



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LOS PUENTES SOBRE EL RÍO
BURGAY SECTOR LA CONCORDIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: BORIS FABRICIO CABRERA GUILLÉN, VINICIO
VALENTÍN VÉLEZ VÁZQUEZ**

**DIRECTOR: ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA,
MSC.**

AZOGUES - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo
**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DE LOS PUENTES SOBRE EL RÍO
BURGAY SECTOR LA CONCORDIA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**AUTOR: BORIS FABRICIO CABRERA GUILLÉN, VINICIO
VALENTÍN VÉLEZ VÁZQUEZ**

**DIRECTOR: ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA,
MSC.**

AZOGUES - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Boris Fabricio Cabrera Guillén portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302633615**. Declaro ser el autor de la obra: “**Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay sector la Concordia**”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F: 

Boris Fabricio Cabrera Guillén

C.I. 0302633615

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Vinicio Valentín Vélez Vázquez portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0350018388. Declaro ser el autor de la obra: “Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay sector la Concordia”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F: 

Vinicio Valentín Vélez Vázquez

C.I. 0350018388

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Ing. Cristian Arturo Vintimilla Ulloa, MSc.

DOCENTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

De mi consideración:

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: “Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay sector la Concordia”, realizado por: Boris Fabricio Cabrera Guillén, Vinicio Valentín Vélez Vázquez, con documentos de identidad: 0302633615, 0350018388, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil ha sido asesorado, orientado, revisado y supervisado durante su ejecución, bajo mi tutoría en todo el proceso, por lo que certifico que el presente documento, fue desarrollado siguiendo los parámetros del método científico, se sujeta a las normas éticas de investigación que exige la Universidad Católica de Cuenca, por lo que está expedito para su presentación y sustentación ante el respectivo tribunal.

Azogues, 24 de febrero de 2023



ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA, MSc

0105001564

DIRECTOR

Dedicatoria

*A mi señora madre **Isabel**, la mujer que nunca dio su brazo a torcer para que continúe con mis estudios, es el más grande ejemplo de amor, lealtad, respeto y fidelidad que puedo tener, a pesar de la distancia siempre está presente en mi corazón y todo mi esfuerzo va dedicado a ella para que se sienta orgullosa de su hijo que la ama.*

*A mi héroe **José Francisco Guillén** (+), quien me educó y me supo inculcar todos los valores para ser un hombre de bien, sé que desde el cielo me sigue cuidando y va para él todo mi trabajo.*

*A mi papi **Manuel**, quien a pesar de la distancia y circunstancias de la vida, siempre quiso verme como un profesional y me supo apoyar en todo, le dedico el resultado de mi trabajo y espero pronto poder reunirnos.*

*A mis tías **Rosa** y **Nube**, quienes estuvieron a mi lado en todo momento, me apoyaron y supieron darme el aliento necesario en los momentos más difíciles para poder culminar esta investigación.*

Fabricio Cabrera

Dedicatoria

*A mi mami **Claudia**, quien siempre ha creído en mi, me formó como persona y por más difíciles momentos que hemos pasado nunca se rindió para educarme, le dedico todo esto porque es la mujer que más admiro en este mundo. También a mi padre **Eduardo** (+) que desde donde sea que se encuentre cuidándome, sé que estará orgulloso del hombre que me he convertido.*

*A mi abuelita **Mercedes**, la mujer que siempre ha sido mi pilar fundamental, mi consejera y mi motivación. La persona más dulce, amorosa y entregada a su familia que puede existir, sin el apoyo de ella nada de esto sería posible.*

*A mi esposa **Abigail**, quien estuvo conmigo en todos los momentos de este proceso, al ser la persona que me amparó y soportó en aquellas malas noches estando a mi lado, porque siempre me demostró su amor y paciencia.*

*Para mi hija **Fiorella**, que es el regalo más bonito que llegó a mi vida, ya que por ella los motivos para salir adelante nunca faltan.*

*A mi hermano **Josúe** por sus consejos y enseñanzas, por no dejar de motivarme, ni tampoco dejarme solo en ningún momento; A mi pequeña hermana **Ma. Jesús** por sus palabras de aliento y porque quiero que encuentre su motivación.*

Valentín Vélez

Agradecimiento

Agradecemos a Dios por darnos la fuerza de voluntad y entereza para finalizar este trabajo de investigación, que nos permitió llegar a cumplir con nuestra meta más anhelada.

Un sincero agradecimiento a nuestro guía y tutor el Ing. Cristian Vintimilla por impartirnos sus enseñanzas, consejos, y conocimiento en cada tramo de este camino, ya que gracias a su sabiduría y generosidad logramos desarrollar una investigación de calidad.

Nos gustaría agradecer al grupo de estudiantes que nos ayudaron en el trabajo de campo y al Cuerpo de Bomberos de Azogues por brindarnos el equipo y la seguridad en una parte muy crucial de este trabajo de titulación.

Fueron muchas las personas que estuvieron cerca de nosotros durante todo este proceso con su amistad, consejos y amabilidad; a todas y cada una de ellas. Muchas gracias y Dios les bendiga.

BORIS, VALENTÍN

Resumen

Los puentes a lo largo de los años sufren afecciones en su estructura debido a los acontecimientos producidos por el cambio climático como grandes crecientes, por lo que es necesario una valoración no solo de los factores estructurales, sino también del aspecto hidrológico e hidráulico. La presente investigación está enfocada en evaluar las condiciones de estabilidad de los puentes de la avenida *16 de Abril* sector *La Concordia* mediante la modelización del comportamiento hidráulico del flujo con un evento extremo correspondiente a un periodo de retorno de 100 años y compararlo con tiempos de recurrencia tanto de 25 como 50 años.

Para alcanzar la modelización exitosa se realizaron estudios de campo, aforos de caudales, batimetrías y levantamiento topográfico con el fin de establecer la geometría de la zona, junto con la calibración del modelo hidráulico unidimensional *HEC-RAS*. Los resultados de esta investigación mostraron el comportamiento del flujo con una variación de caudales desde $47.9 \text{ m}^3/\text{s}$ referente a 25 años, $59.5 \text{ m}^3/\text{s}$ para 50 años, hasta el máximo de $85.6 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a un periodo de retorno de 100 años.

Finalmente, producto del análisis se asumió que los puentes motivo de estudio son estables hidráulicamente, sin embargo, para proteger las cimentaciones de las grandes velocidades se recomendaron opciones que se pueden implementar en futuros proyectos, siempre y cuando sean comprobadas con modelos físicos y matemáticos.

Palabras clave: Calibración del modelo, estabilidad, HEC-RAS, modelización hidráulica, puentes

Abstract

Over the years, bridges have suffered structural damage due to the events caused by climate change, such as major floods, so it is necessary to evaluate not only the structural factors but also the hydrological and hydraulic aspects. This research is focused on assessing the stability conditions of the bridges of “16 de Abril” Avenue, “La Concordia” sector, by modeling the hydraulic behavior of flow with an extreme event corresponding to a return period of 100 years and comparing it with recurrence times of both 25 and 50 years.

To achieve successful modeling, field studies, flow gauging, bathymetry, and topographic surveys were conducted to establish the geometry of the area, together with the calibration of the one-dimensional hydraulic model *HEC-RAS*. This investigation showed the flow behavior with a flow variation for $47.9 \text{ m}^3/\text{s}$ for 25 years, $59.5 \text{ m}^3/\text{s}$ for 50 years, up to a maximum of $85.6 \text{ m}^3/\text{s}$ corresponding to a return period of 100 years.

Finally, as a result of the analysis, it was assumed that the bridges under study are hydraulically stable. However, to protect the foundations from the high velocities, options were recommended that can be implemented in future projects as long as they are verified with physical and mathematical models.

Keywords: Model calibration, stability, HEC-RAS, hydraulic modeling, bridges

Índice general

1. Introducción	18
1.1. Introducción	18
1.2. Planteamiento del problema	19
1.2.1. Formulación del problema	19
1.2.2. Delimitación del problema	19
1.3. Justificación	21
1.4. Hipótesis	22
1.5. Objetivos	22
1.5.1. Objetivo general	22
1.5.2. Objetivos específicos	22
2. Marco Teórico	23
2.1. Generalidades	23
2.1.1. Río	23
2.1.2. Puentes	23
2.1.3. Requisitos generales de diseño en puentes	24
2.2. Topografía	24
2.2.1. Batimetría	25
2.3. Hidrología	26
2.3.1. Cuenca hidrográfica	26
2.3.2. Métodos para el relleno de datos de precipitación	31
2.3.3. Métodos estadísticos para precipitación	33
2.3.4. Precipitación media de una cuenca	38
2.3.5. Periodo de retorno	40
2.3.6. Método de <i>Dick Peschke</i>	40
2.3.7. Intensidad	40
2.3.8. Método del <i>Soil Conservation Service SCS</i>	41
2.3.9. Curvas IDF	43
2.3.10. Método de Bloques Alternos	43
2.3.11. Modelos hidrológicos	44
2.4. Modelamiento Hidráulico	46

2.4.1. Geometría del cauce	46
2.4.2. Coeficiente de <i>Manning</i>	46
2.4.3. Aforos	48
2.4.4. Estimación de caudal del río	54
2.4.5. Seguridad en vadeos	55
2.4.6. Lenguaje de programación <i>Python</i>	56
2.4.7. Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS)	57
3. Metodología	60
3.1. Ubicación de la zona de estudio	60
3.2. Análisis Hidrológico	61
3.2.1. Delimitación de la cuenca de aporte.	61
3.2.2. Características generales y morfológicas de la cuenca	62
3.2.3. Sistemas de drenaje	63
3.2.4. Parámetros de relieve	64
3.2.5. Análisis hidrometeorológico	67
3.2.6. Precipitación de diseño	73
3.2.7. Usos del suelo de la cuenca de aporte	78
3.2.8. Tipo de suelo	80
3.2.9. Tiempo de concentración y tiempo de retardo	81
3.2.10. Estimación del número de curva	81
3.2.11. Retención potencial máxima y cálculo de abstracción inicial	82
3.2.12. Cálculo del caudal en <i>HEC-HMS</i>	82
3.3. Análisis Hidráulico	83
3.3.1. Topografía	83
3.3.2. Granulometría de suelos	84
3.3.3. Aforos en el río <i>Burgay</i>	89
3.3.4. Aplicación de lenguaje de programación <i>Python</i>	95
3.3.5. Caudales aforados	95
3.3.6. Ejecución del programa <i>HEC-RAS</i>	101
4. Resultados	106
4.1. Resultados de modelización unidimensional en <i>HEC-RAS</i>	106
4.2. Discusión	115
5. Conclusiones	118
5.1. Recomendaciones	119
6. Bibliografía	121

7. Anexos	126
7.1. Tabla de valores críticos para el test de Kolmogorov-Smirnov	126
7.2. Aplicación test Kolmogorov-Smirnov	127
7.3. Número de curva de escorrentía	129
7.4. Coeficiente de escorrentía	129
7.5. Comparación de métodos en el programa computacional Hydrogno- mon 4	130
7.6. Gráficas de distribución que mejor se ajustan a cada serie de datos . .	131
7.7. Tamizadora de partículas gruesas	131
7.8. Valores de rugosidad típicos para cauces naturales	132
7.9. Matrices para el cálculo del coeficiente de rugosidad con el método de medición de velocidades	133
7.10. Datos procesados de cada día de aforo	142
7.11. Informes de resultados de estimación de caudal en el río Burgay - sector La Concordia	162
7.12. Levantamiento topográfico y aforos en el río Burgay	168

Índice de tablas

2.1. Valores comunes de compacidad [11].	27
2.2. Descripción de la cuenca según el valor de la densidad de drenaje [11].	28
2.3. Valores pendiente media de la cuenca [11].	29
2.4. Valores pendiente media del cauce[11].	29
2.5. Valores de masividad [11].	30
2.6. Clasificación del suelo para número de curva [24].	43
3.1. Parámetros generales de la cuenca.	62
3.2. Hidrografía de la cuenca para el orden de cada tramo de la red hídrica.	64
3.3. Características hidrográficas generales de la cuenca.	64
3.4. Pendiente media de la cuenca.	65
3.5. Pendiente media del cauce principal.	65
3.6. Cálculo de la curva hipsométrica.	66
3.7. Estaciones pluviométricas en la cuenca.	67
3.8. Datos de precipitación recolectados.	68
3.9. Relleno de precipitaciones para la estación Nudpud.	69
3.10. Cálculo de coeficientes a y b para ecuación de <i>Guapán</i>	70
3.11. Relleno de precipitaciones para la estación <i>Guapán</i>	71
3.12. Relleno de precipitaciones para la estación <i>Llaucay</i>	72
3.13. Resumen Test <i>Kolmogorov-Smirnov</i> de todas las estaciones.	73
3.14. Precipitaciones máximas para un período de retorno de 100 años cal- culadas en <i>Hydrognomon 4</i>	74
3.15. Precipitaciones de cada estación para un periodo de retorno de 100 años.	74
3.16. Precipitación máxima (24 horas) para periodo de retorno 100 años. .	75
3.17. Método de las isoyetas para cálculo de precipitación máxima.	76
3.18. Precipitaciones en 24 horas aplicando el modelo <i>Dick Peschke</i>	77
3.19. Intensidades de la cuenca.	78
3.20. Método de bloques alternos para construcción de hietograma.	79
3.21. Uso del suelo de la cuenca de aporte.	79
3.22. Tipo del suelo de la cuenca de aporte.	80

3.23. Cálculo del número de curva.	82
3.24. Granulometría de ensayo realizado para la muestra 1.	86
3.25. Granulometría de ensayo realizado para la muestra 2 y 4.	86
3.26. Granulometría de ensayo realizado para la muestra 3.	87
3.27. Diámetros efectivos calculados para cada muestra.	87
3.28. Estimación de n de <i>Manning</i> con ecuaciones empíricas.	87
3.29. Ponderación del coeficiente de <i>Manning</i> para cauce del río <i>Burgay</i>	89
3.30. Tirante y caudal aforado para el río <i>Burgay</i> - sector "La Concordia".	100
3.31. Condiciones de calibración.	104
4.1. Resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno en modelización <i>HEC-RAS</i>	106
7.1. Aplicación de prueba <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , estación <i>Condoryacu</i>	127
7.2. Aplicación de prueba <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , estación <i>Nudpud</i>	127
7.3. Aplicación de prueba <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , estación <i>Guapán</i>	128
7.4. Aplicación de prueba <i>Kolmogorov-Smirnov</i> , estación <i>Llaucay</i>	128
7.5. Elección de método de distribución para la estación <i>Condoryacu</i>	130
7.6. Elección de método de distribución para la estación <i>Nudpud</i>	130
7.7. Elección de método de distribución para la estación <i>Guapán</i>	130
7.8. Elección de método de distribución para la estación <i>Llaucay</i>	130
7.9. Coeficientes de rugosidad típicos para corrientes naturales[50].	132
7.10. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 1 en la sección 1.	133
7.11. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 2 en la sección 1.	134
7.12. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 3 en la sección 1.	134
7.13. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 4 en la sección 1.	135
7.14. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 5 en la sección 1.	136
7.15. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 1 en la sección 2.	137
7.16. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 2 en la sección 2.	138
7.17. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 3 en la sección 2.	139
7.18. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 4 en la sección 2.	140
7.19. Coeficiente de rugosidad calculado para el día 5 en la sección 2.	141

Índice de figuras

1.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	20
2.1. Esquema general de una batimetría [8].	25
2.2. Sistema jerárquico de <i>Strahler</i> [12].	28
2.3. Clasificación de curvas hipsométricas [11].	30
2.4. Relación y variables del método SCS [21].	41
2.5. Sección transversal del río dividida en franjas verticales [34].	50
2.6. Técnica para encontrar la línea de aforo perpendicular al flujo [39].	51
2.7. Método del vadeo [40].	52
2.8. Aforo por suspensión [40].	52
2.9. Molinete utilizado para aforos en laboratorio [35].	53
2.10. Método del diagrama de caja o bigotes [37].	54
2.11. Bibliotecas, funciones y módulos para <i>Python</i> [37].	57
3.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio.	60
3.2. Delimitación de la cuenca hidrográfica.	61
3.3. Orden de los ríos de la cuenca de aporte a los puentes.	63
3.4. Relieve de la cuenca de aporte.	64
3.5. Curva hipsométrica de la cuenca y frecuencias altimétricas.	66
3.6. Estaciones meteorológicas.	67
3.7. Correlación de la estación <i>Nudpud</i> con respecto a <i>Condoryacu</i>	69
3.8. Correlación de la estación <i>Guapán</i> con respecto a <i>Condoryacu</i>	71
3.9. Correlación de la estación <i>Llaucay</i> con respecto a <i>Condoryacu</i>	72
3.10. Polígono de Thiessen aplicado a la cuenca del proyecto.	75
3.11. Mapa de isoyetas de la cuenca de aporte.	76
3.12. Hietograma de precipitación de la cuenca.	78
3.13. Mapa de uso del suelo.	80
3.14. Mapa de tipo del suelo.	81
3.15. Hidrograma y resultados alcanzados en software HEC-HMS.	83
3.16. Topografía, alineamientos y secciones transversales de la zona de estudio.	84

3.17. Lugares de recolección de muestras para ensayos de granulometría.	85
3.18. Curva granulométrica y diámetros efectivos de muestras ensayadas.	88
3.19. Sitios seleccionados para los aforos.	90
3.20. Molinete de copas.	91
3.21. Capacitación en temas de seguridad por parte del <i>Cuerpo de Bomberos del Cantón Azogues</i>	92
3.22. Establecimiento de línea de referencia en secciones para aforos.	93
3.23. Formato de toma de datos en campo [37].	94
3.24. Formato de entrada para datos en programa <i>Python</i> [37].	94
3.25. Ventana de interacción luego de ejecutar el programa [37].	95
3.26. Distribución de velocidades de la sección S1.	96
3.27. Distribución de velocidades de la sección S2.	97
3.28. Diagrama de caja o análisis de velocidad en la sección S1.	97
3.29. Diagrama de caja o análisis de velocidad en la sección S2.	98
3.30. Ubicación de puntos de aforo en la sección S1 del río <i>Burgay</i>	99
3.31. Ubicación de puntos de aforo en la sección S2 del río <i>Burgay</i>	99
3.32. Correlación entre datos de caudal de secciones aforadas.	100
3.33. Topografía ingresada a <i>HEC-RAS</i>	101
3.34. Ingreso de coeficientes de <i>Manning</i> en <i>HEC-RAS</i>	102
3.35. Menú de entrada para flujo no permanente en <i>HEC-RAS</i>	102
3.36. Ingreso de datos para flujo no permanente.	103
3.37. Menú de análisis para flujos no permanentes.	103
3.38. Simulación del modelo calibrado.	105
4.1. Perfil longitudinal para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.	108
4.2. Velocidades para periodos de retorno de 25, 50, 100 años.	110
4.3. Secciones para periodos de retorno de 25, 50, 100 años.	112
4.4. Modelo tridimensional para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.	113
4.5. Relación de tirantes para diferentes periodos de retorno.	114
4.6. Videos de simulación del modelo con un flujo no permanente.	114
7.1. Valores críticos Test <i>Kolmogorov-Smirnov</i> [18].	126
7.2. Número de curva de escorrentía para uso selecto de tierras [21].	129
7.3. Coeficiente de escorrentía para diferentes uso de suelo en relación a su pendiente [21].	129
7.4. Gráficas de distribución que mejor se ajusta para cada estación.	131
7.5. Tamizadora utilizada para análisis granulométrico de partículas gruesas.	131
7.6. Aforos en la sección S1 - día 1	143
7.7. Aforos en la sección S2 - día 1	145
7.8. Aforos en la sección S1 - día 2	147

7.9. Aforos en la sección S2 - día 2	149
7.10. Aforos en la sección S1 - día 3	151
7.11. Aforos en la sección S2 - día 3	153
7.12. Aforos en la sección S1 - día 4	155
7.13. Aforos en la sección S2 - día 4	157
7.14. Aforos en la sección S1 - día 5	159
7.15. Aforos en la sección S2 - día 5	161
7.16. Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 12/11/2022 . .	162
7.17. Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 18/11/2022 . .	163
7.18. Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 19/11/2022 . .	164
7.19. Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 25/11/2022 . .	165
7.20. Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 30/11/2022 . .	166
7.21. Trabajos de topografía y aforos realizados en campo.	171

Sección 1

Introducción

1.1. Introducción

Los últimos fenómenos hidrológicos ocurridos en el austro ecuatoriano debido a condiciones climáticas adversas han provocado el desbordamiento del agua que fluye a través del río *Burgay* en la ciudad de *Azogues*, generando grandes pérdidas económicas y materiales, a su vez la falta de estudios hidrológicos e hidráulicos actualizados limitan la capacidad de los profesionales para la implementación de obras de protección eficientes que salvaguarden la integridad de los residentes y las estructuras construidas en las zonas aledañas al lecho.

