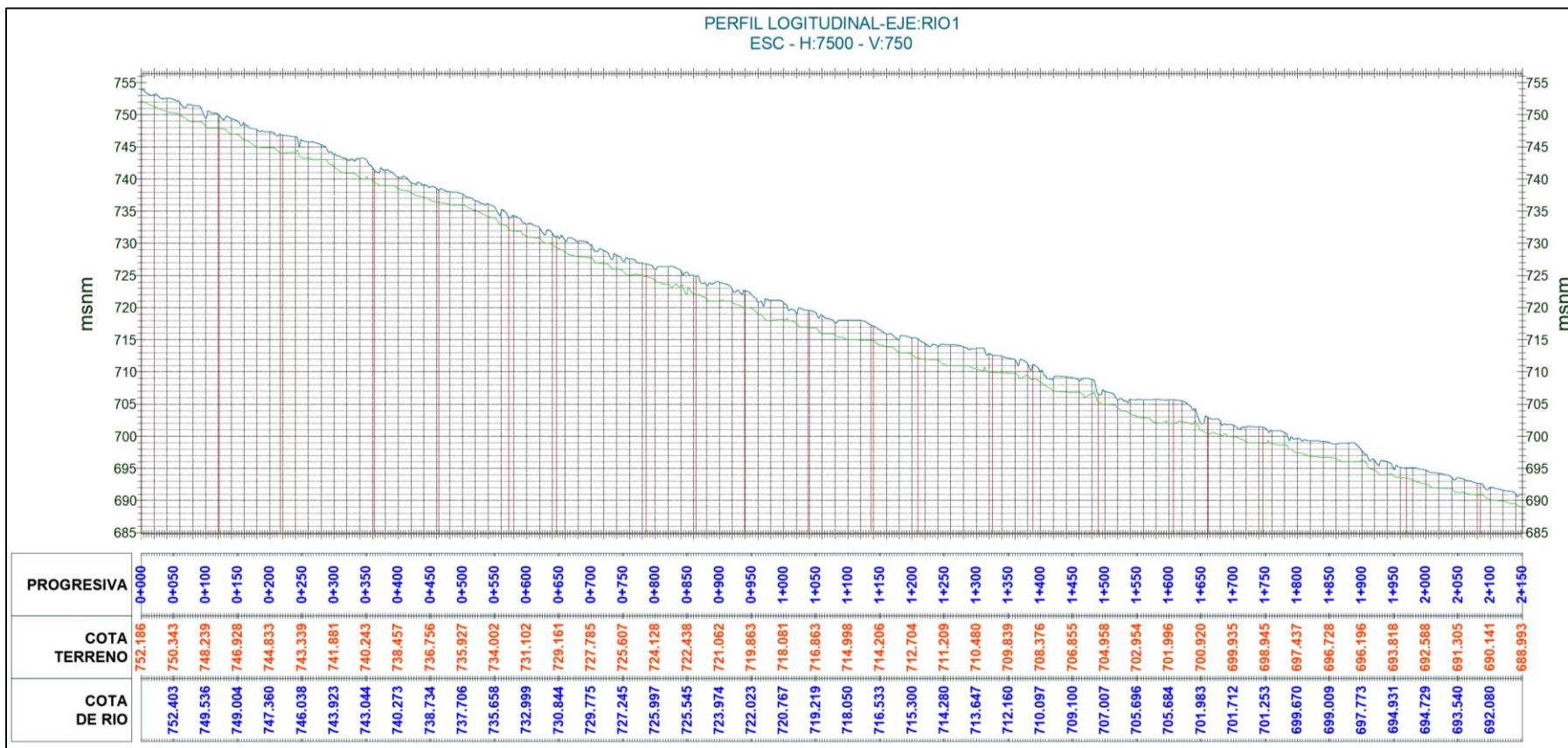
Modelo	
Caras	21,272,696
Vértices	10,648,526
Parámetros de reconstrucción	
Tipo de superficie	Bajorelieve/terreno
Datos fuente	Densa
Interpolación	Habilitada
Calidad	Media
Filtrado de profundidad	Moderado
Número de caras	21,731,764
Duración del procesamiento	16 minutos 55 segundos
DEM	
Tamaño	29,990 x 19,183
Sistema de coordenadas	WGS 84/UTM zone17S (EPSG:32717)
Parámetros de reconstrucción	
Datos fuente	Malla
Interpolación	Habilitada
Duración del procesamiento	4 minutos 36 segundos
Ortomosaico	
Tamaño	41,273 x 22,016
Sistema de coordenadas	WGS 84/UTM zone17S (EPSG::32717)
Canales	3, uint8
Parámetros de reconstrucción	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Malla
Permitir la corrección de color	No
Realizar el relleno de agujeros	Sí
Duración del procesamiento	1 hora 0 minutos
Software	
Versión	1.3.2 build 4205
Plataforma	Windows 64