El colapso del antiguo puente del ferrocarril en el sector *La Concordia* fue una de las consecuencias del aumento del caudal del río *Burgay*, por ello surge la necesidad de evaluar las condiciones de estabilidad de los puentes construidos en la avenida *16 de Abril* para establecer criterios del nivel de vulnerabilidad que puedan presentar dichas estructuras.

Con el fin de determinar estas condiciones se pretende analizar los aspectos físicos, hidrológicos e hidráulicos, a través de la caracterización geomorfológica del cauce, establecimiento de caudales y estimación del comportamiento hidráulico, para definir los eventos hidrológicos más perjudiciales que puedan afectar la estructura de los puentes dando criterios que evalúen la estabilidad como el nivel de gálibos, planos de inundación, velocidades del flujo de agua que puedan causar erosión, o posibles socavaciones.

El análisis hidráulico de los puentes sobre el río *Burgay* sentará las bases de nuevos proyectos y permitirá a diferentes profesionales desarrollar e implementar posibles obras de protección que beneficien a los habitantes de la ciudad de *Azogues*, mejorando la seguridad en las obras hidráulicas actuales y futuras.

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. Formulación del problema

América Latina y el *Caribe* están dentro de las regiones más propensas a desastres naturales en el mundo, según los informes emitidos por la *Oficina de Coordinación de Asuntos Humanitarios (OCHA)* las inundaciones son los desastres más habituales en dichas regiones, dicho fenómeno ha provocado el fracaso de muchas estructuras hidráulicas como los puentes, los cuales han suscitado innumerables pérdidas económicas y humanas al momento de la falla.

La región austral del *Ecuador* también se ha visto afectada por estos acontecimientos debido a las condiciones invernales cada vez más severas en los últimos años, por ende el río *Burgay* de la ciudad de *Azogues* está experimentando aumentos considerables en su caudal provocando diversos daños, tales como la destrucción de muchas viviendas en el sector aledaño al mercado *Sucre*, daños a la vialidad, fracasos en infraestructura hidrosanitaria y el colapso del puente patrimonial del ferrocarril en la avenida *16 de Abril* sector *La Concordia*.

Hoy en día no existen investigaciones completas, validadas ni debidamente fundamentadas en entidades públicas o bases digitales de la ciudad de *Azogues* en cuanto a estudios de estabilidad para los puentes sobre el río *Burgay*, esto genera limitaciones a los profesionales para mitigar los problemas que pueden ocurrir por diferentes fenómenos hidrometeorológicos.

Por lo tanto, el problema que motiva el presente trabajo de titulación es la ausencia de un estudio que evalúe la estabilidad y seguridad de los puentes del sector *La Concordia*, lo cual provoca dudas e incertidumbre en cuanto a la correcta funcionalidad de los mismos, puesto que su infraestructura está expuesta a diferentes peligros como gálidos pequeños, arrastre de sólidos, cambios bruscos de velocidades, posibles socavaciones en estribos, entre otros.

1.2.2. Delimitación del problema

La presente investigación busca determinar criterios de estabilidad de los puentes en el sector de *La Concordia*, mediante la determinación de los coeficientes de rugosidad del cauce, para lo cual se requiere los ensayos de clasificación de suelos, granulometría y plasticidad basados en la normativa internacional *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Consecuentemente, se efectuará el levantamiento topográfico para conocer la morfología de la zona, la cual apoyada con un modelo digital del terreno (MDT) de buena resolución servirá para obtener la caracterización del cauce.

En cuanto al enfoque hidrológico se aplicará el modelo *HEC-HMS*, así como la metodología *Soil Conservation Service (SCS)* para determinar el caudal máximo, caracterizar la cuenca aportante y estimar las condiciones extremas a las que estará sometido el cuerpo de agua. En lo referente a la hidráulica se buscará estimar los caudales a través de la modelización unidimensional en *HEC-RAS* para simular el comportamiento del agua en diferentes periodos de retorno, abarcando una extensión de doscientos metros, con dos secciones aguas arriba y aguas abajo cada cincuenta metros en base a la normativa *NEVI 12*, los *Trabajos de Topografía* dados por la *Agencia Vasca del Agua* y el *Manual de Puentes* del *Ministerio de Transporte y Comunicaciones de Perú*.

Toda la información recopilada en el presente trabajo debe ser suficiente para proporcionar diversos criterios actuales de estabilidad de los puentes y su incidencia tanto en la seguridad, como la funcionalidad, sentando las bases para la implementación de futuras medidas de prevención o mitigación en estos puentes.

Definición de la zona de estudio.

El lugar de estudio está ubicado en el austro ecuatoriano, al sur de la ciudad de *Azogues* provincia del *Cañar* en el sector *La Concordia*, sobre la avenida *16 de Abril*, a pocos metros del colegio *Santa Marianita de Borrero* y de la hosteria *La Concordia*. En la Figura 1.1 se indica que la zona delimita al norte con la ciudad de *Azogues*, al este con *Charasol* sector *Cruz Loma*, al sur con *Charasol* y al oeste con *Bellavista*. Los puentes son relativamente nuevos, fueron construidos en el año 2018 y sirven como conectores entre la ciudad de *Azogues* y la parroquia *Borrero*.

Ubicación de la zona de estudio

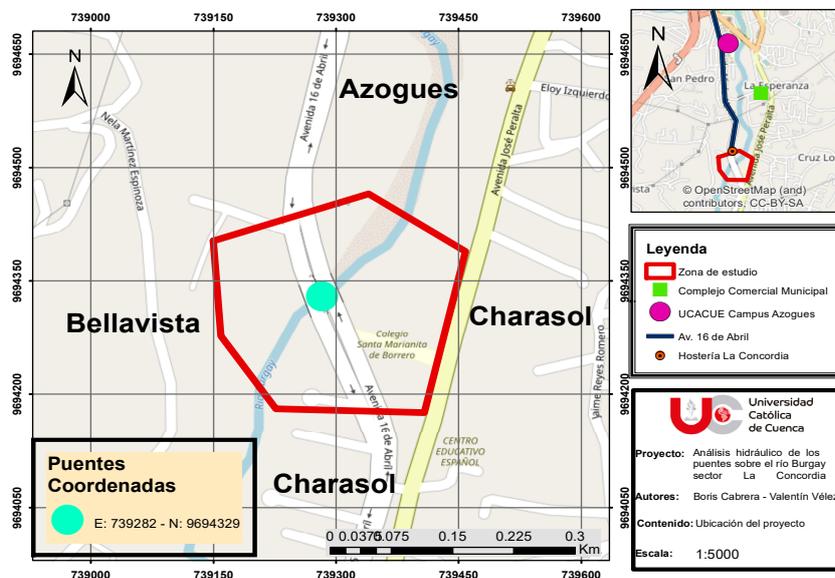


Figura 1.1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

1.3. Justificación

Debido a la necesidad de una actualización en los estudios de estabilidad en los puentes de la avenida *16 de Abril* surge esta investigación que busca establecer criterios precisos en diferentes ámbitos ingenieriles, los cuales permitan evaluar las condiciones físicas, hidrológicas e hidráulicas de los puentes ante las últimas crecientes que ha experimentado la ciudad, a fin de evitar futuros daños en su estructura y de igual forma prevenir nuevos desastres en las zonas adyacentes al lugar de estudio.

Los estudios hidrológicos e hidráulicos se caracterizan por permitir la estimación de condiciones extremas que puedan suscitarse en un lugar específico, por lo que, los profesionales en base a esta investigación tendrán la capacidad de implementar medidas de mitigación o control para ejecutar proyectos que beneficien a los residentes del sector *La Concordia* y los habitantes de la ciudad de *Azogues* en general.

Brindar metodologías que ayuden a estimar las condiciones más desfavorables que puede presentar el flujo de agua que atraviesa estos puentes, previniendo futuros fenómenos que influyan en su estabilidad, así mismo toda la información generada permitirá sentar las bases y fundamentos que servirán para la ejecución de proyectos más complejos en el mejoramiento de la estructura de los puentes en *Azogues*, ya que estos son los enlaces entre las diferentes parroquias del cantón por lo que tienen que ser eficaces, funcionales y sobre todo seguros.

El desarrollo de esta investigación es factible debido a la existencia de múltiples normativas como la de *AASHTO Drainage Manual* y *Especificaciones AASHTO para el Diseño de Puentes por el Método LRFD* que especifican los procedimientos a realizarse para el análisis general en la construcción de puentes, lo que ayudará a tener una visión global de la metodología que se aplicará. Además, se cuenta con datos de precipitación de diferentes estaciones meteorológicas de la ciudad disponibles en la *Empresa Pública Municipal de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Ambiental (EMAPAL-EP)*, de igual manera el *Instituto Geográfico Militar (IGM)* posee una amplia base de información digital sobre el uso de suelo y modelo digital del terreno (MDT) de toda la región. El acceso libre a programas computacionales de modelización hidrológica y modelos hidráulicos como el *HEC-HMS* y *HEC-RAS* respectivamente, permitirán la estimación de los eventos extremos que puedan ocurrir en la zona de estudio.

La *Universidad Católica de Cuenca, campus Azogues* dispone de los equipos topográficos necesarios para realizar el estudio técnico-descriptivo del terreno sobre el cual se asientan los puentes, actividad que se podrá realizar con el apoyo de los estudiantes de *Ingeniería Civil* que cursarán sus prácticas pre-profesionales.

1.4. Hipótesis

Los puentes del sector *La Concordia* son estables frente a los fenómenos hidrológicos e hidráulicos más perjudiciales que puedan ocurrir a lo largo de su vida útil.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar las condiciones de estabilidad para los puentes de la avenida *16 de Abril* sobre el río *Burgay* sector *La Concordia* mediante el análisis de los aspectos físicos, hidrológicos e hidráulicos que pueden alterar su infraestructura, para determinar la vulnerabilidad de los puentes motivo de estudio.

1.5.2. Objetivos específicos

- Definir las características geomorfológicas del cauce, a través de un levantamiento topográfico de la zona y ensayos de laboratorio, para establecer su configuración física, así como las afecciones que puedan incidir en la estabilidad estructural de los puentes.
- Determinar los caudales máximos y mínimos de la cuenca aportante al río Burgay, mediante el empleo de modelos lluvia-escurrimiento aplicando modelización en HEC-HMS, para definir los eventos hidrológicos extremos presentes en la cuenca.
- Estimar el comportamiento hidráulico del lecho del río, a través de la aplicación del modelo numérico unidimensional *HEC-RAS*, para determinar riesgos de inundaciones en el sector y zonas vulnerables a posibles socavaciones.

Sección 2

Marco Teórico

2.1. Generalidades

2.1.1. Río

Ochoa [1] define a los ríos como corrientes de agua que puede presentar diversas condiciones, ya sean esporádicas, permanentes o irregulares que se forman a partir de un cauce por donde recorre un flujo que acarrea consigo sedimentos y material sólido; además establece que para garantizar el movimiento de personas y vehículos a través del lecho de un río se construyen obras civiles que forman un cruce. Por lo general dichas obras civiles pueden ser los puentes acompañados de terraplenes, accesos o estructuras de protección.

2.1.2. Puentes

Un puente se define como una estructura que sirve para dar continuidad a una carretera que se encuentra interrumpida por cuerpos naturales como ríos, quebradas, arroyos, desniveles u obstáculos antrópicos que causen una perturbación física del terreno [2], estas obras constan de dos partes: infraestructura y superestructura [3]. Para asegurar la vida útil de la estructura del puente es necesario la intervención de varios estudios, para que este no sea afectado por factores hidráulicos, geotécnicos o estructurales como lo indican *Hasan y Elwakil [4]*.

Partes de un puente

Infraestructura: Comprende todos los elementos utilizados para transmitir las cargas producidas por los tramos superiores del puente al suelo. Generalmente los componentes de la infraestructura son: pilas, muros, estribos, sistema de apoyo y sistemas de drenaje.

Superestructura: Está conformada por los elementos que definen al puente, y reciben las cargas producidas generalmente por vehículos o el tipo de servicio para el cual fue construido el puente. Los elementos más importantes son: vigas, diafragmas, losa y tablero.

2.1.3. Requisitos generales de diseño en puentes

Previo a la ejecución del proyecto en su forma tangible es necesario realizar una serie de análisis de todos los factores que inciden en el puente de forma directa o indirecta y que pueden afectar tanto a la estructura como al funcionamiento del mismo, *Marengo* [5] en su libro publicado en el 2019 expone que los estudios preliminares más importantes son los topográficos, hidrológicos, geotécnicos y estructurales.

Los estudios topográficos se enfocan en la caracterización del terreno constituido por el trabajo in-situ y el trabajo de gabinete que realiza el topógrafo [5], en cuanto al análisis hidrológico los parámetros fundamentales a tener en cuenta según lo expuesto por *Álvarez y Calle* [6] son las precipitaciones y flujo de escorrentía superficial de la cuenca, respaldados por información dada por características hidrológicas netas de la cuenca como la intensidad, altura y duración de lluvias, tiempo de concentración, datos meteorológicos del sector, entre otros, los cuales sirven para construir curvas IDF (Intensidad, Duración, Frecuencia), hietogramas de precipitación y finalmente con la aplicación tanto de diversas herramientas como metodologías, estimar los caudales.

También existen los estudios geotécnicos que se centran en la inspección del suelo, ensayos físicos de laboratorio, socavación en cauces, asentamiento, empuje de tierras y capacidad portante del suelo; a su vez en el diseño estructural se toman en cuenta aspectos como vehículo de diseño, cálculo de cargas muerta, vivas y sísmicas, combinaciones de cargas, cálculo de diagrama de momentos y cortante, dimensionar los elementos estructurales, planos detallados [5].

2.2. Topografía

En la topografía se aplica la recolección de datos y mediciones en la superficie del terreno con el objetivo de representar gráficamente su morfología en un plano a una escala determinada que dependerá de las necesidades del proyecto [7].

Existen muchas ramas de la topografía centradas en el estudio del relieve con diferentes condiciones, cuando se analiza zonas que contienen cuerpos de agua será aplicable la batimetría, la cual para este caso, no es más que el levantamiento topográfico del cauce de río siguiendo ciertas normas o recomendaciones [8].

2.2.1. Batimetría

Cuando se trata del estudio de un puente o cualquier estructura hidráulica que se encuentre emplazada en el lecho de un río, *Gallardo* [8] enfatiza que la batimetría es el primer paso que se debe seguir como parte del procedimiento para la obtención de un modelo hidráulico, su objetivo es definir la geometría del cauce y las llanuras de inundación por medio de los perfiles transversales que se disponen perpendicularmente a las líneas del flujo, empleando para ello en las zonas urbanas una separación de cincuenta metros y en las rurales de cien.

A su vez, *Gallardo* [8] también menciona que tanto los trabajos de batimetría y topografía de estructuras se pueden realizar con procedimientos de la topografía clásica utilizando la estación total, debido a que, cuando el número de puntos a medir no es muy amplio y las profundidades del río son relativamente pequeñas, se puede hacer la medición directamente con el jalón sobre el límite sólido.

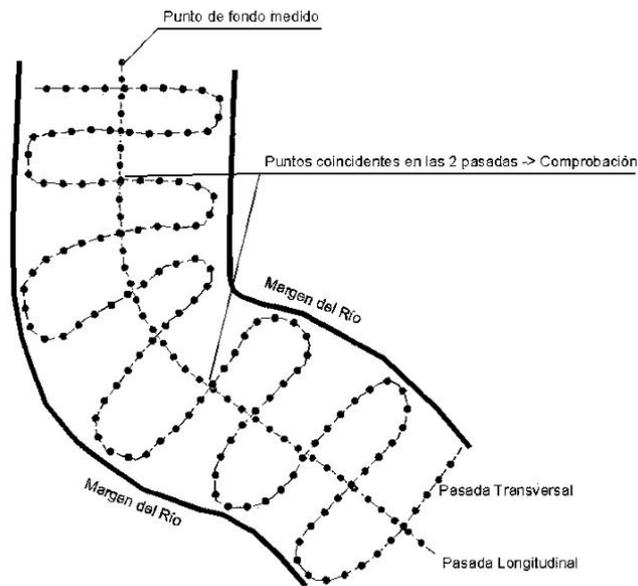


Figura 2.1: Esquema general de una batimetría [8].

La Figura 2.1 esquematiza de manera general como se realiza una batimetría con jalón, por lo tanto, la toma de coordenadas para una batimetría debe hacerse en una serie de perfiles transversales al eje del lecho no separados entre sí más de diez metros y tomando puntos cada tres metros en el sentido que se realiza la pasada, de la misma forma se levanta una serie de puntos en sentido longitudinal al río con una distancia no mayor a dos metros entre ellos [8].

2.3. Hidrología

2.3.1. Cuenca hidrográfica

El estudio hidrológico se complementa con la delimitación de la cuenca hidrográfica, que según *Vásquez et al.* [9] es el área de un terreno determinada topográficamente, con la capacidad de drenar todos sus sistemas hacia un punto por un río principal. Para una correcta estimación de la cantidad de agua que fluye a través de una cuenca es sumamente necesario contar con los datos hidrometeorológicos de un tiempo considerable. En el ámbito hidrológico la cuenca cumple la función de complementar las fuentes de agua superficiales y subterráneas, así como la capacidad de distribuir a lo largo de la cuenca todo el recurso hídrico producto de la precipitación.

Características de una cuenca hidrográfica

Identificar las características de la cuenca permitirá describir su comportamiento frente a posibles fenómenos hidrológicos [10].

- **Área de drenaje**

Es la proyección de la superficie delimitada por las líneas divisorias dependiendo de la extensión que se requiera analizar. El procedimiento más simple para definir el drenaje de una cuenca se realiza a partir de cartas topográficas, en el caso de *Ecuador* estos mapas de relieve se encuentran en el *Instituto Geográfico Militar (IGM)* [9].

- **Perímetro**

Corresponde a la longitud total de las divisorias que delimitan la cuenca motivo de estudio, generalmente se expresa en km[9].

- **Longitud del río principal**

Es aquel río con la longitud más extensa en todos los tramos de la cuenca [9].

- **Longitud axial y ancho de la cuenca** Es la distancia entre los puntos más alejados de la cuenca hidrográfica [11].

Por otra parte, el ancho de la cuenca se calcula mediante la relación entre el área de la cuenca A y la longitud axial La [9]. Como muestra la ecuación 2.1.

$$w = \frac{A}{La} \quad (2.1)$$

■ Parámetros de forma

Compacidad o Coeficiente de Gravelius (Kc)

Este coeficiente establece la forma e interpretación ambiental de la cuenca relacionando su perímetro con el área de un círculo teórico de igual magnitud al área de la cuenca, como indica la ecuación 2.2, donde A es el área de la cuenca en km^2 , P su perímetro en km y Kc el coeficiente de compacidad [11].

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (2.2)$$

Con base a las investigaciones realizadas por *Zhicay* [11] se ha definido las clases de coeficientes en función a su valor, la Tabla 2.1 indica esta clasificación.

Tabla 2.1: Valores comunes de compacidad [11].

Clase (Kc)	Kc	Descripción	Tendencia
I	1 - 1.25	Poco redonda a oval - Redonda	Alto riesgo de inundaciones
II	1.25 - 1.5	Oval redonda a oval - Alargada	Medio riesgo de inundaciones
III	1.5 - 1.75	Oval alargada a alargada	Bajo riesgo de inundaciones
IV	>1.75	Alargada	Conservación

■ Sistemas de drenaje

Orden de los ríos

El orden de los ríos brinda el grado de ramificación de una cuenca, la unificación de ríos de orden 1 forman un río de orden 2 y así sucesivamente.

En 1952, *Strahler* planteó una metodología que divide la red hídrica en ríos de diverso orden, cuando dos o más cauces de diferente orden se unen se tomará el valor del orden más alto. Mientras mayor sea la jerarquía de la cuenca más alto es el nivel erosivo [11]. La Figura 2.2 ilustra de manera general el orden otorgado a cada río y la bifurcación de la red hídrica.

La tipología dada por *Zhicay* [11] respecto al orden de los ríos se clasifica en baja, media y alta; la primera considera órdenes 1-2, la segunda de 2.1 a 4, finalmente la tercera va desde 4.1 hasta 6. Los rangos indican la edad y el nivel de erosividad de una cuenca.

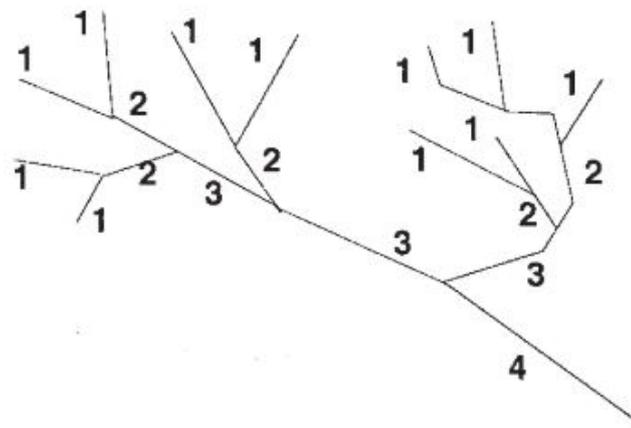


Figura 2.2: Sistema jerárquico de *Strahler* [12].

Densidad de drenaje

Relaciona las distancias de todas las corrientes y el área que ocupan en la cuenca [9]. La ecuación 2.3 presenta esta relación donde la densidad de drenaje se denota con Dr , la longitud de los cauces L en kilómetros y A es el área de la cuenca (km^2).

$$Dr = \frac{\sum L}{A} \quad (2.3)$$

La caracterización de la cuenca en base a la densidad del drenaje se puede inferir a partir de los rangos establecidos en la Tabla 2.2, la misma que esta basada en los criterios de la metodología dada por *Strahler-Horton*.

Tabla 2.2: Descripción de la cuenca según el valor de la densidad de drenaje [11].

Densidad de drenaje		
Valor (Km/Km2)	Descripción	Situación
Menor a 1	Bajo	Aumento de la infiltración y poca escorrentía
1 - 2	Moderado	Escorrentía media
2 - 3	Alto	Alta tendencia a inundarse
Mayor a 3	Muy Alto	Alta erosión, alta escorrentía

■ Condiciones de relieve

1. Pendiente media de la cuenca

Es un factor relacionado con el escurrimiento superficial, humedad del suelo e infiltración, autores como *Zhicay* [11] recalcan que cuando esta variable aumenta, también se incrementa el riesgo de erosión producto del crecimiento de la velocidad de escurrimiento. Para calcular este parámetro se sigue la ecuación 2.4 del método de *Alvord*, la misma define J como

la pendiente media de la cuenca (%), L_i es la longitud de las curvas de nivel (km), E es la equidistancia entre curvas de nivel (km) y A es el área total de la cuenca (km^2).

$$J = 100 * \frac{\sum L_i * E}{A} \quad (2.4)$$

La Tabla 2.3 indica el rango de valores de la pendiente media de la cuenca junto con la descripción de cada uno.

Tabla 2.3: Valores pendiente media de la cuenca [11].

Valores de Pendiente (%)	Significado
0-4	Nula o casi nula
4-8	Levemente inclinada
8-15	Levemente inclinada a moderadamente empinada
15-25	Moderadamente inclinada
25-50	Inclinada
50-75	Muy inclinada
>75	Demasiado inclinada

2. Pendiente media del cauce principal

Este valor se consigue restando las elevaciones entre dos puntos, sobre la extensión total del cauce principal [11]. La ecuación 2.5 presenta j como la pendiente media del cauce (%), DC es el desnivel entre cotas y L es la longitud del río principal (km). A su vez la tabla 2.4 determina la clase de pendiente que se tiene según el valor calculado.

$$j = \frac{DC}{L} \quad (2.5)$$

Tabla 2.4: Valores pendiente media del cauce[11].

Valores de Pendiente (%)	Tipos
<10	Ligera
10-30	Normal
>30	Brusca

3. Curva hipsométrica

Es la representación gráfica de la diferencia de alturas presentes en una cuenca, se construye a partir de la información proporcionada por el *Modelo Digital de Elevaciones (MDE)* [11]. Las curvas hipsométricas varían según la edad del río, la Figura 2.3 muestra los tipos de curvas que se

forman según la evolución de cada uno.

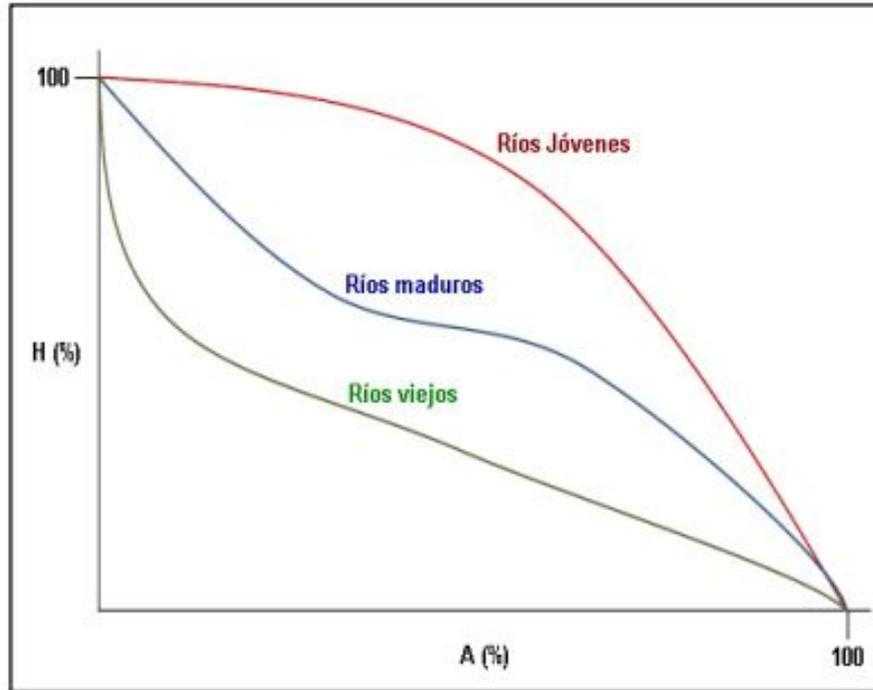


Figura 2.3: Clasificación de curvas hipsométricas [11].

4. Coeficiente de Masividad

Este parámetro se define como la razón entre la altura media de la cuenca (H_m) en metros y el área total de la cuenca (AT) expresado en km^2 , demostrado en la ecuación 2.6, además la Tabla 2.5 muestra el rango de valores para cada tipo de masividad.

$$K_m = \frac{H_m}{AT} \quad (2.6)$$

Tabla 2.5: Valores de masividad [11].

Valores en kilómetros	Tipo de masividad
0-35	Muy accidentada
35-70	Accidentada
70-105	Poco accidentada

■ Usos del suelo

Es importante establecer el uso de cada suelo de una cuenca hidrográfica debido a que este puede influir en el ciclo y la calidad del agua, en el caso de que una cuenca tenga una densidad poblacional considerable la cantidad de agua que se

infiltración será mucho menor que otra simplemente de uso agrícola lo que conlleva a riesgos de inundación [9].

■ Tiempo de concentración

Se define como el tiempo generalmente en horas que una gota de agua tarda en llegar al punto de drenaje del proyecto desde la zona más elevada de la cuenca. *Cano* [13] en su investigación indica que la ecuación de *Kirpich* es la más simple y presenta resultados aceptables. De la fórmula 2.7 T_c es el tiempo de concentración (minutos), S es la pendiente media del cauce principal y L representa la longitud del río principal (m).

$$T_c = 0.02 * \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \quad (2.7)$$

■ Tiempo de retardo

El tiempo de retardo según expone *Villón* [14] representa el 60 % del tiempo de concentración como indica la ecuación 2.8.

$$T_r = 0.6 * T_c \quad (2.8)$$

2.3.2. Métodos para el relleno de datos de precipitación

Existen varias metodologías para el relleno de datos incompletos provenientes de la guías de la *Organización Meteorológica Mundial (OMM)* donde se presenta procesos estadísticos para la complementación de datos faltantes como la razón Q, regresión lineal y la razón normal, siempre manteniendo la linealidad en la relación de los parámetros que ocupa cada modelo [15].

Método de Razón Q

El método de la razón Q utiliza dos estaciones meteorológicas una con datos completos y otra con los datos faltantes, consiste en dividir la suma de las precipitaciones de la estación incompleta **B** para la sumatoria de la estación completa **A**, este cociente Q_r posteriormente se multiplicará por las precipitaciones correspondientes a la estación **A** del mismo año para encontrar las mediciones carentes b_i [16], estas expresiones se muestran en las ecuaciones 2.9 y 2.10 respectivamente.

$$Q_r = \frac{\sum b_i}{\sum a_i} \quad (2.9)$$

$$b_i = Q_r * a_i \quad (2.10)$$

Método de regresión lineal

Este método es ampliamente utilizado debido a sus estimaciones confiables, el método determina una ecuación que muestra la interacción entre los datos de dos variables distintas, por lo que se puede definir una relación para definir los datos no conocidos [17]. La ecuación 2.11 es de la recta, donde los coeficientes a y b se calculan a partir de las ecuaciones 2.12 y 2.13 respectivamente, donde n es el número de datos completos, y_i el promedio de las dos estaciones y x_i las precipitaciones de la estación incompleta.

$$y = a + b * x \quad (2.11)$$

$$a = \bar{y}_i - b * \bar{x}_i \quad (2.12)$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2.13)$$

Método de razón normal

Este procedimiento estima los datos a partir de una ponderación de las precipitaciones anuales partiendo de un promedio de las estaciones más cercanas entre sí, el registro de lluvia carente P_c se estima con la ecuación 2.14 donde N es el número de estaciones en la muestra; pb , pc y pn son las precipitaciones medidas de las estaciones; y LA , LB , LC , LN promedio de lluvias anuales de cada estación [17].

$$P_c = \frac{1}{N} \left[\frac{LA}{LB} pb + \frac{LA}{LC} pc + \dots + \frac{LA}{LN} pn \right] \quad (2.14)$$

2.3.3. Métodos estadísticos para precipitación

Los datos obtenidos en estaciones pluviométricas generalmente presentan cierta discrepancia entre los profesionales encargados de dar validez a los mismos, por esto es necesario realizar una estandarización de los datos de precipitaciones mediante métodos estadísticos confiables, con el propósito de evitar errores sistemáticos y ratificar o no el uso de los mismos [18].

Ley empírica de Weibull

Es un parámetro estadístico que requiere la organización de los datos de cualquier evento hidrológico a analizarse de mayor a menor cuando se requiere calcular la probabilidad de excedencia $P(X \geq x)$, en cambio para determinar la probabilidad de no excedencia $P(X < x)$ los datos se ordenan de menor a mayor. La ecuación 2.15 rige esta ley, donde T es el período de retorno, n el número de datos analizados y M se define como el número de orden de los datos [14].

$$T = \frac{n + 1}{M} \quad (2.15)$$

Para la elección del modelo apropiado de distribución teórica es necesario experimentar con varios de ellos hasta alcanzar el que presente menor error en el cálculo, una vez seleccionado se procede a estimar los eventos hidrológicos que se requiera para diferentes periodos de retorno y siguiendo la metodología del método elegido. Villón [19] en su libro *Hidrología estadística* indica que para alcanzar la confiabilidad de los datos generalmente se debe seguir el siguiente proceso, primero se debe obtener los datos objeto de estudio generalmente la precipitación de la zona que se pretende analizar, luego elegir un método de distribución teórico, estimar los parámetros del mismo, consecuentemente aplicar la prueba de bondad de ajuste para comprobar su normalidad y finalmente aplicar el modelo de distribución.

Para casos hidrológicos las distribuciones que se usan para eventos máximos según *Máximo Villón* [19] generalmente son: Distribución Normal, LogNormal, Gamma, LogPearson tipo III y Gumbell.

Distribución Normal

También se la conoce con el nombre de distribución Gaussiana, se usa para calcular variables hidrológicas con periodos de retorno grandes cuando se cuenta con datos mensuales, anuales, entre otros. Al ser una distribución empírica la información sobre caudales o precipitaciones no siempre son muy certeras [19].

La función que denota esta distribución se muestra en la 2.16. Los parámetros necesarios para este modelo son X y S , explicados en las ecuaciones 2.17 y 2.18 respectivamente. X es el parámetro de posición, N representa el número de datos, X_i indica cada dato x motivo del análisis hidrológico y S se conoce como el parámetro de escala, estas medidas generalmente están asociadas a la media aritmética y desviación estándar de la muestra de datos.

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-X}{S}\right)^2} dx \quad (2.16)$$

$$X = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i \quad (2.17)$$

$$S = \left(\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (X_i - X)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

Distribución LogNormal

La forma general de este tipo de distribución es $y=ln(x)$, para el caso log-normal se asocian dos clases de distribuciones, la de dos y tres parámetros, donde su diferencia es que en la última su límite inferior X_0 está en función de la variable de posición. El problema que muchas veces presenta esta metodología es cuando los datos de precipitación presentan un valor de cero, es decir no llueve, para esto se recomienda sumar una unidad a estas cifras para evitar problemas con los logaritmos [19]. La función densidad de este tipo de distribución se indica en la 2.19, siendo x la variable del evento hidrológico. Los principales parámetros que requiere este método son los especificados en las ecuaciones 2.19 y 2.20, donde μ_y es el parámetro de escala y σ_y el de forma. Están en función de x la variable aleatoria y Cv el coeficiente de variación propio del método. El evento de diseño se calcula con la ecuación 2.22, donde Z es la variable estandarizada calculada en tablas y E es la variable de diseño.

$$F(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma_y} \int_0^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2} dx \quad (2.19)$$

$$\mu_y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{x^{-2}}{1 + Cv^2} \right) \quad (2.20)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\ln(1 + C_v^2)} \quad (2.21)$$

$$Z = \frac{\ln(E) - \mu_y}{\sigma_y} \quad (2.22)$$

Distribución Gamma

Es una de las más usadas en temas hidrológicos, al igual que la distribución Log-Normal influyen dos parámetros para su cálculo, en este caso γ y β , donde X es la media aritmética. La ecuación que demuestra su función es la 2.23, en la cual los parámetros están en función de la variable aleatoria x . Por otro lado, $\Gamma(\gamma)$, hace referencia a la función gamma completa y se determina mediante tablas en función de γ y la variable hidrológica correspondiente. Su uso está ligado a la determinación de precipitaciones mensuales, anuales, caudales, entre otros eventos hidrológicos [19] mediante la ecuación 2.26, donde E es el evento de diseño, X^2 es el valor chi cuadrado dado en tablas en función de γ . Las ecuaciones más importantes son las descritas a continuación.

$$F(x) = \int_0^x \frac{x^{\gamma-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)} dx \quad (2.23)$$

$$\gamma = \ln X \quad (2.24)$$

$$\beta = \frac{X}{y} \quad (2.25)$$

$$E = \frac{\beta * X^2}{2} \quad (2.26)$$

Distribución log-Pearson tipo III

Se define como un tipo de distribución que se usa con datos asimétricos, su función es establecer la distribución de probabilidad de eventos hidrológicos extremos, difiere de otros métodos en que las variables como desviación estándar, media

aritmética y coeficiente asimétrico son calculados con los logaritmos en base 10 de los datos crudos originales de cada estación[19].

La ecuación 2.28 indica el parámetro de forma γ , C_S es el coeficiente de sesgo, x es la variable de la serie de datos, la fórmula 2.29 indica la medición de escala β , S es la desviación estándar, y la ecuación 2.30, usa el promedio aritmético representado por X para encontrar x_o conocido como el parámetro de posición. Finalmente todos los parámetros influyen en la función densidad de la distribución log-Pearson tipo III testificada en la ecuación 2.27 son descritos a continuación, junto con la ecuación 2.31 necesaria para calcular el acontecimiento hidrológico requerido en función de X^2 , conocida como la variable chi cuadrado proporcionada por tablas.

$$F(x) = \int_{x_0}^x \frac{(x - x_0)^{\gamma-1} e^{-\frac{(x-x_0)}{\beta}}}{\beta \gamma \Gamma(\gamma)} dx \quad (2.27)$$

$$\gamma = \frac{4}{C_S^2 \ln(x)} \quad (2.28)$$

$$\beta = \frac{C_{S \ln(x)} * S_{\ln(x)}}{2} \quad (2.29)$$

$$x_o = X * \ln(x) - \frac{2S_{\ln(x)}}{C_{S \ln(x)}} \quad (2.30)$$

$$X^2 = \frac{2(\ln(x) - x_o)}{\beta} \quad (2.31)$$

Distribución Gumbel

Sirve para determinar el pico más alto o más bajo de un conjunto de datos, generalmente otorgados por eventos hidrológicos extremos[18]. La expresión 2.32 representa la ecuación de *Gumbel* en función del número de *Euler* (e), $F(x)$ indica la frecuencia teórica acumulada, x es el valor asumido, d y u son variables ya establecidas.

$$F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad (2.32)$$

Al simplificar la constante de *Euler* y despejar x resulta la ecuación 2.33, la cual se utiliza para calcular el valor *Gumbel* requerido. Los parámetros d y u son calculados mediante las ecuaciones 2.34 y 2.35 respectivamente, a su vez el término S hace referencia a la desviación estandar, y finalmente X es la media aritmética del total de datos obtenidos.