Fuente: Elaboración propia

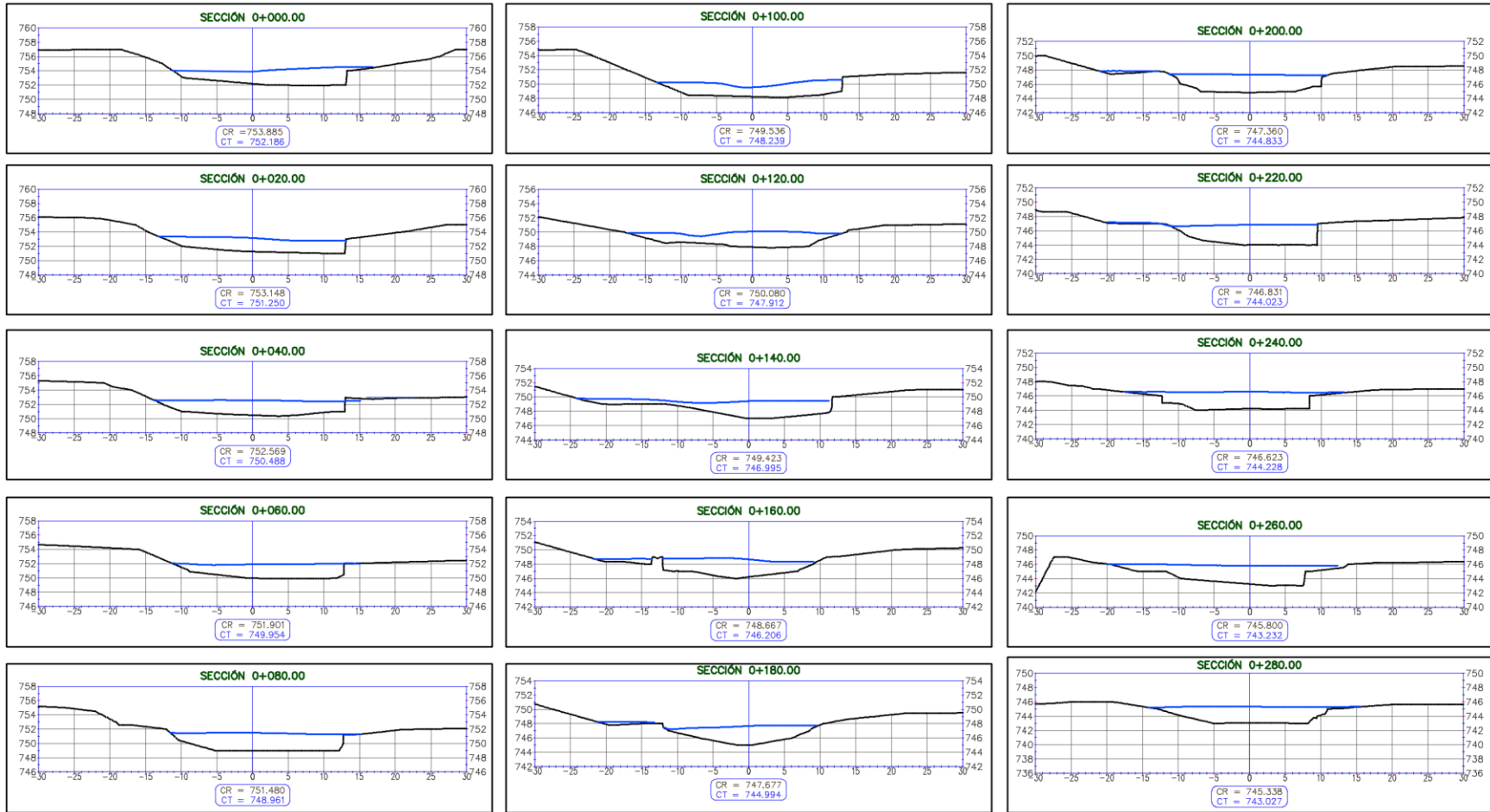
ANEXO 4: Seccionamiento del tramo en estudio del río Amojú

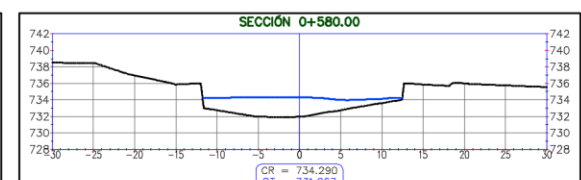
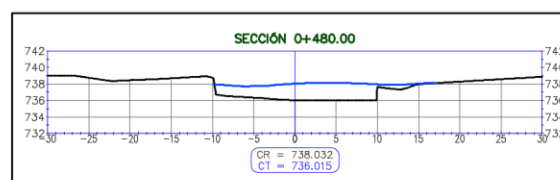
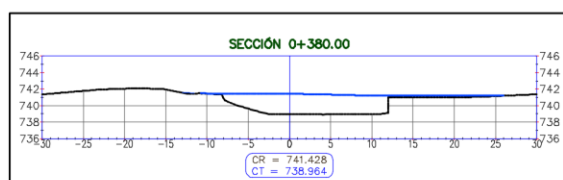
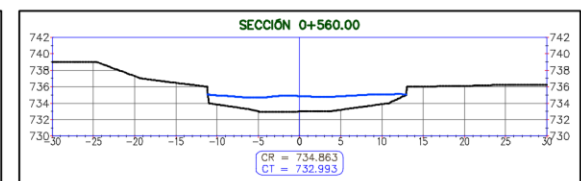
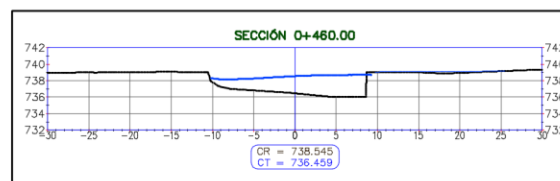
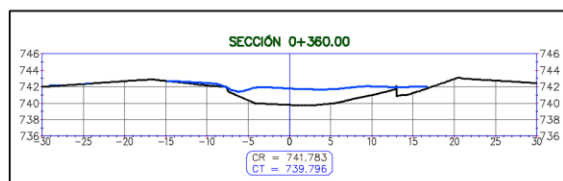
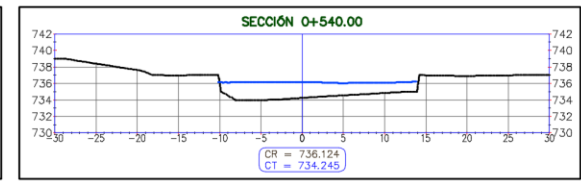
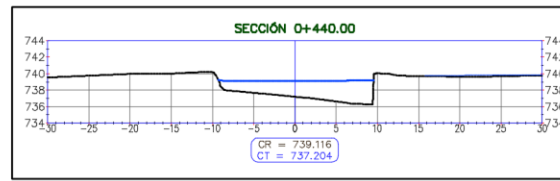
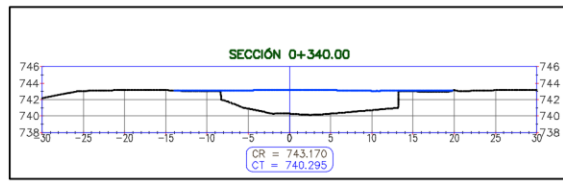
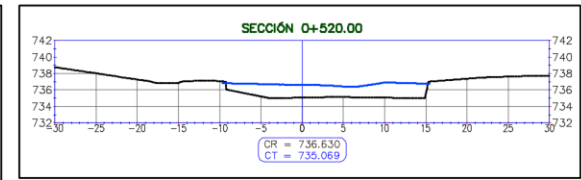
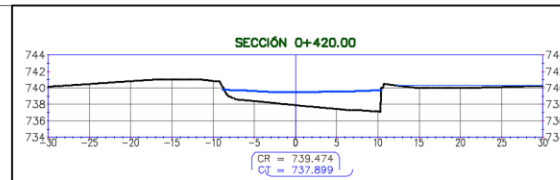
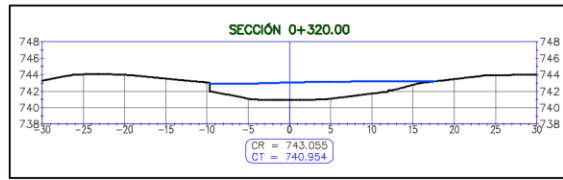
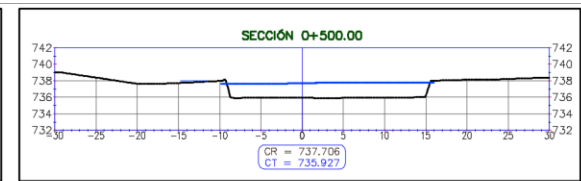
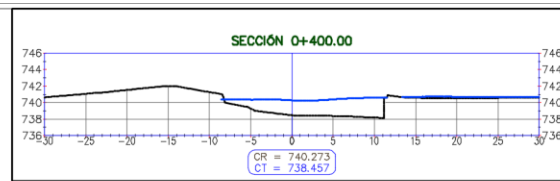
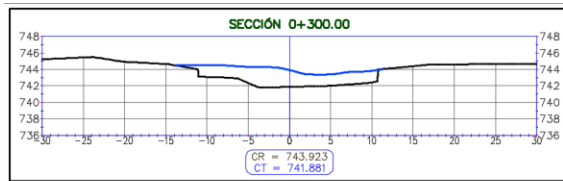