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d} \quad (2.33)$$

$$d = \frac{1}{0.779696 * S} \quad (2.34)$$

$$u = X - 0.450047 * S \quad (2.35)$$

Prueba de bondad de ajuste

Test Kolmogorov-Smirnov

Se define como una prueba no paramétrica, sirve para verificar si la serie de datos se encuentran distribuidos de manera admisible o no, es decir corroborar que los datos provienen de una población distribuida normalmente.[18]. Los pasos a seguir para su correcta ejecución son:

1. Ordenar los datos de menor a mayor.
2. Indicar el tamaño de la muestra de estudio.
3. Determinar la media aritmética y desviación estandar de todos los datos.
4. Establecer las frecuencias teóricas para cada valor mediante la ecuación 2.36, donde n es el número de ubicación del dato y N es el número total de datos.

$$p_i = \frac{n}{N} \quad (2.36)$$

5. Para cada dato se calcula el valor tipificado, con la ecuación 2.37, donde z_i es el valor tipificado, x es el dato preestablecido, DS indica la desviación estándar y X es la media aritmética de todos los datos.

$$z_i = \frac{x - X}{DS} \quad (2.37)$$

6. Una vez determinadas las frecuencias, se extrae el valor absoluto máximo resultante de la diferencia entre las mismas, este valor se conoce como *Kolmogorov-Smirnov*.
7. La cifra obtenida se compara con los valores críticos *Kolmogorov-Smirnov* dados por tablas, los cuales están en función del número de datos para el estudio. Véase Anexo 7.1.
8. Finalmente si el valor crítico de la tabla resulta mayor que el valor *Kolmogorov-Smirnov* calculado, se considera una distribución adecuada.

Valor estadístico *Kolmogorov-Smirnov* (*DMax*)

Se define como la diferencia entre las frecuencias esperada y observada. La ecuación 2.38 demuestra como obtener dicho valor, la Frecuencia Observada (F_o) resulta de calcular la frecuencia relativa simple, es decir el valor de la variable hidrológica dividida para el número total de datos. En tanto, la frecuencia esperada (F_e) es obtenida al aplicar la fórmula de la distribución probabilística que se requiera para cada valor. El valor *DMax* es el mayor de las diferencias calculadas para cada cifra de la serie de datos, siempre en valores absolutos [18].

$$DMax = \max |F_e - F_o| \quad (2.38)$$

2.3.4. Precipitación media de una cuenca

Para el cálculo de esta variable es necesario contar con los datos de estaciones pluviométricas localizadas en la cuenca objeto de estudio. Como indica *Vásconez et al.* [9] en el *Ecuador* el organismo encargado de proporcionar información pluviométrica es el *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)*, el cual cuenta con estaciones a lo largo de todo el país y mientras se tenga el registro de un mayor número de años, los cálculos serán más confiables. Los métodos sugeridos por el autor son:

1. Método del promedio aritmético

Este método requiere cumplir ciertos criterios, los cuales provocan la pérdida de su confiabilidad, puesto que se debe considerar la existencia de suficientes estaciones y distribuidas de manera uniforme a lo largo de toda la cuenca, además de garantizar una topografía exenta de accidentes geográficos, lo cual en la mayoría de los casos es imposible[9].

La fórmula 2.39 se utiliza para calcular la precipitación media de la cuenca, $P(i)$ es la precipitación propia de cada estación (mm), n indica el número de estaciones presentes en la cuenca.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{n} \quad (2.39)$$

2. Método del polígono de *Thiessen*

El procedimiento para emplear este método es el siguiente:

- Determinar el área de influencia de las estaciones pluviométricas presentes en la cuenca.
- Trazar mediatrices para unir las estaciones.
- Se considera la precipitación en función del área de influencia.[11]

Se necesita que las estaciones estén distribuidas de forma homogénea en la cuenca al igual que el método matemático, y finalmente se calcula una media ponderada de la precipitación con la ecuación 2.40, se tiene $A(i)$ área de influencia de cada estación, $P(i)$ precipitación propia de cada estación, AT área total de la cuenca y n número de estaciones.

$$P_m = \frac{1}{AT} * \sum_{i=1}^n P(i) * A(i) \quad (2.40)$$

3. Método de las isoyetas

Zhicay[11] define una isoyeta como una curva resultante de la conexión de puntos en un mapa o plano con el mismo valor de precipitación. En este método, las curvas se dibujan tomando como referencia la ubicación de las estaciones meteorológicas o pluviométricas que inciden en la cuenca hidrográfica, junto con las precipitaciones de cada una de ellas. La ecuación 2.41 describe la precipitación promedio Pm que se pretende alcanzar, P_i es la precipitación de la isoyeta analizada (mm), P_{i+1} es la cantidad de lluvia de la isoyeta $i+1$ (mm), $S_{i+1,i}$ es el espacio entre dos isoyetas adyacentes (km^2) y finalmente St es la superficie total (km^2).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n * \left(\frac{P_{i+1} + P_i}{2} * S_{i+1,i} \right)}{St} \quad (2.41)$$

2.3.5. Periodo de retorno

Mélice y Reason [20] definen el periodo de retorno como el intervalo de tiempo en años en el que regularmente un evento hidrológico será igualado o superado. La ecuación 2.42 que describe esta característica fue propuesta por *Chow* [21], en la cual T es el periodo de retorno (años) y P es la probabilidad de excedencia del evento.

$$T = \frac{1}{P} \quad (2.42)$$

Ochoa [1] en su investigación recalca que a lo largo de la historia en la mayoría de países más del 90% de los desastres naturales relacionados con desbordamiento de ríos y condiciones climáticas adversas, son asociados con períodos de retorno cercanos a 100 años, por lo tanto se infiere que los puentes necesitan ser diseñados con un período de recurrencia de 100 años o más. Además deben contar con el respaldo de datos sobre caudales máximos y un registro lo más longevo posible de eventos hidrológicos como crecientes, inundaciones, entre otros.

2.3.6. Método de *Dick Peschke*

Es un método hidrológico que permite estimar la precipitación total en diferentes períodos de tiempo, generalmente cada hora. Este modelo es usado cuando no se cuenta con suficientes registros hidrometeorológicos de una zona [22]. La ecuación 2.43 permite obtener la precipitación máxima de duración D , en mm (P_D), P_{24h} es la precipitación máxima alcanzada a lo largo del día, en mm y finalmente D es la duración de la tormenta o precipitación, en horas.

$$P_D = P_{24h} * \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \quad (2.43)$$

2.3.7. Intensidad

Chow [21] define la intensidad como la razón entre la altura de precipitación y el tiempo de duración de la lluvia. La ecuación 2.44 sirve para determinar la intensidad promedio I en mm/h, P es la altura de precipitación (mm) y D es la duración de lluvia generalmente 24 horas.

$$I = \frac{P}{D} \quad (2.44)$$

2.3.8. Método del *Soil Conservation Service SCS*

El método SCS desarrollado en 1972 por el *Soil Conservation Service* de *Estados Unidos* es un procedimiento empírico [23] ampliamente usado debido a que los parámetros necesarios para su aplicación parten de las características del uso de suelo o coberturas de la cuenca [21], normalmente estos datos reposan en la base de datos de las instituciones públicas de cada ciudad en el caso de *Ecuador*.

Este procedimiento se basa en un número de curvas con valores entre 1 a 100, un número 1 de curva establece que toda la lluvia es infiltrada mientras que un número 100 indica que toda la lluvia provoca escorrentía [21].

Fundamento Matemático

El fundamento aplicado por el SCS establece dos relaciones; la primera corresponde a la disminución de la infiltración con el tiempo representada en un línea decreciente que divide la precipitación propia de las abstracciones iniciales (cantidad de precipitación en la cual el terreno ya no retiene más agua dispersándose por la superficie), como segunda instancia, al superar las abstracciones la precipitación aumentará gradualmente [21] como se ilustra en la Figura 2.4.

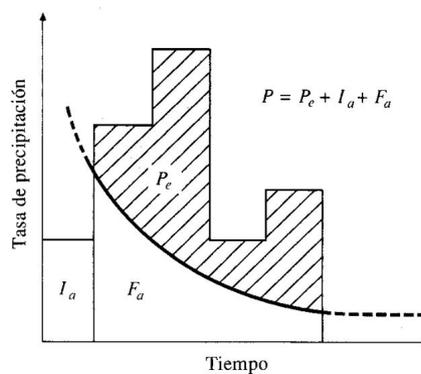


Figura 2.4: Relación y variables del método SCS [21].

Mediero [23] explica que cuando ocurre una tormenta, las relaciones entre la retención Fr y la máxima retención potencial Sr con la lluvia neta E y la precipitación total P pueden ser igualadas, planteando así la ecuación 2.45. Cumpliendo con la conservación de masa, la lluvia retenida no transformada en escorrentía Fr será la precipitación total P menos la lluvia neta o escorrentía generada E [23] como muestra la ecuación 2.46.

$$\frac{Fr}{Sr} = \frac{E}{P} \tag{2.45}$$

$$Fr = P - E \quad (2.46)$$

La escorrentía que se puede producir no es P directamente, sino se ha de considerar que la abstracción inicial I_a debe ser restada del valor inicial [23]. A partir de 2.47, la retención F cuando comienza a llover es igual a la precipitación P menos la escorrentía E que se genera [23]. Entonces:

$$P = (P - I_a) \quad (2.47)$$

Finalmente, reemplazando las ecuaciones correspondientes en la ecuación inicial 2.45 se plantea la fórmula 2.48 del método de número de curva o SCS:

$$E = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + Sr} \quad (2.48)$$

La ecuación empírica 2.49 planteada por *Chow* [21] está basada en resultados de estudios en varias cuencas hidrográficas pequeñas. Por ultimo, reemplazando 2.49 en 2.48 resulta la ecuación 2.50 que será la que servirá para el cálculo de la escorrentía generada.

$$I_a = 0.2Sr \quad (2.49)$$

$$E = \frac{(P - 0.2Sr)^2}{P + 0.8Sr} \quad (2.50)$$

Para complementar la metodología *Chow* [21] relaciona el número de curva CN y la retención potencial máxima (Sr) a través de 2.51, cabe recalcar que la ecuación ya se encuentra transformada al *Sistema Internacional*.

$$Sr = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (2.51)$$

Los números de curva se establecerán en función al tipo de suelo que conforman la cuenca es por ello que el *Soil Conservation Service* propone una clasificación general de los suelos en 4 tipos diferentes que van nombrados con las letras A, B, C y D [21]. Existen algunos autores como *Portuguez y Verano* [24] que presentan variantes en esta clasificación planteando su propia categorización como indica la Tabla 2.6.

Tabla 2.6: Clasificación del suelo para número de curva [24].

Grupo	Caraterísticas
A	Infiltración rápida considerando humedad, suelos profundos como los areno limosos o arenosos, muy drenados.
B	En condiciones de humedad tienen una infiltración moderada, su textura puede ser franca, franco limosa, franco arenosa o franco arcillosa.
C	Cuando existen condiciones de humedad son de filtración lenta, pueden ser texturas arcillo arenosa, franco arcillosa o francoarcillo-limosa.
D	Su infiltración es muy lenta en condiciones húmedas por lo que carecen de drenaje, aquí constan los suelos con altos niveles freáticos permanentes y suelos con poco espesor.

Además de ello *Chow* [21] en su libro presenta una clasificación del número de curva de acuerdo al uso y tipo de suelo dicha información esta disponible en la Tabla 5.5.2 del libro *Hidrología Aplicada* (Véase Anexo 7.3). El coeficiente de escurrimiento al igual que el número de curva se calcula a partir del mismo procedimiento, pero en base a otras tablas. En el anexo 7.4 se presenta los coeficientes de escorrentía dados por [21] cuya tabla muestra los valores usados en la ciudad de *Austin, Texas*.

2.3.9. Curvas IDF

Las curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF) relacionan las intensidades de lluvia para diferentes intervalos de tiempo y distintos periodos de retorno, lo que permite tener una visión global del comportamiento de la lluvia para periodos de diseño requeridos.

2.3.10. Método de Bloques Alternos

Es un método que permite construir hietogramas de diseño para diferentes períodos de retorno, a partir de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. El objetivo de esta metodología es representar de manera gráfica las curvas para cada período de recurrencia hidrológico donde se enlacen los intervalos de duración de las lluvias con las cifras de intensidades de precipitaciones [25].

Entonces, el hietograma obtenido aplicando este método presenta los intervalos n en tiempos consecutivos dt con una profundidad específica para cada momento, la duración final será $dt = T$. Una vez determinado el periodo de retorno se verifica su intensidad en las curvas IDF para que sea multiplicada por la duración deseada, a medida que el tiempo aumenta también lo hará la profundidad de precipitación. Finalmente, es necesario reordenar todas las precipitaciones de modo que en el tiempo medio se ubique la máxima intensidad de lluvia para posteriormente colocar las precipitaciones restantes en orden descendente de manera alternada entre izquierda y derecha [21].

Soto [25] resalta en su investigación que para emplear el método de bloques alternos es necesario que en la cuenca en gran medida se produzca desbordamiento del cauce de ríos sea por lluvias durante días enteros pero con poca intensidad.

2.3.11. Modelos hidrológicos

La modelización hidrológica en softwares ha entrado en auge durante las últimas décadas debido al avance tecnológico, *Carreras* [26] recalca que el empleo de programas como *HEC-HMS*, son importantes porque ayudan a pronosticar situaciones extremas que se producen difícilmente en un tiempo determinado a lo largo de la cuenca.

Alvarez y Calle [6] establecen que existen limitaciones al aplicar las diversas metodologías para el estudio hidrológico de la cuenca, ya que se emplean las fórmulas resultantes de las investigaciones de diversos autores internacionales, y para cálculos en nuestro territorio siempre se dará una discrepancia en el empleo de uno u otro proceso. Todos los procedimientos para calcular el caudal se clasifican así:

- **Métodos empíricos:** Son empleados cuando se carece de información para aplicar otros procesos más complejos. Los más importantes son *Creager* y *Lowry*.
- **Métodos semi-empíricos:** Son usados cuando se tienen datos de la intensidad de lluvia.
- **Métodos estadísticos:** Son aquellos que se usan en lugares donde existen registros meteorológicos y pluviómetros con datos históricos. Los métodos más usados son *Gumbel* y *Person*.
- **Modelos Matemáticos:** Estos métodos son generalmente los más exactos por el empleo de programas computacionales.

Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)

Es un programa computacional que fue diseñado por el cuerpo de ingenieros de la *Armada Estadounidense* para la simulación de modelos lluvia-escurrimiento cuya función es simular el comportamiento hidrológico de una cuenca, con la finalidad de estimar el caudal máximo que pasa por el punto de drenaje establecido previamente para su análisis; también es usado para estudios de drenaje urbano, disponibilidad de agua, pronóstico de flujo, entre otros. El programa tiene la opción de simular de forma continua el ciclo hidrológico incluyendo procesos como disolución del agua en estado sólido, evapotranspiración, humedad del suelo, entre otros [25].

HEC-HMS requiere esquematizar la cuenca objeto de estudio, para conocer sus características geomorfológicas, ubicación del punto de drenaje, red hídrica y principalmente el hietograma de diseño obtenido de las precipitaciones ocurridas a lo largo de toda la cuenca de aporte.

Hydrognomon

Es un software de acceso libre empleado para procesar datos de eventos hidrológicos y analizar los eventos extremos, mediante la representación gráfica y analítica de cada uno de ellos. Fue creado por el *National Technical University of Athens* entre sus principales funciones están la capacidad de analizar series de datos hidrológicos de cualquier magnitud junto con la regresión y relleno de datos faltantes, balance hidrológico, modelos de escorrentía, facultad de usar métodos estadísticos en función de distribuciones de probabilidad, ajuste de parámetros hidráulicos, nivel de confianza de una serie de datos, entre otras [27].

La guía del usuario del programa desarrollada por *Kosani y Markonis* [27] señala que el software se sustenta en algoritmos de procesamientos de datos en series de tiempo, capaces de regular los intervalos de ocurrencia entre cada evento hidrológico, estos procesos otorgan la facultad de interpolar datos faltantes o ausentes, y permiten visualizar los resultados esperados con la interfaz del programa en forma gráfica, analítica o en tablas divididas en series de tiempo, evento, periodo de retorno, etc.

Una de las ventajas del programa es la compatibilidad del mismo con aplicaciones hidrológicas externas que incluyen la modelización de un flujo con evapotranspiración, descarga de sedimentos, pruebas de homogeneidad hidrológica, entre diversas funciones. La característica especial con la que cuenta *Hydrognomon 4* es su ventana estadística, capaz de ajustar cualquier serie de datos hidrológicos a las diferentes funciones de probabilidad desarrolladas por muchos autores a lo largo de la historia, el resultado final de cada evento, aplicado el respectivo fundamento teórico se plasmará en la pantalla de salida según la necesidad de cada usuario, quien puede

manipular y controlar cada ajuste para saber el comportamiento del agua con cierto nivel de confianza, que el programa ejecuta y acepta o rechaza dicha hipótesis [27].

2.4. Modelamiento Hidráulico

Debido al cambio climático que experimenta todo el planeta, las inundaciones cada vez son más frecuentes y provocan el desbordamiento del cauce normal de los ríos, afectando las zonas cercanas a los mismos. *Luis y Edison Timbe* [28] aseveran que el estudio hidráulico de un sector permiten establecer zonas de riesgo con el objetivo de implementar medidas preventivas o de mitigación a las estructuras más vulnerables. *Pérez* [29] establece que los modelos hidráulicos representan de forma simplificada algunos fenómenos naturales, con el propósito de predecir el comportamiento y lo perjudicial que pueden llegar a ser estos eventos. Los modelos se clasifican en: unidimensionales, cuasi-dimensionales, bidimensionales y los menos comunes como los tridimensionales. Según *Gallardo* [8] para que un modelo hidráulico sea bien ejecutado se debe realizar lo siguiente: definir la geometría del río, calcular la rugosidad del lecho, estimar los caudales máximos (hidrogramas) y obtener la topografía o el modelo digital del terreno.

El modelo unidimensional *HEC-RAS* permite la calibración del flujo de agua, a través de la variación del coeficiente de *Manning*, esto genera una estimación del nivel de agua, el cual se puede comparar con el comportamiento del río observado in-situ y establecer la validez de la modelización empleada. *Guevara* [30] menciona que un análisis hidráulico es fundamental para determinar variables como aumentos del nivel del agua y cambios bruscos de velocidad las mismas que pueden afectar la integridad de los puentes por posibles socavaciones en sus estribos.

2.4.1. Geometría del cauce

En base a lo mencionado por *Gallardo* [8] la geometría se obtiene a partir de un levantamiento batimétrico siguiendo los fundamentos y recomendaciones descritas en la sección 2.2.1.

2.4.2. Coeficiente de *Manning*

El coeficiente de resistencia n de *Manning* representa la dificultad de fluir del agua a través de un lecho que presente diferentes condiciones como irregularidades, obstáculos, vegetación, caudales, pendiente, entre otros[21]. *Fernández et al.* [31] enfatiza en la importancia del coeficiente de *Manning* para cualquier modelamiento hidráulico debido a que el porcentaje de error en la estimación de este representará

un error similar en el cálculo del caudal, es por ello que su análisis debe considerarse la sección completa de un cauce. Existen varias metodologías para la estimación del valor de rugosidad, los cuales pueden dividirse en métodos empíricos, basados en tablas, otros que aplican velocidades a distintas profundidades, etc. Los valores típicos de rugosidad para corrientes naturales se indican en la sección Anexos 7.8.

Método de medición de velocidades

Este método será conveniente cuando los flujos son turbulentos con fronteras rugosas en las que se presente una distribución logarítmica de velocidades, se conocerá el coeficiente de *Manning* por medio de las velocidades medidas en una sección completa. La ecuación 2.52 estima el coeficiente de rugosidad mediante la variable V que es el cociente entre la velocidad al 20 % de la profundidad y el 80 % respectivamente ($Vel_{0.2}/Vel_{0.8}$), y donde d es la profundidad total de la sección vertical. Todos los valores son medidos desde la superficie libre del agua.

$$n = \frac{(V - 1) * d^{\frac{1}{6}}}{5.57 * (V + 0.95)} \quad (2.52)$$

Métodos a partir de ecuaciones empíricas

Las ecuaciones empíricas de distintos autores utilizan los diámetros efectivos de las partículas del suelo que se consiguen por medio de la granulometría que emplea la norma (*ASTM D 422*) *Análisis Granulométrico por Tamizado* [32] y la (*Norma Técnica Ecuatoriana INEN 686*) *Toma de muestras alteradas* [33], cabe mencionar que la variación de los resultados puede ser significativa, por lo que la asignación del valor n dependerá del criterio de cada autor [31].

Ecuación para el cálculo de diámetros efectivos

La ecuación 2.53 es comunmente utilizada para encontrar los diámetros efectivos de una muestra ensayada de suelo, esta se aplica en función logarítmica donde x_1 es la abertura de tamiz menor y x_2 es la abertura del tamiz mayor para el intervalo en el que pasa el porcentaje del diámetro deseado; por otro lado y_1 corresponde al porcentaje pasante para x_1 y y_2 al porcentaje mayor pasante de x_2 , finalmente y representa el porcentaje del diámetro que se busca calcular. Ejemplificando entonces: si se requiere D_{10} el valor de y será 10, y el intervalo buscado será el menor y el mayor porcentaje al 10 % [31].

$$\log x = \log x_1 + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} * \log \left(\frac{x_2}{x_1} \right) \quad (2.53)$$

- **Meyer-Peter y Muller (1948)**: La ecuación 2.54 es aplicable con elementos no cohesivos donde se presenta la existencia de partículas mayormente gruesas, donde D_{90} es el diámetro en m tal que, el 90 % del peso de la muestra de suelo no contenga partículas que superen supere este valor.

$$n = 0.038 * D_{90}^{\frac{1}{6}} \quad (2.54)$$

- **Simons-Senturk (1976)**: La ecuación 2.55 utiliza el D_0 en mm para arenas que se selecciona de manera uniforme en el fondo y ribera del río, por lo que se puede usar un diámetro de 4.75 mm (Tamiz N°4).

$$n = 0.047 * D_0^{\frac{1}{6}} \quad (2.55)$$

- **Raudkin (1976)**: Este autor planteó dos ecuaciones. La ecuación 2.56 usa el D_0 en m para arenas que se selecciona de manera uniforme en el fondo y ribera del río, por lo que se puede usar un diámetro de $4.75 * 10^{-3}$ m (Tamiz N°4); por otro lado en la ecuación 2.57 se emplea el D_{65} que es el diámetro en mm tal que, el 65 % del peso de la muestra de suelo no contenga partículas que superen supere este valor.

$$n = 0.042 * D_0^{\frac{1}{6}} \quad (2.56)$$

$$n = 0.013 * D_{65}^{\frac{1}{6}} \quad (2.57)$$

- **Garde y Raju (1976)**: La ecuación 2.58 utiliza el D_{50} que es el diámetro en m tal que, el 50 % del peso de la muestra de suelo no contenga partículas que superen supere este valor.

$$n = 0.047 * D_{50}^{\frac{1}{6}} \quad (2.58)$$

2.4.3. Aforos

Romero [34] en su investigación indica que aforar es la acción de establecer el volumen de agua, (generalmente en m^3) que atraviesa un cuerpo de agua, siendo este

valor fundamental en la etapa de diseño y ejecución de toda obra hidráulica. Para establecer el método correcto de medición es necesario analizar ciertos aspectos como la geometría del canal, las condiciones topográficas del terreno, el equipo disponible, entre otros factores.

Sitio del aforo

Seleccionar el sitio ideal para realizar el cálculo de las velocidades de una sección del río, resulta imposible en la práctica, debido a que al ser un canal natural, muchas veces sufre cambios en su configuración y aspecto hidráulico [35], sin embargo la *International Organization for Standardization* [36] da ciertas pautas y recomendaciones para la selección del lugar de emplazamiento más idóneo para el aforo.

- Se buscará una sección lo más recta posible y de pendiente regular.
- Cuando se use el molinete para las mediciones de velocidad, es necesario que la distancia recta aguas arriba, deberá ser al menos el doble del tramo aguas abajo.
- Las márgenes de la sección transversal deben ser fijas para que permanezcan inalterables a lo largo de todo el proceso de medición.
- Las velocidades medidas en cada tramo seleccionado deberán ser normales tanto en planos verticales y horizontales, es decir no presentar picos con datos erróneos.
- Los aforos con molinete se realizarán en zonas donde se denote la ausencia de remolinos, rocas, agua muerta, condiciones de flujo divergente, convergente e inverso.
- El sitio seleccionado tiene que ser visible a lo largo de todo su ancho, es decir con ausencia de obstáculos.
- La profundidad a la que el molinete se sumergirá deberá ser lo más segura posible para evitar daños en el equipo.
- Cuando existan puentes es recomendable que los aforos sean realizados principalmente aguas arriba.
- Si se presenta algún problema con el sitio seleccionado, es permitido calcular las velocidades con el molinete en tramos del río diferentes a los establecidos previamente y vincular estos valores con la sección principal más cercana.

Línea de aforo

La sección transversal del río en la cual se realizará la medición de velocidades con el molinete debe estar delimitada por franjas verticales a lo largo de todo el ancho del río, *Jaramillo* [37] recalca que para tener una buena calidad en los datos obtenidos se debe tener la cantidad de divisiones necesarias en la franja del río, generalmente la distancia máxima entre cada una de ellas será de $1/20$ del ancho total del río donde se llevará a cabo el aforo [38].

Para determinar de manera precisa el ancho del cauce natural del río se recomienda emplear una cinta graduada y señalar con un papel fosforescente cada uno de los puntos en donde se realizará la medición de velocidad, siempre esta línea de referencia deberá permanecer fija y estable. En las verticales establecidas anteriormente se efectuarán los aforos correspondientes, con la regla graduada del molinete se deberán ir variando las profundidades a los cuales se tendrán las lecturas de velocidades, se recomienda realizar mínimo dos observaciones en cada fragmento de la vertical y si difieren más del 5% la una de la otra, se ejecutan dos medidas más hasta alcanzar una normalidad en los datos, caso contrario se efectúa un promedio entre todas las lecturas para encontrar el valor adecuado [37]. La Figura 2.5 indica las divisiones verticales del ancho del río para el aforo.

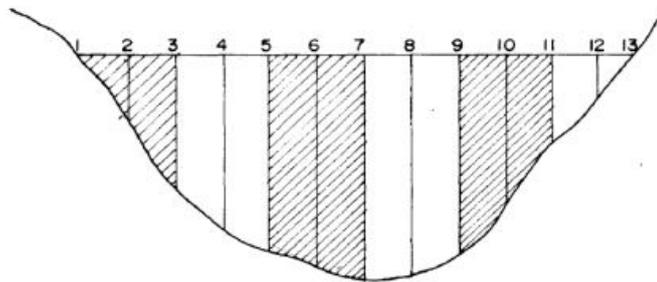


Figura 2.5: Sección transversal del río dividida en franjas verticales [34].

La Figura 2.6 esquematizada por *Quiñones y Guzmán* [39], muestra un método para precisar la línea perpendicular al flujo de agua donde se realizará el aforo correspondiente, la técnica consiste en que el aforador ingrese al río y se posicione de perfil al flujo, manteniendo la estabilidad deberá abrir sus brazos en dirección a la corriente, a continuación debe juntar las manos a la altura del pecho, pero manteniéndolas en la misma posición, para finalizar la dirección a la que señalen la punta de los dedos será la aproximación más certera del ángulo perpendicular al flujo.

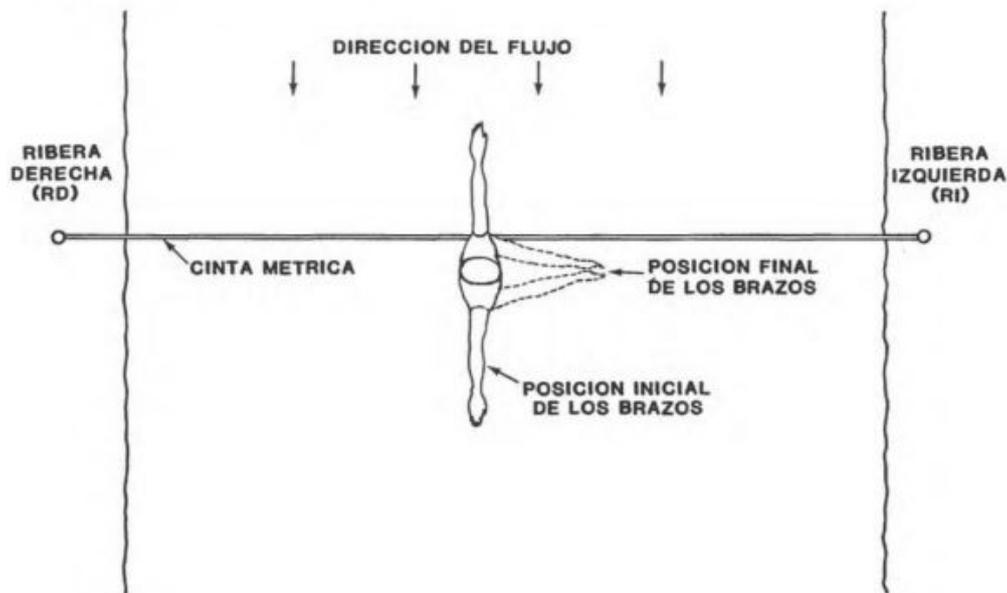


Figura 2.6: Técnica para encontrar la línea de aforo perpendicular al flujo [39].

Métodos de aforo

Diferenciar un tipo de aforo de otro depende exclusivamente del tipo de corriente a la cual se enfrenta el aforador, la altura de la lámina de agua es el factor que más evidencia el comportamiento del flujo de agua y sus velocidades. Cuando se tiene profundidades superiores a 60 centímetros y con velocidades de flujo mayores a 1 m/s, se recomienda no ingresar al río sin el equipo de protección y personal de seguridad que garantice la integridad de la persona encargada [40]. Los tipos de aforos más empleados en la actualidad son descritos a continuación:

1. Aforo mediante vadeo

Se emplea esta metodología en ríos donde se puedan atravesar la corriente y calcular las velocidades en diferentes puntos del mismo, la zona elegida debe tener una altura de agua menor a 60 centímetros, que cuente con un fondo lo más estable posible. También permite obtener la topografía del terreno y conocer la geometría del cauce. Para garantizar la seguridad de los equipos y las personas encargadas del aforo, se debe probar que la corriente de agua no presente velocidades mayores a 1 m/s. La Figura 2.7 ilustra la forma correcta para realizar el vadeo, teniendo como referencia un eje fijo que demarque la línea horizontal por la cual se cruzará el ancho del río, usualmente está línea es previamente señalada con los puntos de las verticales en las cuales se calcularán las velocidades respectivas [40].

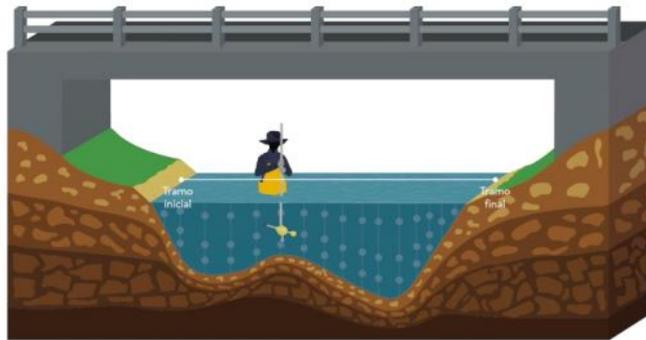


Figura 2.7: Método del vadeo [40].

2. Aforo por suspensión

Consiste en añadir al equipo un peso muerto que permita manejarlo a grandes elevaciones tales como muros, puentes, presas. Generalmente se lo emplea cuando las corrientes del cuerpo de agua son sumamente fuertes e implican un peligro para la vida de las personas. Tiene el mismo fin que el aforo por vadeo pero con una percepción no tan apegada a la realidad en cuanto a la geometría del lecho del río ya que no se ingresa a la corriente. La Figura 2.8 muestra un ejemplo de un aforo realizado a suspensión.

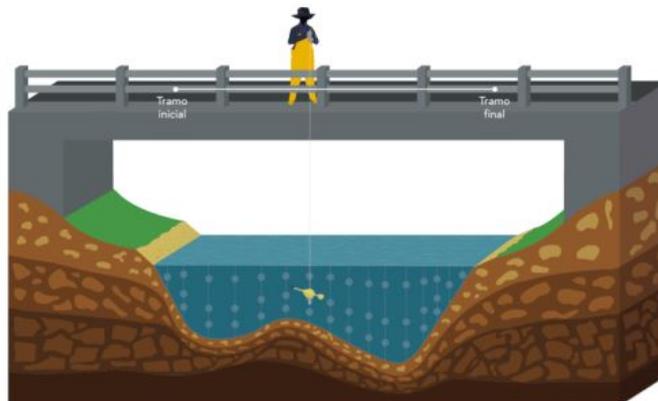


Figura 2.8: Aforo por suspensión [40].

Molinete

También conocido como medidor de corriente es empleado para calcular las velocidades de un flujo a diferentes profundidades, consta de una rueda de copas o eje rotor, yugo y la cola. También con una pantalla digital donde se calibran las revoluciones, unidades de medida del equipo y principalmente registra el número de vueltas del eje rotor en cierto intervalo de tiempo para finalmente determinar la velocidad en ese punto [37].

El molinete es similar al medidor de propeta o hélice, ya que consta de aspas, una cajas de acoplamiento y otra sellada, a su vez con un registro que se conecta

a un instrumento de medición extra generalmente un digitalizador. Este último es el encargado de cuantificar el número de vueltas de la hélice producto del choque del agua con el artefacto, se genera una fuerza rotacional, directamente proporcional a la velocidad del flujo. Una vez registrado las revoluciones del eje rotor en un tiempo determinado, el instrumento estima la velocidad de flujo con la contribución directa de una tabla de calibración propia dependiendo de la serie y el modelo del equipo. El funcionamiento del molinete consiste en determinar la velocidad mediante pulsaciones emitidas por el mismo que se producen cada vez que las hélices dan una vuelta completa y según la calibración del aparato cuenta como una revolución[35]. La Figura 2.9 muestra el medidor de corriente o molinete más usado para aforar caudales pequeños.



Figura 2.9: Molinete utilizado para aforos en laboratorio [35].

Registro de datos

Los datos tomados en campo deberán ser adaptados a un formato digital conocido y elaborado por el aforador, también se lo puede escanear pero muchas veces no es muy entendible. Una recomendación de la *Organización Meteorológica Mundial* [38] es que todos los parámetros anotados sean lo suficientemente lógicos y entendibles para reconocer de manera precisa el punto donde se tomó la lectura del molinete, en caso de requerir una corrección de algún dato mal registrado. Con el fin de evitar errores de comprensión y digitalización de datos se recomienda que en lo posible la misma persona delegada para la toma de datos en campo sea la encargada de transcribir la información obtenida a una hoja de cálculo.

Una persona del equipo que no estaba involucrada en el registro de datos del día ha analizarse deberá revisar y comparar tanto el registro manual como digital. Las gráficas suelen ser de gran ayuda para una comprobación rápida y precisa, sin

embargo si se tiene un número extenso de datos la aplicación de una hoja de cálculo programada disminuirá en gran medida el tiempo empleado en esta actividad [38].

La revisión general de las velocidades estimadas en cada punto de medición, se centra en la identificación de errores en los intervalos, diferencia máxima entre datos de verticales adyacentes y desviación máxima entre datos de una misma franja. *Jaramillo* [37] en su trabajo indica que generalmente se admite una tolerancia amplia en los dos primeros factores de análisis debido a que la existencia de muchos datos provoca que pequeños errores no sean muy perjudiciales, en cambio para tener una referencia más precisa de la relación entre las diferentes cifras analizadas en una sección se emplea el método denominado caja de bigotes o boxplot, el cual está conformado por el cuartil superior e inferior, cada uno de ellos delimitado por la línea del rectángulo correspondiente, la medida de tendencia central más importante en esta metodología es la mediana, la cual se simboliza con una línea en el interior del rectángulo e indica el dato intermedio entre los valores máximo y mínimos de la serie de datos; si existieran datos atípicos el diagrama los mostrara en un lugar fuera de los límites del box plot tal como ilustra la Figura 2.10.

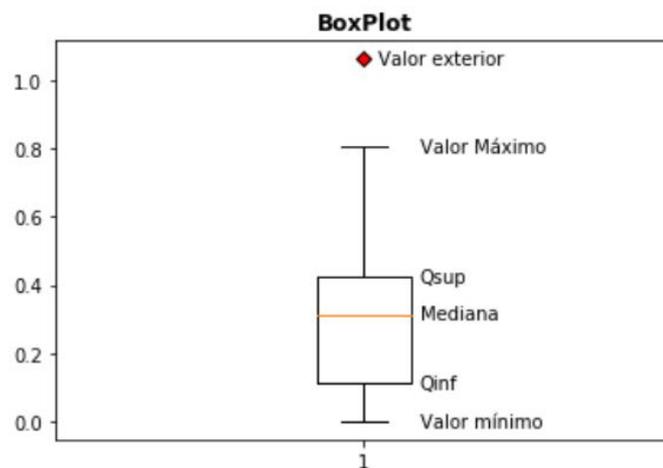


Figura 2.10: Método del diagrama de caja o bigotes [37].

2.4.4. Estimación de caudal del río

La manera de conocer el caudal de un cuerpo de agua varía según la necesidad de cada proyecto, *Romero* [34] alude que para proyectos en la zona rural cuando se tiene un caudal máximo de 0.01 m³/s se usan únicamente métodos volumétricos y para cada flujos que sobrepasen esta cifra se recomienda usar el método área-velocidad. Cuando se emplean aparatos como correntómetros, flotadores o molinetes, los métodos más usados son los artiméticos y gráficos [36]. A continuación, se describen los métodos gráficos más usados para calcular el caudal de ríos de montaña de sección relativamente pequeña [38].

Métodos gráficos

1. Metodología velocidad-área

Consiste en determinar el área de la línea o sección transversal elegida para el aforo, junto con las velocidades a diferentes profundidades de cada vertical previamente establecidas en el ancho del río y con la ayuda de la ecuación de continuidad estimar el caudal del flujo [36]. En la fórmula 2.59 Q es el caudal en m^3/s , V es la velocidad de flujo en m/s y A es el área en m^2 .

$$Q = V * A \quad (2.59)$$

2. Metodología de las isotacas

Este método se fundamenta en el cálculo del caudal de un flujo tomando como base la gráfica de distribución de velocidades en toda la sección elegida para el aforo. En las curvas de velocidad se señala el área delimitada por dos curvas de velocidad cercanas entre sí, luego se multiplica por la velocidad media de las isotacas fronterizas y posteriormente la suma de los productos de cada franja, es el volumen total ocupado por el agua en la zona objeto de análisis [34].