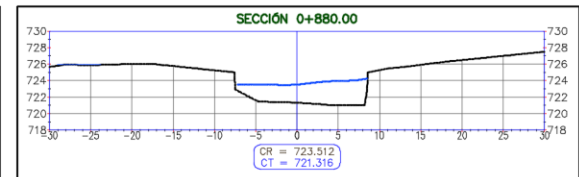
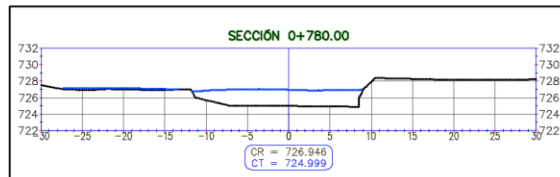
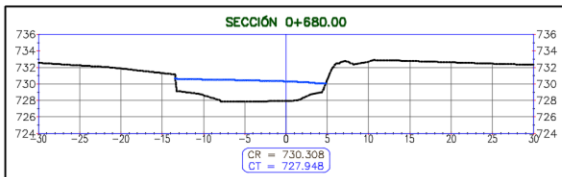
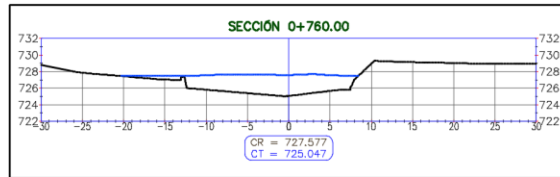
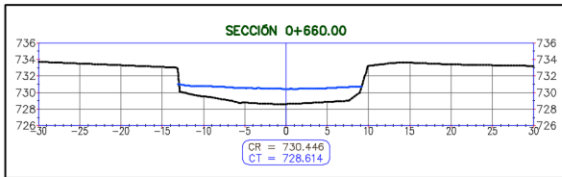
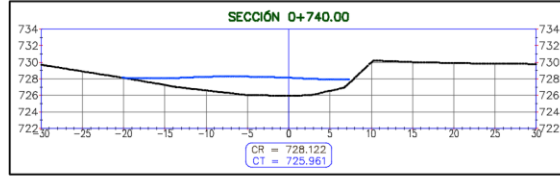
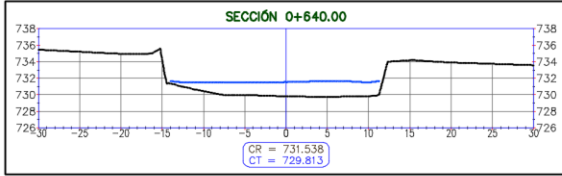
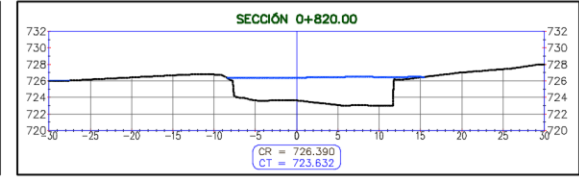
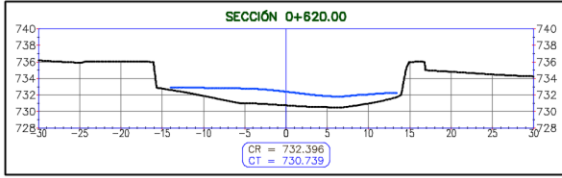
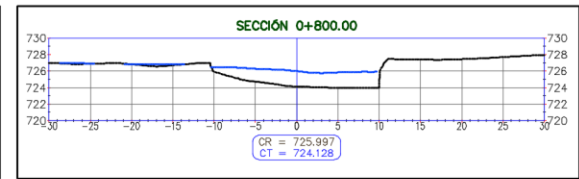
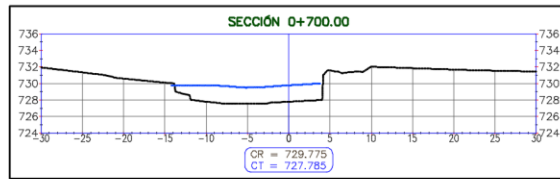
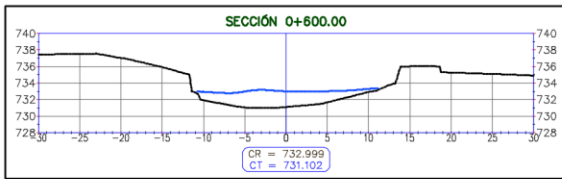
ANEXO 5: Perfil Hidráulico del río