2.4.5. Seguridad en vadeos

Los peligros que representa un río para la seguridad e integridad de las personas son un tema primordial a la hora de realizar trabajos de campo en él, por ello la *Organización Meteorológica Mundial* de [38] recomienda contar el equipo de protección necesario y personal capacitado para enfrentarse a las situaciones que puedan poner en peligro la vida de las personas, producto de las corrientes del río, materiales arrastrados, inundaciones, entre otros factores.

Equipo de protección y seguridad para vadeos

Al momento de ingresar a cursos de agua con corrientes fuertes y con una altura de lámina de agua considerable, es indispensable contar con el equipo de seguridad y personal capacitado, encargados de guiar la práctica realizada sobre el río [38]. Los equipos de protección más usados en vadeos son los descritos en el siguiente apartado:

- Cuerdas: Sirven para anclar a la persona que está en el río a un punto fijo y resistente.

- Chaleco salvavidas: Sirven para mantener a flote a una persona cuando es arrastrada por el agua o simplemente permanece sobre la corriente. Su función principal es evitar la muerte por ahogamiento.
- Arnés: Es un elemento de seguridad colocado en la cintura del usuario y cumple la función de enlazarlo con la línea de vida y cuerdas. Generalmente son usados en trabajos de grandes alturas, terrenos inestables y rescate.
- Mosquetones: Son complementos del arnés sirven para emplazar de manera la correcta las cuerdas conectadas al usuario.
- Cascos: Son elementos de seguridad individuales que protegen la cabeza de las personas de sufrir fuertes golpes producto de algún objeto, caída, accidentes.
- Guantes: Elementos de protección para las manos con el propósito de evitar heridas profundas y contaminación en el caso de ríos de curso bajo.

2.4.6. Lenguaje de programación *Python*

Soto [41] define *Python* como un lenguaje de programación de nivel sofisticado y fácil de aprender para cualquier persona, cuenta con una codificación simple, junto con su facultad de interpretar problemas analíticos, lo convierten en un software idóneo para acortar tiempos en desarrollar y analizar eventos como comportamiento de fluidos, procesos de transferencia de calor, contabilidad de una empresa, etc.

Bolaños [42] en su investigación indica que programar es sencillamente lograr que una computadora lleve a cabo una lista de tareas asignadas por el propio usuario, las mismas son receptadas en el ordenador en formato de códigos de entrada y el resultado alcanzado por la máquina es visible mediante las ventanas de salida de cada programa.

Python es uno de los lenguajes más dinámicos en el mundo de la programación, ya que cuenta con una variedad de colores para diferentes líneas de código. En los diferentes ambientes que utiliza *Python* como *Spyder*, *IDLE*, *PyCharm*, entre otros; los colores pueden variar, pero de forma general el color blanco es utilizado para nombrar una variable, las funciones con el color naranja y azul para palabras especiales [42].

El programa se complementa con el uso del *IDE Spyder*, el cual forma parte del dominio de www.anaconda.com y al ser un software de libre acceso, todas las personas lo pueden usar haciendo más sencillo el ambiente *Python*. Con el apoyo de las bibliotecas integradas en el paquete como *Scipy*, *Matplotlib*, *NumPy*, *MathPython*, entre muchas otras, se resuelven problemas de análisis de datos con la sintaxis adecuada y según las necesidades del usuario [42].

Código de programación para aforos

Jaramillo [37] en su trabajo de titulación *“Estimación de caudal en cauces naturales mediante integración numérica aplicando lenguaje Python”* creó un código de programación mediante integración numérica para la estimación de caudales usando datos de velocidad en secciones de un río, las librerías ingresadas en el complemento *Spyder* con su codificación respectiva se detallan en la Figura 2.11.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib as mpl
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy import interpolate
import math
import PySimpleGUI as sg
import os
from matplotlib.backends.backend_pdf import PdfPages
```

Figura 2.11: Bibliotecas, funciones y módulos para *Python* [37].

Todo el código de programación generado por *Johana Jaramillo* [37] se encuentra en su trabajo de titulación, el algoritmo cumple la función de estimar el caudal de una sección de flujo, sustentada en datos de medición de velocidades.

Los datos ingresados al programa serán en formato de una hoja de cálculo específica proporcionada por la misma autora; el análisis de datos que realiza el software consta de gráfico de valores, variación a lo largo del tiempo del nivel de agua, detección de errores absolutos en el ingreso de datos, localización de velocidades negativas y detección de datos irregulares, una vez comprobada toda la información ingresada el mismo código permite hacer una interpolación lineal de velocidades, gráficos de distribuciones transversales de velocidades, perfiles longitudinales de velocidades y finalmente se presenta el cálculo del caudal en un respectivo informe de resultados [37].

2.4.7. Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS)

El programa desarrollado por la *US Army Corps of Engineers* de *Estados Unidos* es un software gratuito con la capacidad de resolver problemas de modelamiento hidráulico unidimensional, bidimensional y cuasi-idimensional, mediante la estimación de caudales y cálculo de perfiles de una sección hidráulica, tanto en flujo supercrítico o subcrítico [43].

Su principio de funcionamiento obedece al desarrollo de las ecuaciones básicas de la hidráulica, pero siguiendo un proceso desde conocer el comportamiento del flujo,

mediante la aplicación de los fundamentos teóricos de la *Hidráulica General* para conocer la geometría, división del mismo en secciones transversales, coeficientes de rugosidad que incide de manera directa en el cálculo de las variables hidráulicas. En cuanto a la definición de la geometría de la zona de estudio, con el programa se ingresan los datos de estructuras como puentes, vías, vertederos que son perjudiciales en el comportamiento de un flujo [43].

La geometría del cauce se ingresa mediante extensiones de programas complementarios como *Civil 3D*, de donde se importan levantamientos topográficos, aerofotos, etc. A partir de los cuales se analizará en *HEC-RAS*. Las condiciones en las cuales se desarrollará el flujo casi nunca son constantes por lo que se requiere un análisis cuasi-dimensional propio del software, que provoca una simulación del hidrograma de crecida en un periodo de tiempo generalmente de un día, para eventos hidrológicos con periodo de retorno de 5, 10, 25, 50 o 100 años [43].

Una parte importante del análisis son los sedimentos que se ingresan al modelamiento del flujo, mediante el ingreso de información correspondiente a la zona de influencia del proyecto. El análisis granulométrico del suelo motivo de estudio con los respectivos porcentajes de finos, junto con las condiciones de borde propia del área tomada como geometría del cauce, es ingresado junto con la información de la erosión presente a cierta profundidad que la misma pueda alcanzar en la zona transversal, siendo siempre la cota más elevada de la topografía. La evaluación de los parámetros geomorfológicos del cauce sirven para examinar no solo el terreno, también elementos como puentes, estribos o pilares [43].

En la investigación realizada por *Lasso y Mafla* [43] se detalla que la ejecución del programa sirve como una simulación del comportamiento del régimen de flujo, del cual los resultados pueden estar expuestos en tablas dinámicas propias del software, se puede observar al final el transporte de sedimentos, así como los cambios en el lecho del canal, todos los resultados alcanzados serán interpretados según cada usuario.

Flujo No Permanente

Consiste en determinar el comportamiento hidráulico del flujo, tomando en cuenta la influencia del transporte de sedimentos a lo largo del río. *HEC-RAS* permite añadir todas las condiciones morfológicas, hidráulicas y geométricas que intervienen en la trayectoria del flujo añadido los respectivos sedimentos.

Para el flujo no permanente se estudian los perfiles de flujo en ciertas secciones transversales, donde el caudal permanece constante durante un determinado periodo de tiempo. Cada intervalo de tiempo puede ser subdividido para un mejor estudio al

momento de ejecutar el programa, generalmente las series de tiempo son divididas en periodo de flujo, incremento de cálculo y tiempo de mezclado.

- **Periodo de flujo:** Es el intervalo de tiempo de mayor duración, durante el cual todas las características de la corriente y el canal natural permanecen constantes. Este parámetro depende de los datos de caudal que se dispongan, generalmente se asigna un valor de 24 horas.
- **Incremento de cálculo:** El periodo de flujo anterior es subdividido en incrementos de cálculo, es decir aunque el caudal permanezca constante se sabe que la geometría del canal es muy variada, por lo que se pretende analizar cualquier cambio brusco en la configuración espacial del río.
- **Tiempo de mezclado:** Consecuentemente, el cálculo incrementado es fragmentado en diferentes tiempos de mezclado. La cantidad de erosión y sedimentación cambian de una zona a otra, esto incide en el tiempo de mezclado, por lo que cada perfil de flujo se modifica por la presencia o no de materiales sedimentarios.

Calibración del modelo *HEC-RAS*

Santos et al.[44] en su estudio indican que para una correcta simulación es necesario identificar el comportamiento del flujo motivo de análisis, por consiguiente definir las condiciones de borde junto con los parámetros iniciales para ejecutar el programa. Generalmente para encontrar el modelo ideal de calibración de un río, se trabaja con el flujo no permanente, ya que se cambiarán los valores de rugosidad y lograr la representación gráfica o numérica lo más posible apegada a la realidad.

En cuanto al número de Manning que se ingresa al programa previo a la modelización, este debe experimentar variaciones en su valor hasta que los parámetros hidráulicos que analice el software sean similares o con un error muy reducido, *Santos et al.*[44] sugiere una tolerancia del 10% entre el caudal simulado en el modelo computacional con el caudal aforado en campo, cuando se cumple dicha condición se consideran los valores de rugosidad como aceptables.

Sección 3

Metodología

3.1. Ubicación de la zona de estudio

Los puentes están ubicados en la avenida 16 de Abril al sur de la ciudad de Azogues provincia del Cañar en el sector La Concordia, a pocos metros del colegio Santa Marianita de Borrero. En la Figura 3.1 se indica que la zona delimita al norte con la ciudad de Azogues, al este con Charasol sector Cruz Loma, al sur con Charasol y al oeste con Bellavista. Los puentes son relativamente nuevos, fueron construidos en el año 2018 y sirven como conectores entre la ciudad de Azogues y la parroquia Borrero. El sistema de coordenadas para este proyecto son UTM WGS84 Zona 17 Sur en las coordenadas: X:739282, Y:9694329, Z:2460 msnm.

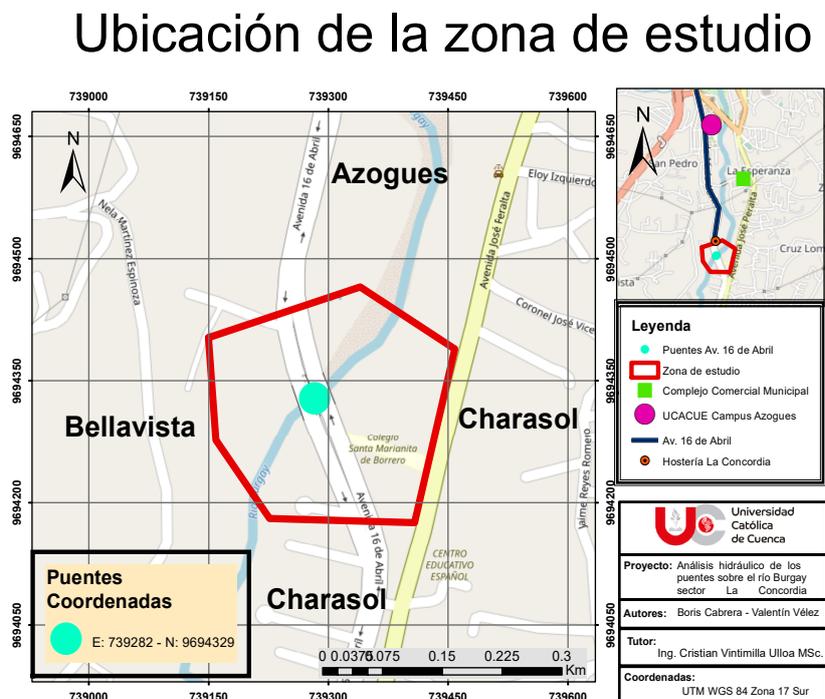


Figura 3.1: Mapa de ubicación de la zona de estudio.

3.2.2. Características generales y morfológicas de la cuenca

Los parámetros generales de la cuenca que corresponden a su morfología se obtuvieron en el software *ArcMap* con la herramienta *Interpolate-Shape* que convierte una entidad o capa bidimensional en un shape tridimensional mediante los valores z de las cotas de un DEM, una vez delimitada la cuenca se procedió a estimar su área y perímetro aplicando el cálculo de geometría que dispone esta herramienta.

Se determinaron los parámetros morfométricos de la cuenca aportante al área de estudio empleando la herramienta *ArcMap 10.8*, a partir de la información proporcionada por el modelo digital de terreno (MDT) y tomando como punto de drenaje los puentes de la avenida *16 de Abril*, se establecieron los parámetros generales de la cuenca descritos en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros generales de la cuenca.

Características generales de la cuenca			
Geometría			
Área	km ²		274.00
Perímetro	km		100.9
Ancho	km		9.85
Largo	km		27.83
Alturas			
Mínima	msnm		2440
Máxima	msnm		4180
Centroides			
X	m		734043.46
Y	m		9703210.22
Z	msnm		3310.00
Elevaciones			
Elevación Media	msnm		3310.00
Elevación de frecuencia media	msnm		3131.57

Los parámetros geomorfológicos de la cuenca fueron calculados con el software *Arc-Map* junto con la aplicación de las ecuaciones descritas en la sección 2.3.1 para cuantificar las características de la cuenca. El coeficiente de *Gravelius* se calculó con la ecuación 2.2 y los datos de la Tabla 3.1 mostrando un resultado de **1.71**, por lo tanto la cuenca analizada se la considera *oval alargada a alargada* siguiendo la tipología descrita en la Tabla 2.1, por lo que se considera una cuenca con bajo riesgo a inundaciones.

3.2.3. Sistemas de drenaje

Orden y Drenaje de la cuenca

Se aplicó la metodología de *Horton-Strahler* con la cual se divide la cuenca en diferentes órdenes de acuerdo a los ríos tributarios que posean. El orden resultante consecuente del análisis de la cuenca en el programa computacional *ArcMap 10.5* ha sido de **3** como se muestra en la Figura 3.3. Los tramos presentes para cada orden se han extraído de la información generada por el software anteriormente mencionado.

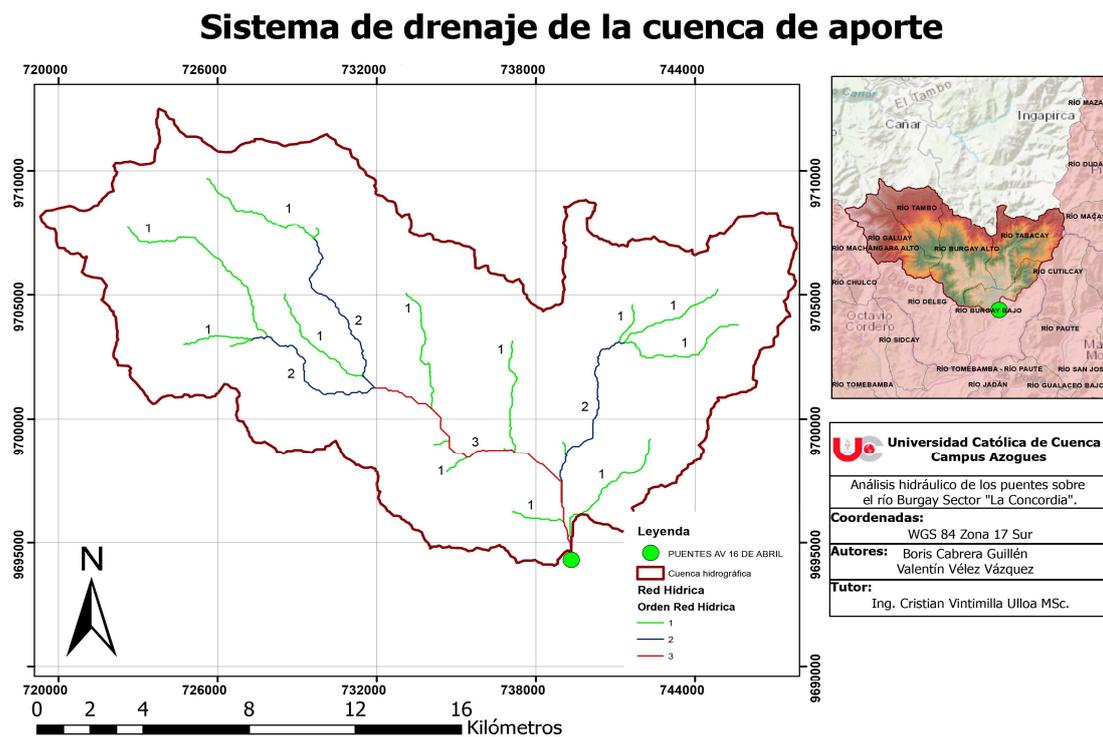


Figura 3.3: Orden de los ríos de la cuenca de aporte a los puentes.

Los datos presentados en la Tabla 3.2 indican las pendientes promedio resultantes de una interpolación entre la red hídrica con el raster de inclinaciones sin clasificar. Se ha calculado el número de ocurrencias (A) para las pendientes promedio (B), posteriormente se multiplicó A por B con el fin de obtener la pendiente promedio de la red hídrica. La longitud total determinada de los cauces es de 92.40 km, consecuentemente se aplicó la ecuación 2.3 para establecer la densidad de drenaje de la cuenca estimando así un valor de **0.34** km de río por cada km^2 de la cuenca, y según la Tabla 2.2 se considera una cuenca con "densidad baja". A su vez, la Tabla 3.3 es un resumen de todas las características hidrográficas calculadas de la cuenca objeto de estudio.

Tabla 3.2: Hidrografía de la cuenca para el orden de cada tramo de la red hídrica.

Orden	Longitud (km)	Hidrografía de la cuenca		A*B
		Coincidencias (A)	Pendiente prom % (B)	
1	56.16	2998	13.67	40968.38652
2	22.59	1151	9.15	10529.80955
3	13.65	634	3.81	2417.80655
Longitud Total	92.40	4783		53916.00262
Pendiente promedio (%)				11.27

Tabla 3.3: Características hidrográficas generales de la cuenca.

Hidrografía		
Longitud del cauce principal	km	27.07
Orden de la red hídrica	Adimensional	3
Longitud de la red hídrica	km	92.40
Pendiente promedio de la red hídrica	%	11.27

3.2.4. Parámetros de relieve

La configuración del terreno en la cuenca incide de manera directa en la concepción de sus características morfométricas más importantes, por ello la Figura 3.4 indica el relieve y morfología de la cuenca definiéndose claramente la red hídrica y la ubicación del cauce principal.

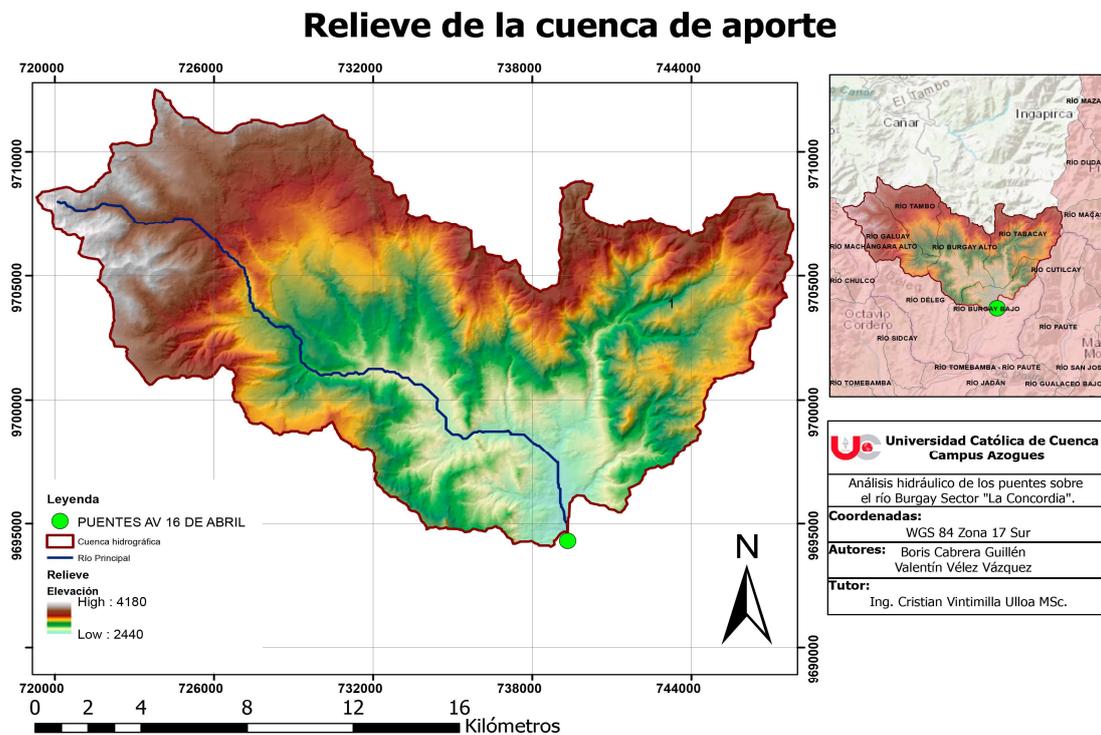


Figura 3.4: Relieve de la cuenca de aporte.

Pendiente media de la cuenca

Con el empleo de la herramienta geoespacial *Arc-Map* se estableció el número de ocurrencias (A) de cada rango de pendientes ocupando la misma metodología de la sección 3.2.3 y con la ecuación 2.4 se calculó la pendiente media de la cuenca en un aproximado del **18 %**, comparando este valor con la tipología de la Tabla 2.3 se asume una cuenca ”moderadamente inclinada”. El proceso realizado se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Pendiente media de la cuenca.

Pendientes de la cuenca				
Pendientes %		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
Min	Max			
0	10	5	184107	920535
10	20	15	243847	3657705
20	30	25	156090	3902250
30	40	35	67114	2348990
40	50	45	23101	1039545
50	60	55	5296	291280
60	70	65	750	48750
70	80	75	205	15375
80	90	85	90	7650
90	100	95	8	760
Total			680608	12232840
Pendiente media de la cuenca			18 %	

Pendiente media del cauce principal

Se utilizó el programa computacional *Arc-Map* para obtener las pendientes promedios de cada orden de los ríos que componen el cauce principal, como se observa en la tabla 3.5 al igual que el cauce medio de la cuenca se utilizó la misma metodología de la sección 3.2.3 y empleando la fórmula 2.5 se determinó una pendiente media del río principal de **7.83 %** , es decir de tipo ”ligera”según lo estipulado en la Tabla 2.4.

Tabla 3.5: Pendiente media del cauce principal.

Pendiente media del cauce principal					
Orden	Cantidad	Longitud (km)	Coincidencias (A)	Pendiente prom (B)	A *B
1	6	8.47	462	14.18	6551.16
2	1	5.93	301	6.41	1929.41
3	54	12.67	628	3.83	2405.24
Longitud Total		27.07	1391		10885.81
Pendiente promedio %				7.83	

Curva hipsométrica

Para el cálculo de la curva hipsométrica se realizó un reclasificación de las cotas máximas y mínimas en una serie de nueve intervalos, que de acuerdo con el intervalo correspondiente han sido calculado los promedios de elevación para ser relacionados con el porcentaje de área que ocupa cada altitud como se expone en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Cálculo de la curva hipsométrica.

Curva hipsométrica							
Min	Max	Promedio	Areas (km ²)	Area Acumulada	Area Sobre la Curva	Areas en%	Area Sobre la Curva (%)
2440	2670	2555	27.04	27.04	247.05	9.86	90.14
2670	2840	2755	38.92	65.95	208.13	14.20	75.94
2840	3000	2920	42.21	108.16	165.92	15.40	60.54
3000	3160	3080	47.21	155.37	118.72	17.22	43.31
3160	3320	3240	35.53	190.90	52.57	12.96	30.35
3320	3480	3400	30.62	221.52	52.57	11.17	19.18
3480	3640	3560	23.74	245.25	28.83	8.66	10.52
3640	3800	3720	19.93	265.19	8.90	7.27	3.25
3800	4180	3990	8.90	274.09	0.00	3.25	0.00
Total			274.085145			100	

La gráfica de las frecuencias altimétricas y curva hipsométrica reflejan la misma información con representaciones distintas, para ambos casos ha sido necesario considerar la cantidad o porcentaje de área que abarca cada cota, siendo para esto indispensable el uso del *ArcMap*. La Figura 3.5 ilustra la curva con una línea roja puntuada mientras que las frecuencias son mostradas en diagrama de barras azules, distribuyéndose en las ordenadas las altitudes promedios y en las abscisas el porcentaje de área que las cotas ocupan. En base a la Figura 2.3 la curva definida indica que la cuenca esta formada por ríos viejos que son de condiciones sedimentarias.

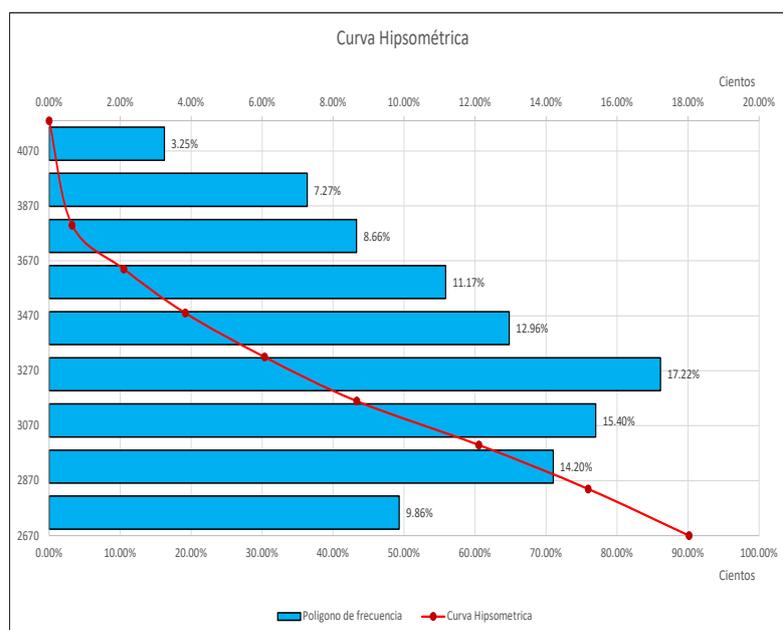


Figura 3.5: Curva hipsométrica de la cuenca y frecuencias altimétricas.

Coefficiente de masividad

El coeficiente de masividad de la cuenca de aporte a los puentes de la avenida 16 de Abril se determinó con el uso de la ecuación 2.6 usando el área de 274 km^2 y la elevación media de 3131 m, dando como resultado un valor de 11.42 m/km^2 . Con base en la Tabla 2.5 se puede afirmar que la cuenca presenta una superficie “muy accidentada”.

3.2.5. Análisis hidrometeorológico

Datos de precipitaciones

Con la información proporcionada por *EMAPAL EP* se obtuvieron los datos pluviométricos de las estaciones albergadas en el interior de la cuenca, la Tabla 3.7 describe los nombres y coordenadas de cada una de ellas.