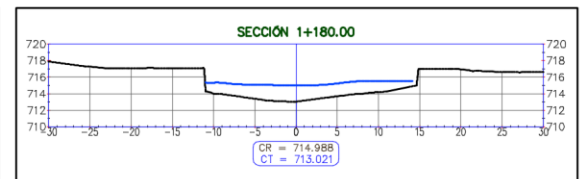
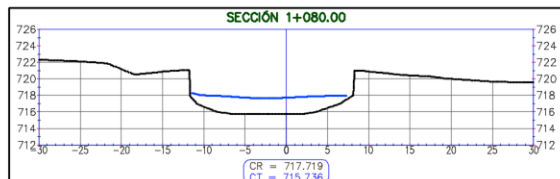
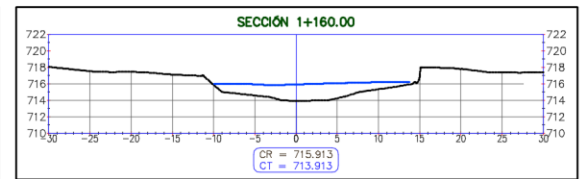
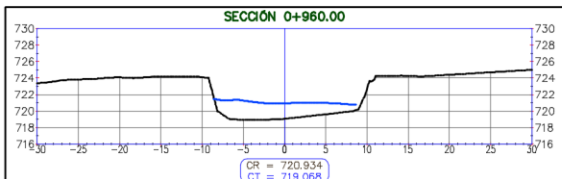
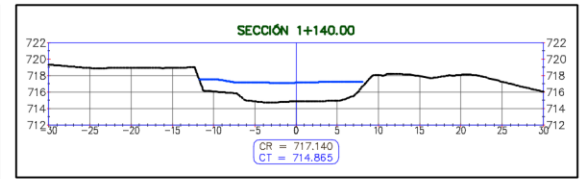
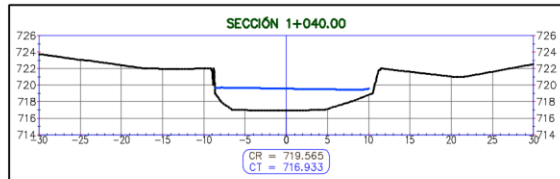
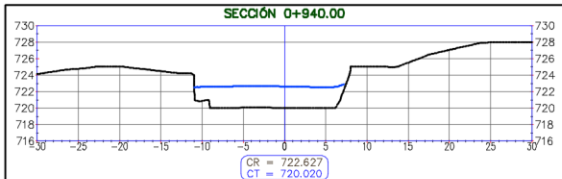
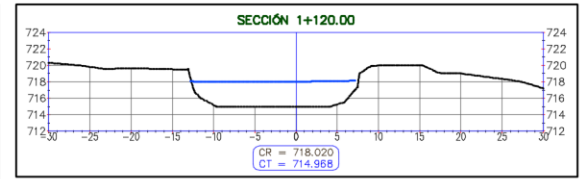
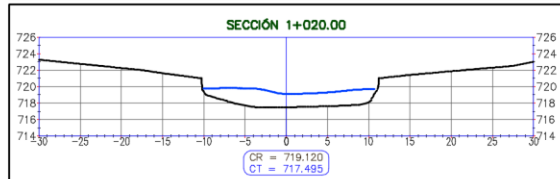
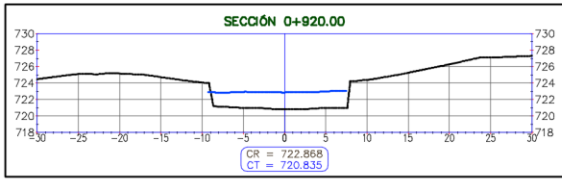
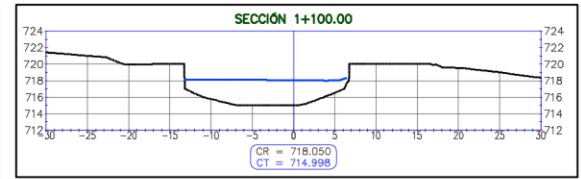
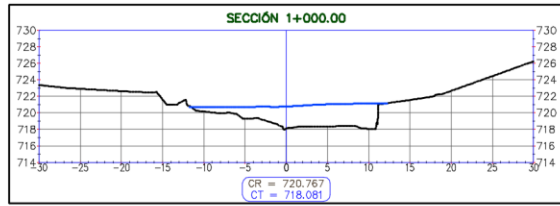
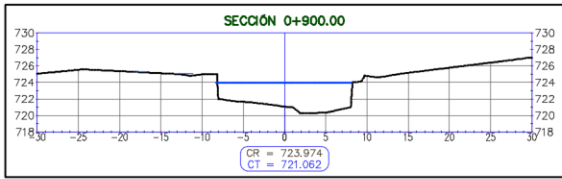


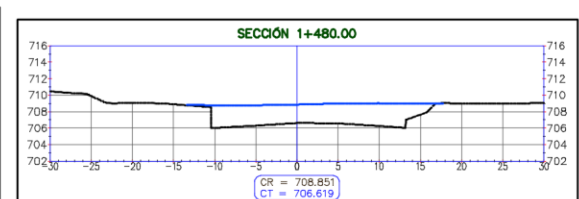
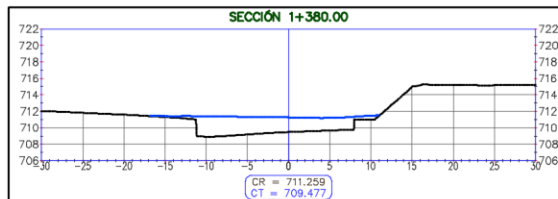
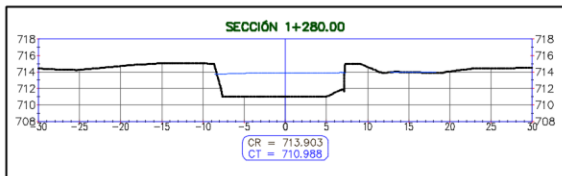
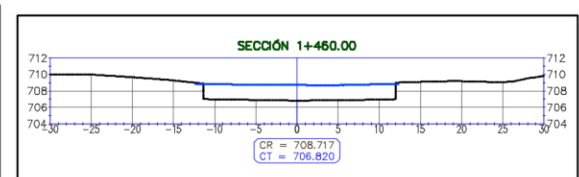
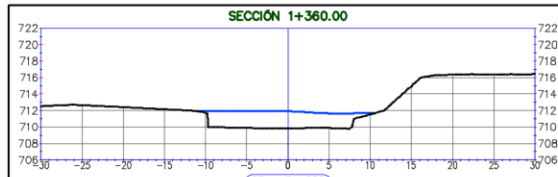
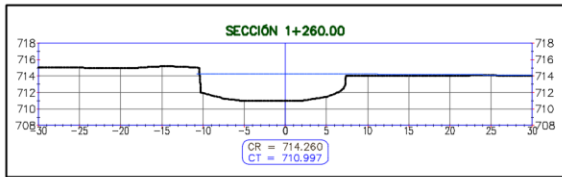
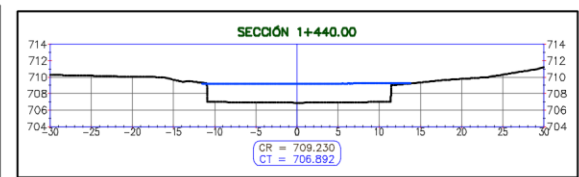
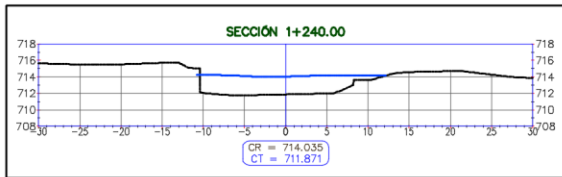
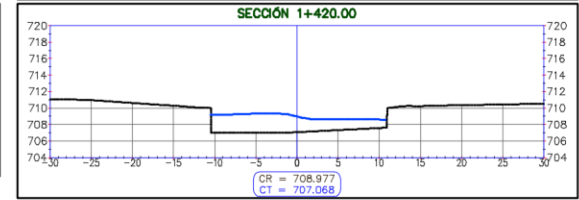
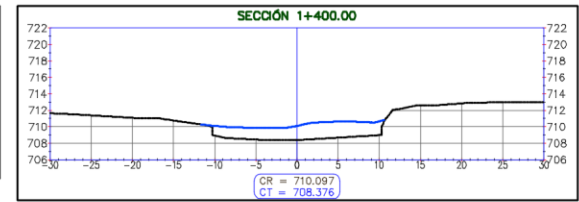
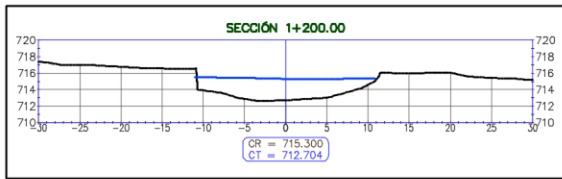
ANEXO 6: Secciones del cauce del río Amojú

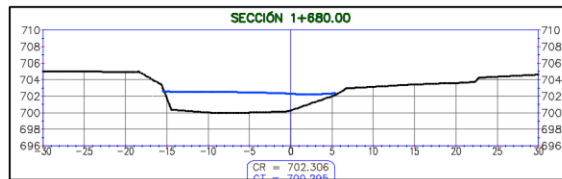
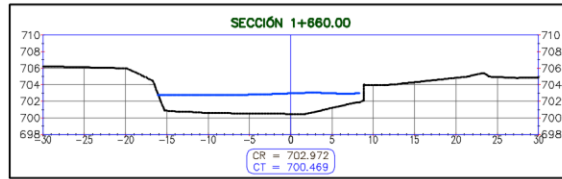
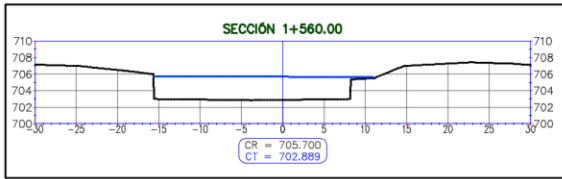
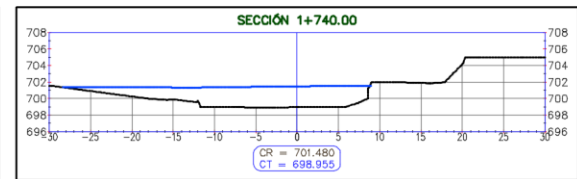
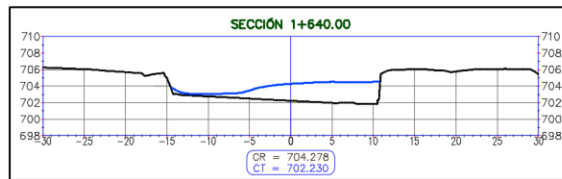
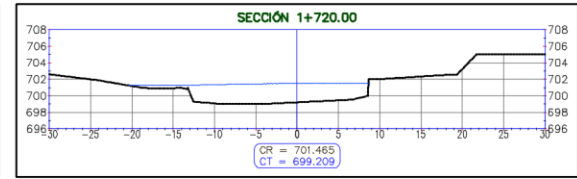
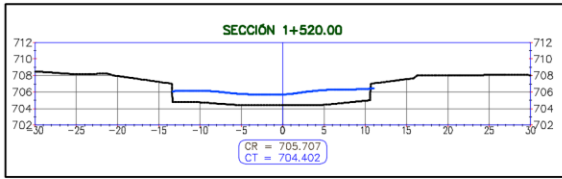
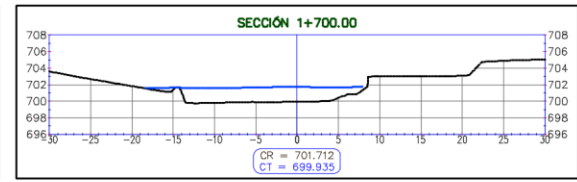
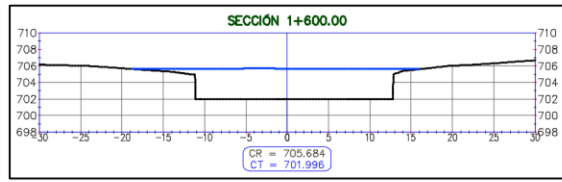
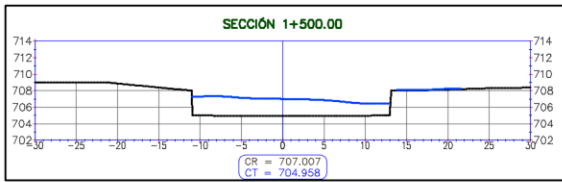


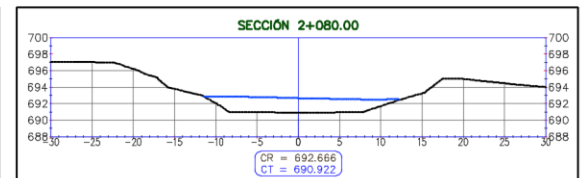
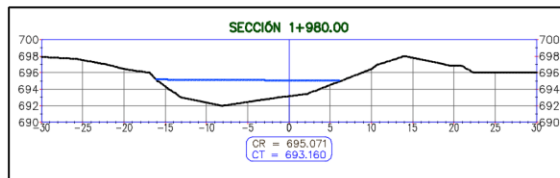
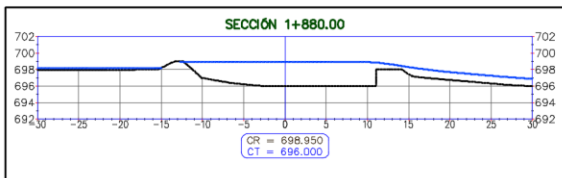
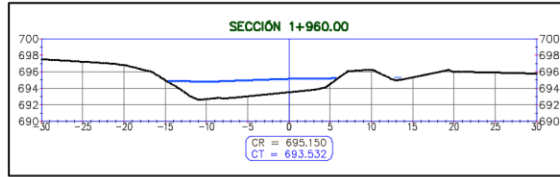
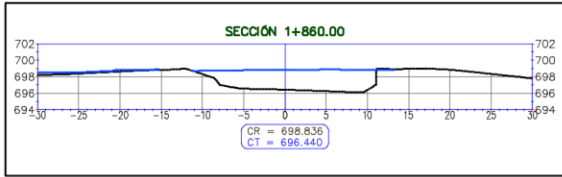
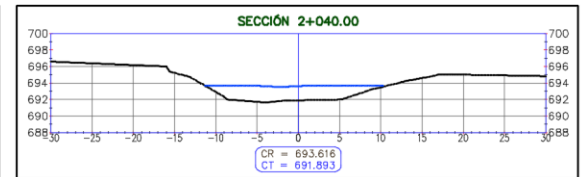
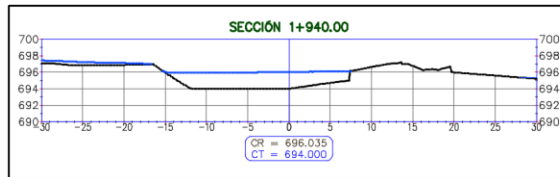
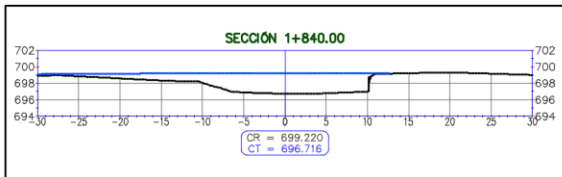
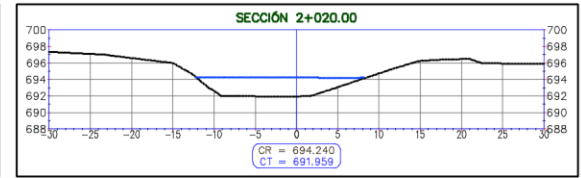
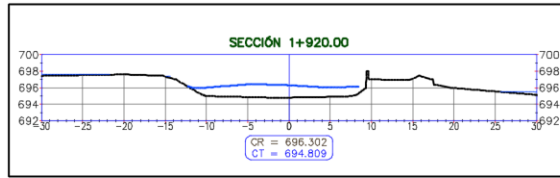
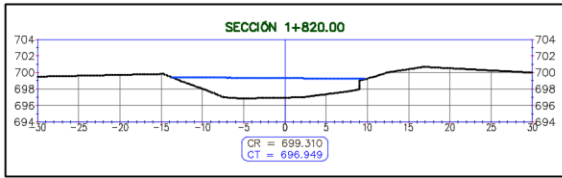
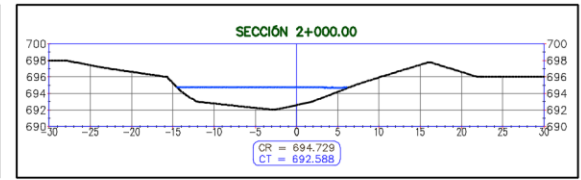
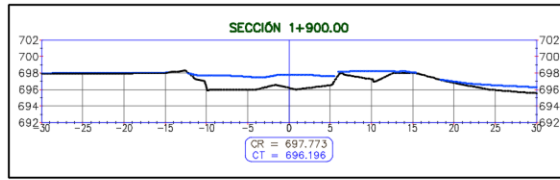
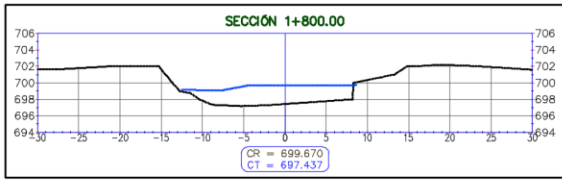


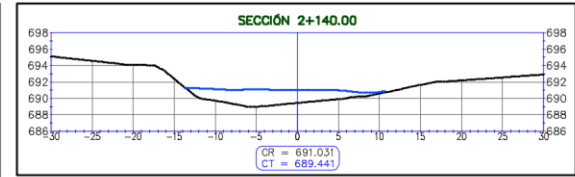
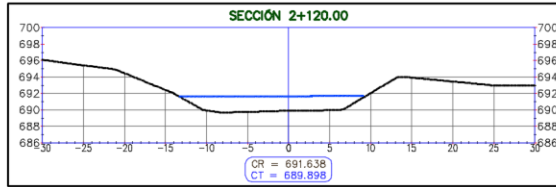
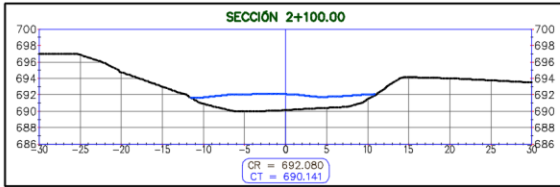




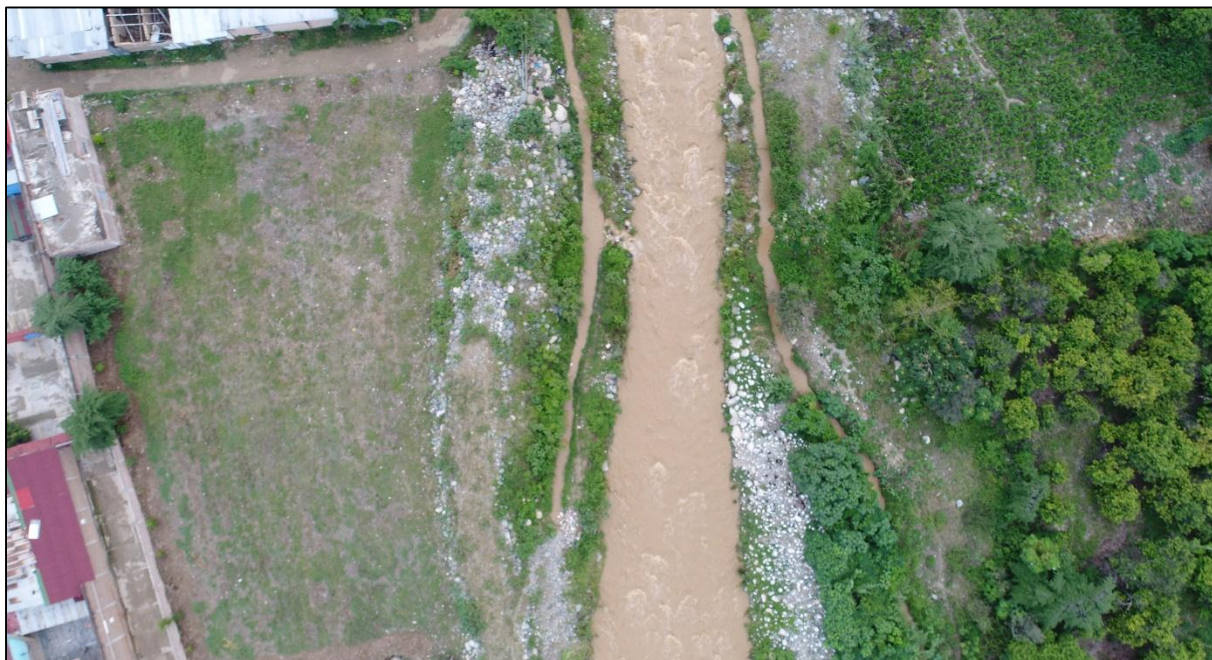








ANEXO 7: Fotografías del lecho del río



Se observa la imagen del Sector San Camilo - parte baja, donde se encuentra sin defensas ribereñas, encontrándose las márgenes del río Amojú en este tramo con bolonería y una vegetación dispersa.

Fuente: Elaboración propia



En el Sector San Camilo, una margen del río Amojú y un tramo de este sector cuenta con muro de contención como protección ribereña, observándose presencia de bolonería en el lecho del río y vegetación a la margen izquierda.

Fuente: Elaboración propia



En la zona céntrica de la ciudad, cuenta con Muro de Contención como defensa ribereña, mostrándose una cantidad de vegetación insignificante, el lecho del río tiene bastante bolonería, siguiendo este mismo perfil en este tramo.
Fuente: Elaboración propia



En el Sector El Parral, en último tramo del área de influencia del estudio, cuenta con muro de contención en una margen y la otra margen con un enrocado como defensa ribereña, siendo insignificante la vegetación en el lecho del río.
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 8: Fotografías del levantamiento topográfico con Estación Total del tramo en estudio del río Amojú para la modelación hidráulica



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de las márgenes y sección del río Amojú – Sector San Camilo

Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de los muros de contención del río Amojú.

Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de la sección del río Amojú en la zona urbana central de la ciudad de Jaén.

Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles del puente Orellana, con la protección policial de la Policía Nacional del Perú – Jaén.

Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de la sección del río Amojú, aguas arriba del puente Orellana.

Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de la sección del río Amojú en el Sector El Parral.

Fuente: Elaboración propia



En la imagen se visualiza el trabajo en campo de topografía con Estación total del Sector El Parral.
Fuente: Elaboración propia



En la imagen se visualiza el trabajo en campo de topografía con Estación total, tomando los puntos de la sección del río Amojú – Sector El Parral.
Fuente: Elaboración propia



Trabajo en campo de topografía con estación total, toma de detalles de las calles del Sector El Parral, con apoyo de la Policía Nacional de Perú – Jaén, brindando el servicio de protección policial.
Fuente: Elaboración propia



Término del trabajo de topografía con estación total en la zona de influencia para el modelado hidráulico, contando apoyo de la Policía Nacional de Perú – Jaén, brindando el servicio de protección policial.
Fuente: Elaboración propia

ANEXO 9: Fotografías del levantamiento topográfico con Dron del tramo en estudio del río Amojú para la modelación hidráulica



Instalación del vehículo volador no tripulado (Dron), monitoreado desde punto de estación - puente Pardo Miguel
Fuente: Elaboración propia



Inicio de vuelo del vehículo volador no tripulado (Dron), para realizar el levantamiento topográfico del tramo que abarca el área desde el Puente Pakamuros hasta el Puente Orellana.
Fuente: Elaboración propia



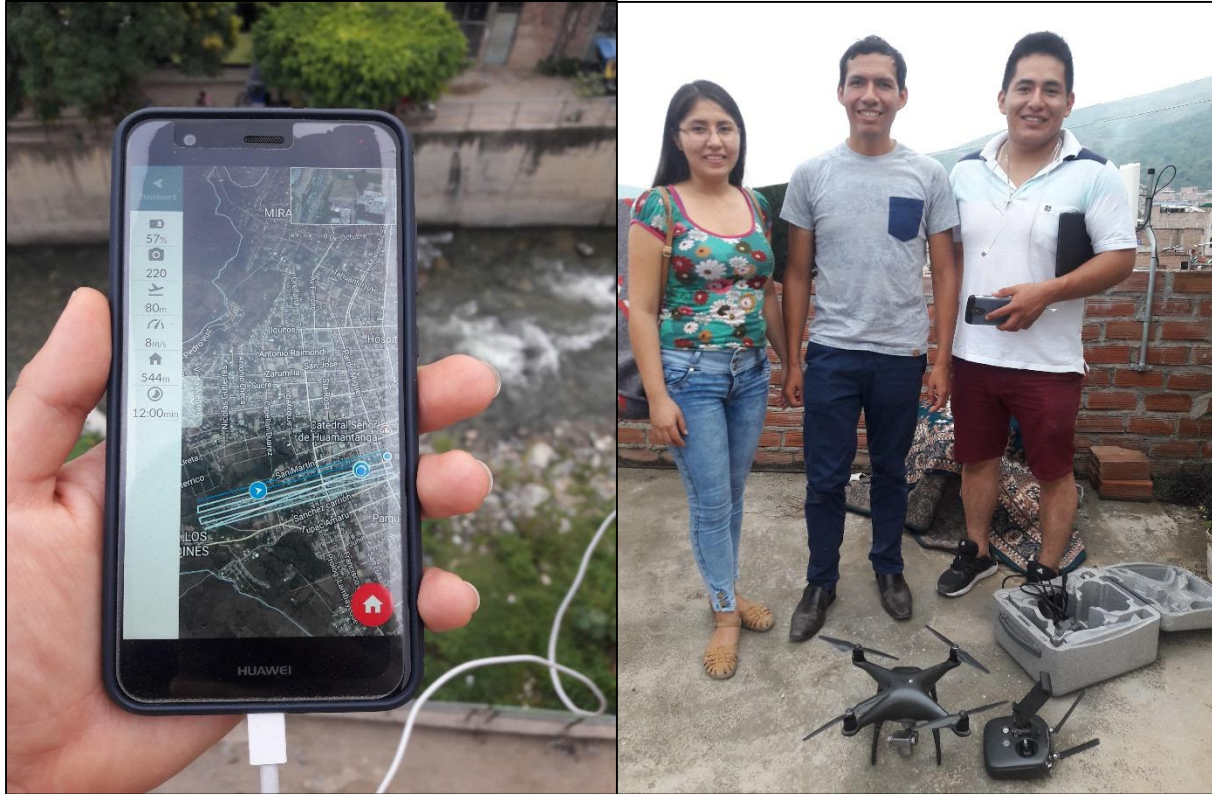
Instalación del vehículo volador no tripulado (Dron), para realizar el levantamiento topográfico aguas arriba del Puente Orellana – Sector El Parral, tomando como punto de estación una vivienda en la calle Capitán Quiñones y el Malecón del Río Amojú.

Fuente: Elaboración propia



Inicio de vuelo del vehículo volador no tripulado (Dron), con una ruta trazada del levantamiento topográfico aguas arriba del Puente Orellana – Sector El Parral, tomando como punto de estación una vivienda en la calle Capitán Quiñones y el Malecón del Río Amojú.

Fuente: Elaboración propia



Trazo de ruta del vehículo volador no tripulado (Dron) del sector El Parral, monitoreado desde el teléfono móvil, con el apoyo de los ingenieros especialistas en topografía con drones desde una vivienda tomada como estación de control. Fuente: Elaboración propia



Fotografía tomada con el vehículo volador no tripulado (Dron) al punto de estación - vivienda en la calle Capitán Quiñones y el Malecón del Río Amojú, observándose el equipo de trabajo del levantamiento topográfico con dron. Fuente: Elaboración propia