Tabla 3.7: Estaciones pluviométricas en la cuenca.

Estación	Tipo	Norte	Sur
Nudpud	Estación	9705417	746459
Guapán	Pluviómetro	9699879	739279
Condoryacu	Pluviómetro	9704709	741649
Llaucay	Pluviómetro	9702114	744400

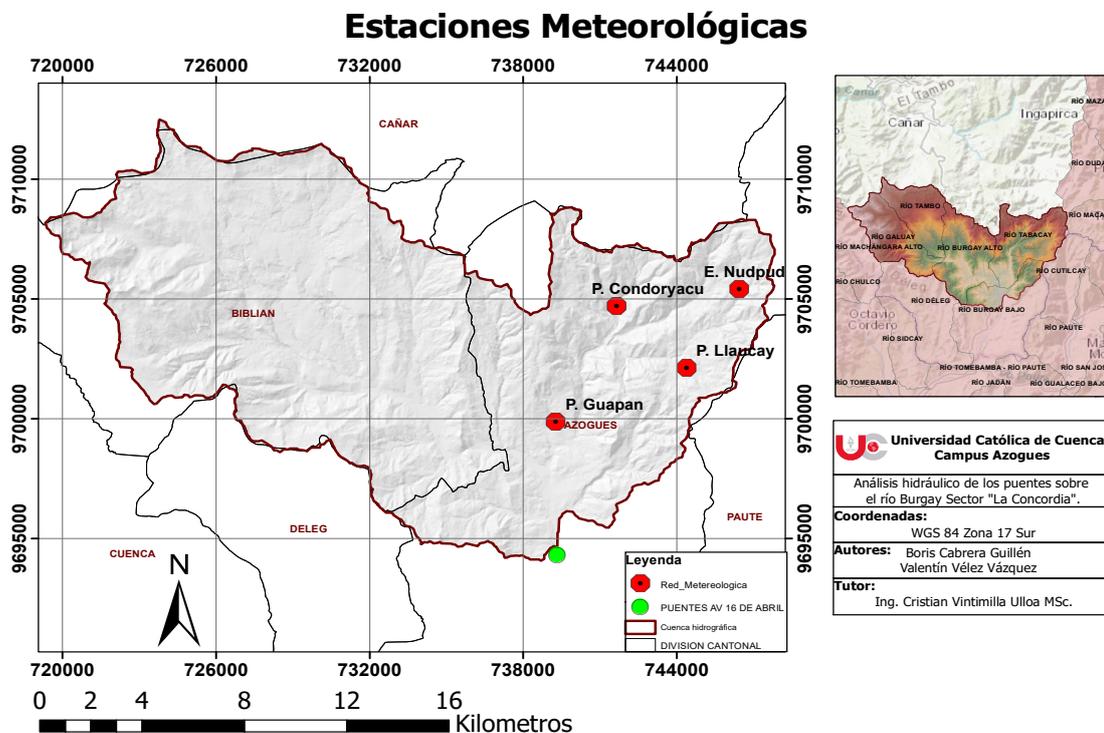


Figura 3.6: Estaciones meteorológicas.

La Figura 3.6 muestra la ubicación de las estaciones pluviométricas en la cuenca objeto de estudio. Debido a la ausencia de datos completos de precipitación en los registros históricos proporcionados por (*EMAPAL-EP*), se procedió a rellenar la información con los resultados alcanzados por *Castañeda* [16], que otorga cifras para los siguientes años: *Condoryacu* (2010-2020), *Nudpud* (2013-2020), *Llaucay* (2013-2020) y *Guapán* (2016-2020); por otro lado, para esta última estación se recolectaron las precipitaciones calculadas por *Santacruz* [45] desde el año 2010 hasta 2013. Todos estos datos se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8: Datos de precipitación recolectados.

Precipitación máxima (mm)				
Estaciones				
Años	Condoryacu	Nudpud	Guapán	Llaucay
2010	23.00	-	22.50	-
2011	30.00	-	51.50	-
2012	43.43	-	33.02	-
2013	27.69	32.40	38.61	-
2014	42.67	26.80	-	25.40
2015	32.26	26.80	-	19.81
2016	29.21	21.00	38.61	20.07
2017	26.16	23.20	31.80	39.88
2018	53.40	21.00	30.00	23.88
2019	28.00	25.60	30.00	25.15
2020	27.00	19.20	37.40	30.73
2021	26.40	26.87	25.00	34.54

Para el relleno de datos de precipitación faltantes en la Tabla 3.8 de las estaciones de *Nudpud*, *Guapán* y *Llaucay*, *Castañeda* [16] establece la razón Q, regresión lineal y razón Q respectivamente; como los métodos estadísticos más apropiados para las estaciones anteriormente mencionadas, ya que al aplicarse estas metodologías, el factor de fiabilidad o coeficiente de determinación (R^2) se aproxima a la unidad por lo que se consideran datos confiables. Para todas las estaciones se tomó como referencia la estación de *Condoryacu* debido a que cuenta con el registro completo de todos los años requeridos para el estudio.

Relleno de datos de la estación Nudpud

Se aplicó el método de Razón Q a la estación de *Condoryacu* como **A** y la de *Nudpud* como **B** la selección se definió con **A** porque posee los datos completos, una vez definidas las variables se estableció la razón Q con la fórmula 2.9 resultando de ello un valor de **0.57** adimensional, a continuación se procede a multiplicar a_i como explica la ecuación 2.10. La Tabla 3.9 presenta los resultados de la aplicación de este procedimiento.

Tabla 3.9: Relleno de precipitaciones para la estación Nudpud.

Años	Estaciones		
	Condoryacu "A"	Nudpud "B"	Nudpud $a_i * Q_i$
	mm	incompleta mm	completa mm
2010	23.00	-	13.17
2011	30.00	-	17.18
2012	43.43	-	24.87
2013	27.69	32.40	32.40
2014	42.67	26.80	26.80
2015	32.26	26.80	26.80
2016	29.21	21.00	21.00
2017	26.16	23.20	23.20
2018	53.40	21.00	21.00
2019	28.00	25.60	25.60
2020	27.00	19.20	19.20
2021	26.40	26.87	26.87
Total	389.22	222.87	278.09
		$a_i =$	389.222
		$b_i =$	222.87
		$Q_r =$	0.57260381

Para comprobar el método utilizado se procedió a graficar la correlación de los datos entre las dos estaciones, por consiguiente la línea de tendencia de los datos mostró un R^2 de 0.996 lo que indica una aproximación aceptable como se muestra en la Figura 3.7.

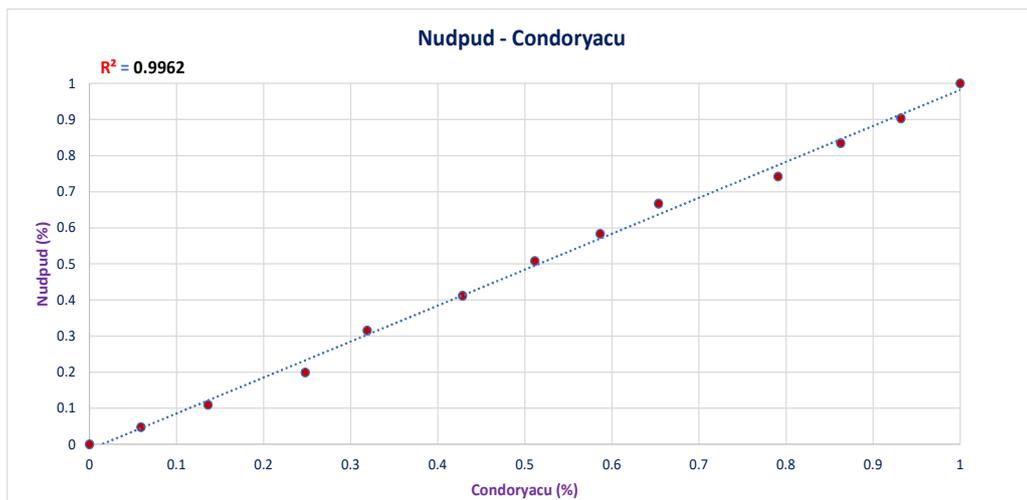


Figura 3.7: Correlación de la estación *Nudpud* con respecto a *Condoryacu*.

Relleno de datos de la estación *Guapán*

Se realizó la complementación de los datos con el método de regresión lineal, por lo que se procedió a establecer como variable x a los promedios de cada año de lluvia de las estaciones *Condoryacu* y *Guapán*, la variable y corresponde a los datos de precipitación de la estación incompleta que en este caso es *Guapán* los valores de a y b se establecieron con las ecuaciones 2.12 y 2.13. La Tabla 3.10 muestra el procedimiento realizado para el planteamiento de la ecuación lineal.

Tabla 3.10: Cálculo de coeficientes a y b para ecuación de *Guapán*.

n	x_i	y_i	$x_i y_i$	x_i^2	y_i^2
1	22.75	22.50	511.88	517.56	506.25
2	40.75	51.50	2098.63	1660.56	2652.25
3	38.23	33.02	1262.26	1461.30	1090.32
4	33.15	38.61	1279.84	1098.79	1490.73
5	33.91	38.61	1309.16	1149.82	1490.58
6	28.98	31.80	921.60	839.90	1011.24
7	41.70	30.00	1251.00	1738.89	900.00
8	29.00	30.00	870.00	841.00	900.00
9	32.20	37.40	1204.28	1036.84	1398.76
10	25.70	25.00	642.50	660.49	625.00
Total	326.37	338.44	11351.13	11005.16	12065.13
				b	0.86
				a	5.64

Con los valores a y b obtenidos en la Tabla 3.10 se aplicó la ecuación 2.11 para plantear la fórmula 3.1 que rigió el cálculo de los datos de precipitación que no tienen registro.

$$y = 5.64 + 0.86x \quad (3.1)$$

El valor de x utilizado en la ecuación 3.1 son los valores de precipitación de la estación completa correspondientes a los años faltantes de la estación incompleta, gracias a esta expresión se logró definir esta información como se presenta en la Tabla 3.11.

El método empleado se comprobó al igual que la estación *Nudpud*, mediante la correlación entre la información de las estaciones de *Guapán* y *Condoryacu*, resultando de ello un valor de 0.995 para el coeficiente de determinación, de modo que el método es aceptable. La Figura 3.8 ilustra la correlación de *Guapán* con la estación de *Condoryacu*.

Tabla 3.11: Relleno de precipitaciones para la estación *Guapán*.

Años	Condoryacu	Estaciones		
		Guapán y_i	Promedio x_i	Guapán relleno (mm)
2010	23.00	22.50	22.75	22.5
2011	30.00	51.50	40.75	51.5
2012	43.43	33.02	38.23	33.02
2013	27.69	38.61	33.15	38.61
2014	42.67	-	42.67	42.34
2015	32.26	-	32.26	33.38
2016	29.21	38.61	33.91	38.608
2017	26.16	31.80	28.98	31.8
2018	53.40	30.00	41.70	30
2019	28.00	30.00	29.00	30
2020	27.00	37.40	32.20	37.4
2021	26.40	25.00	25.70	25

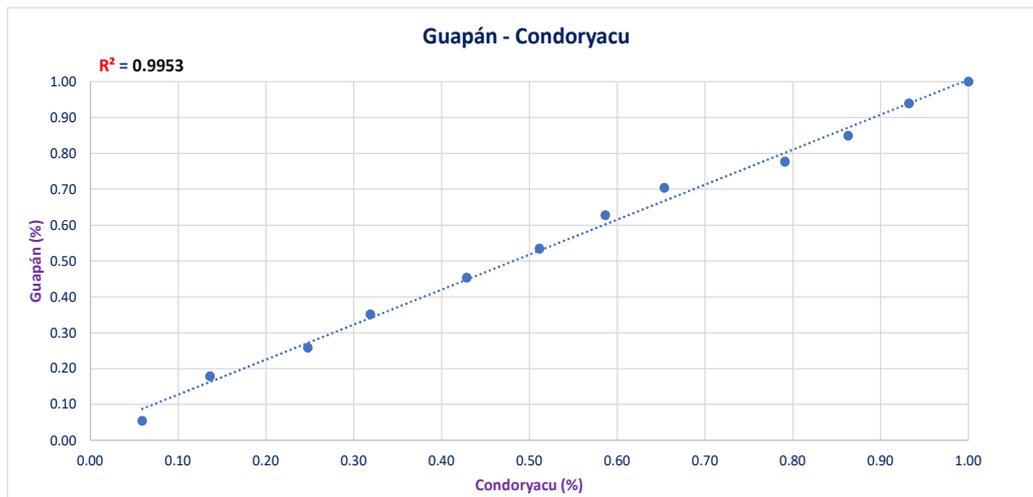


Figura 3.8: Correlación de la estación *Guapán* con respecto a *Condoryacu*.

Relleno de datos de estación *Llaucay*

Al igual que a estación de *Nudpud* se aplicó la misma metodología de la Razón Q, por lo que el valor Q_r calculado fue de 0.56 adimensional. La Tabla 3.12 expone los resultados del empleo de este método en *Llaucay*.

Finalmente, este método también demostró un excelente grado de confiabilidad al verificar la correlación existente entre las variables o estaciones propuesta, el valor de R^2 de la línea de tendencia de datos es de 0.984 como se expone en la Figura 3.9.

Tabla 3.12: Relleno de precipitaciones para la estación *Llaucay*.

Años	Estaciones		
	Condoryacu "A"	Llaucay "B"	Llaucay $a_i * Q_i$
	mm	incompleta mm	completa mm
2010	23.00	-	12.97
2011	30.00	-	16.91
2012	43.43	-	24.49
2013	27.69	-	15.61
2014	42.67	25.40	25.40
2015	32.26	19.81	19.81
2016	29.21	20.07	20.07
2017	26.16	39.88	39.88
2018	53.40	23.88	23.88
2019	28.00	25.15	25.15
2020	27.00	30.73	30.73
2021	26.40	34.54	34.54
Total	389.22	219.46	289.44
		$a_i =$	389.22
		$b_i =$	219.46
		$Q_r =$	0.56

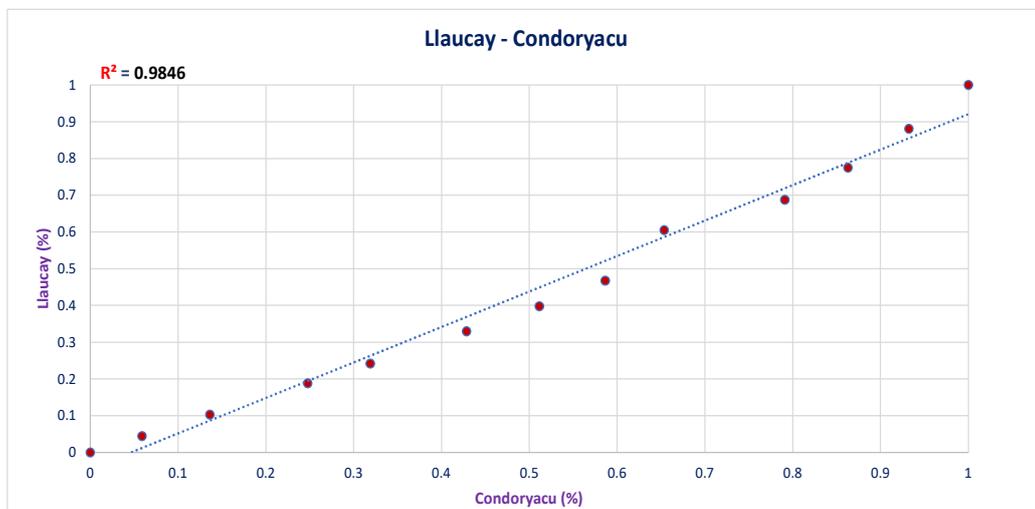


Figura 3.9: Correlación de la estación *Llaucay* con respecto a *Condoryacu*.

Comprobación del test de *Kolmogorov-Smirnov*

Para calibrar y comprobar la serie de datos de precipitación para cada estación se empleó la prueba de bondad de ajuste denominada test de *Kolmogorov-Smirnov*. Se siguieron los pasos especificados en la sección 2.3.3, el empleo de este método servirá para dar validez a la distribución de los datos generales de precipitación indicados en la Tabla 3.13, la prueba mencionada fue aplicada con la probabilidad

de no excedencia, por ello los datos fueron ordenados de manera ascendente, la aplicación del método para todas las estaciones estudiadas se detallan en Anexos 7.2.

Luego de determinar los valores mayores *Kolmogorov-Smirnov* de cada estación y con una confiabilidad de 95 %, se compararon los mismos con los valores críticos del Anexo 7.1, donde se usó el valor $n=12$ por el número de datos disponibles y una significancia $\alpha=0.05$, por lo que se estableció el valor 0.37543 como valor crítico *Kolmogorov-Smirnov*, y si la cifra calculada con la metodología aplicada resulta menor que el valor crítico impuesto por el Anexo antes mencionado, se puede ratificar el uso de los datos de precipitación, la Tabla 3.13 resume los resultados alcanzados para cada estación.

Tabla 3.13: Resumen Test *Kolmogorov-Smirnov* de todas las estaciones.

Test Kolmogorov-Smirnov					
Confiabilidad	95 %				
Número de datos	12				
Estación	Promedio	Desv. Estándar	Valor KS (calculado)	Valor KS (según Anexo 7.1)	Distribución
Condoryacu	32.44	9.14	0.27	0.37543	Aceptable
Nudpud	23.33	4.88	0.15	0.37543	Aceptable
Guapán	33.96	7.77	0.20	0.37543	Aceptable
Llaucay	24.12	7.90	0.19	0.37543	Aceptable

3.2.6. Precipitación de diseño

Al validar la distribución de los datos con la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, se procedió a elegir el método de distribución que presentó menor porcentaje de error (Dmax) para las series de datos correspondientes a cada estación, para un periodo de retorno de 100 años, siguiendo la recomendación dada por *Ochoa*[1] que indica usar este tiempo de recurrencia para puentes.

Para elegir el modelo que mejor se ajuste a los datos se empleó el programa computacional llamado *Hydrognomon 4*, que permite evaluar las variables estadísticas de los datos de cada estación y establecer el porcentaje de error, los modelos a usar se indican en la sección 2.3.3. Para la estación *Condoryacu* se empleó la distribución *Log-Pearson tipo III* ya que presenta una mayor confianza en relación a las otras distribuciones con un valor de 97.31 %, en la estación *Nudpud* la distribución que menor porcentaje de error presentaba con la serie de datos fue la *Normal* con un DMax de 0.089, para el caso de *Guapán* el modelo de distribución más recomendable de usar resultó ser *Gamma* con una distribución de valores cercana al 100 % con todas las metodologías fue asumida la distribución antes mencionada, y por último para la estación *Llaucay* el método de distribución empleado fue *Log-Pearson tipo III* con un porcentaje de error casi nulo del 0.085. Las tablas del Anexo 7.5 indican la comparación para cada estación de todos los métodos y la elección del más

factible, gracias a la interfaz del software *Hydrognomon 4*. A su vez, el Anexo 7.6 muestra las gráficas de cada serie de datos con la distribución de probabilidad que mejor se ajusta.

Una vez determinado el método más preciso para cada estación, con la ayuda del mismo software se procedió a calcular las precipitaciones máximas para un período de retorno de 100 años, resultando los valores expuestos en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Precipitaciones máximas para un período de retorno de 100 años calculadas en *Hydrognomon 4*.

T (años)	Precipitaciones (mm)			
	Condoryacu	Nudpud	Guapán	Llaucay
100	68.48	35.22	55.35	49.35

▪ **Método del promedio aritmético**

Los datos de precipitación para T=100 años están descritos en la tabla 3.15, y junto con el empleo de la ecuación 2.39 se calculó la precipitación de la cuenca en función de las precipitaciones máximas diarias resultando un valor de **52.10 mm**.

Tabla 3.15: Precipitaciones de cada estación para un periodo de retorno de 100 años.

Estaciones	T (100 años)
Condoryacu	68.48
Nudpud	35.22
Guapán	55.35
Llaucay	49.35
Total	208.4

▪ **Método del polígono de Thiessen**

Se siguió el procedimiento descrito en el apartado 2.3.4 para el cual fue necesario dividir la cuenca en las áreas de influencia de cada estación, como se ilustra en la Figura 3.10.

Luego de delimitar cada estación con su respectiva zona de influencia, se determinaron las áreas de cada polígono con el software *ArcMap* y junto con el empleo de la ecuación 2.40 se establecieron las precipitaciones máximas en 24 horas para cada periodo de retorno, no obstante únicamente un periodo de retorno de T=100 años según lo recomendado por *Ochoa* [1] alcanzando así un valor de **56.63 mm** como muestra la Tabla 3.16.

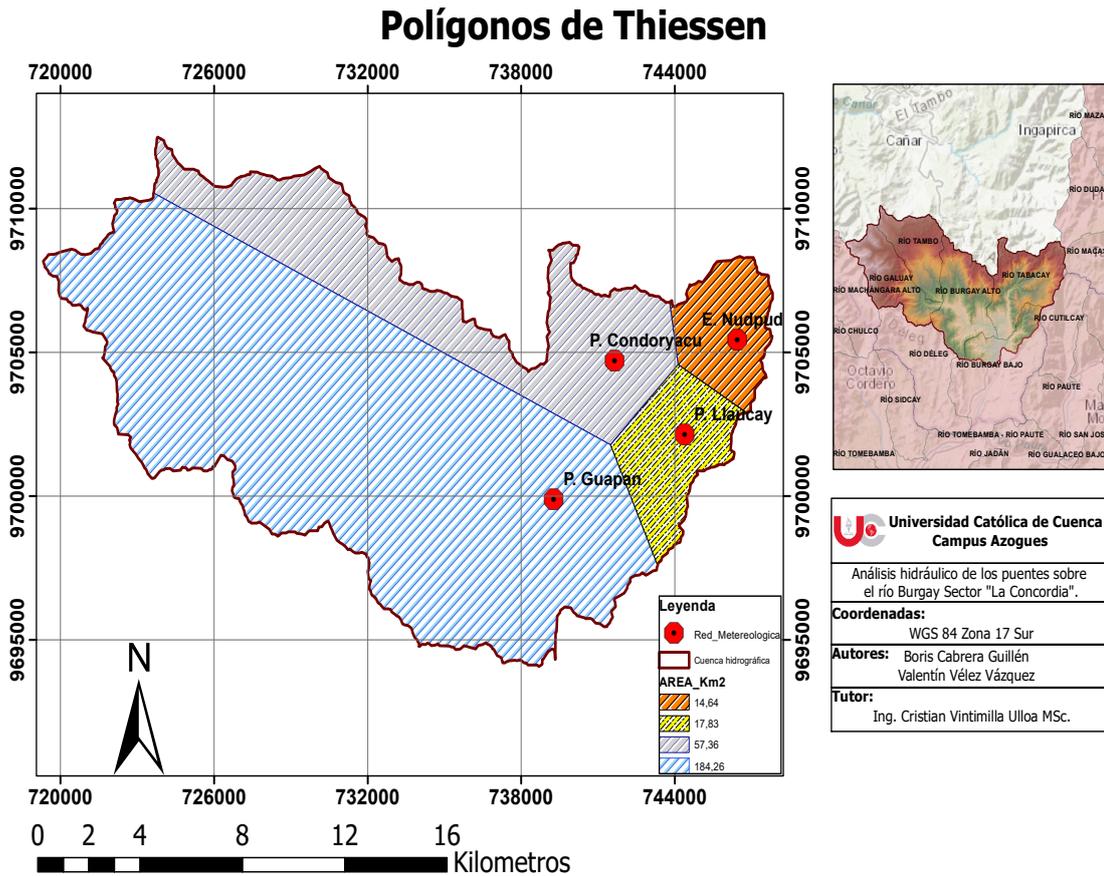


Figura 3.10: Polígono de Thiessen aplicado a la cuenca del proyecto.

Tabla 3.16: Precipitación máxima (24 horas) para periodo de retorno 100 años.

T (100 años)			
Estación	Área (km ²)	Precipitación (mm)	Prec.*A
Condoryacu	57.35	68.48	3927.28
Nudpud	14.63	35.22	515.32
Guapán	184.26	55.35	10199.38
Llaucay	17.83	49.35	879.89
Total	274.07		15521.86
Prec. Máx (mm)			56.63

■ Método de las isoyetas

Se realizó la interpolación spline de datos en el software *ArcMap* que consiste en el empleo de funciones matemáticas que suavizan las superficies de tal manera que los puntos pasen precisamente a través de ellas, debido a que no se cuenta con la información hidrometeorológica suficiente para que se distribuya la precipitación de manera uniforme a lo largo de la cuenca de aporte, por lo que conforme con los datos existentes se calculó el área de las isoyetas que le corresponde a cada una de las estaciones que son: *Condoryacu*, *Nudpud*,

Guapán y Llaucay como muestra la Figura 2.41, los datos de lluvia utilizados corresponden a un periodo de retorno de $T=100$ años.

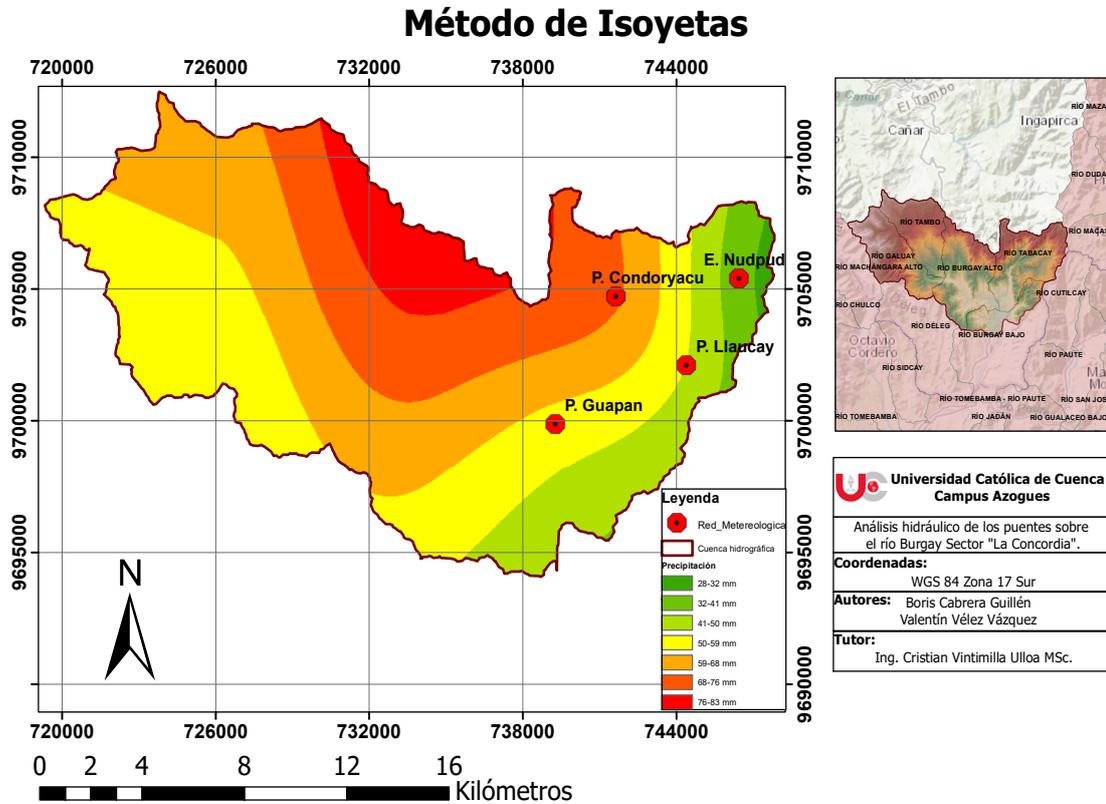


Figura 3.11: Mapa de isoyetas de la cuenca de aporte.

Conforme a lo que describe la ecuación 2.41 con este método se determinaron siete intervalos con diferentes promedios de precipitación que se muestran en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17: Método de las isoyetas para cálculo de precipitación máxima.

Método Isoyetas					
Intervalo	Precipitación Min (mm)	Precipitación Max (mm)	Precipitación Promedio (mm) (A)	Área (Km ²) (B)	A*B
1	28	32	30	19.44	582.921513
2	32	41	36	51.53	1873.40291
3	41	50	45	77.44	3505.53258
4	50	59	54	84.86	4597.82058
5	59	68	63	30.70	1936.65624
6	68	76	72	8.32	598.781781
7	76	83	80	1.81	144.13341
Total				274.08	13239.249
Prec. Máx (mm)					48.3

Del método del promedio aritmético se obtuvo una precipitación máxima de la cuenca de 52.10 mm, en cambio con la metodología propuesta por *Thiessen* una precipitación de 56.63 mm y por último con el empleo de las isoyetas el valor de la precipitación es de 48.3 mm. Por lo tanto para tener mayor seguridad en la precipitación de diseños se asume como valor de precipitación máxima de la cuenca el valor de **56.63 mm**.

Método *Dick Peschke* para cálculo de precipitaciones en duraciones menores de una hora.

Luego de determinar la precipitación máxima de diseño de la cuenca de aporte a los puentes, se aplicó el modelo de *Dick Peschke* descrito en la sección 2.3.6 y aplicando la ecuación 2.43, se obtuvieron las precipitaciones para las 24 horas del día en función de la precipitación máxima alcanzada como se muestra en la Tabla 3.18.

Consecuentemente, se procedió a estimar las intensidades en función de las precipitaciones alcanzadas usando la fórmula 2.44, las intensidades obtenidas se denotan en la Tabla 3.19.

Tabla 3.18: Precipitaciones en 24 horas aplicando el modelo *Dick Peschke*.

Modelo de <i>Dick Peschke</i> .			
Precipitación Máx Diaria (mm)			
56.63			
Duración (Minutos)	Periodo de retorno (años)	Duración (Minutos)	Precipitación (mm)
	100		
Precipitación (mm)			
5	13.75	480	43.03
10	16.35	540	44.32
15	18.09	600	45.50
20	19.44	660	46.60
25	20.56	720	47.62
30	21.51	780	48.58
35	22.36	840	49.49
40	23.12	900	50.35
45	23.81	960	51.17
50	24.45	1020	51.95
55	25.03	1080	52.70
60	25.59	1140	53.42
120	30.43	1200	54.11
180	33.67	1260	54.77
240	36.18	1320	55.41
300	38.26	1380	56.03
360	40.04	1440	56.63
420	41.62		

Siguiendo con la metodología, se construyó el hietograma de precipitación empleando el método de los bloques alternos descrito en la sección 2.3.10, para un período de retorno de 100 años, se establecieron las precipitaciones para cada hora indicadas en la Tabla 3.20, donde la precipitación máxima alcanzada fue de **25.59 mm** y la Figura 3.12 muestra la representación gráfica del hietograma.

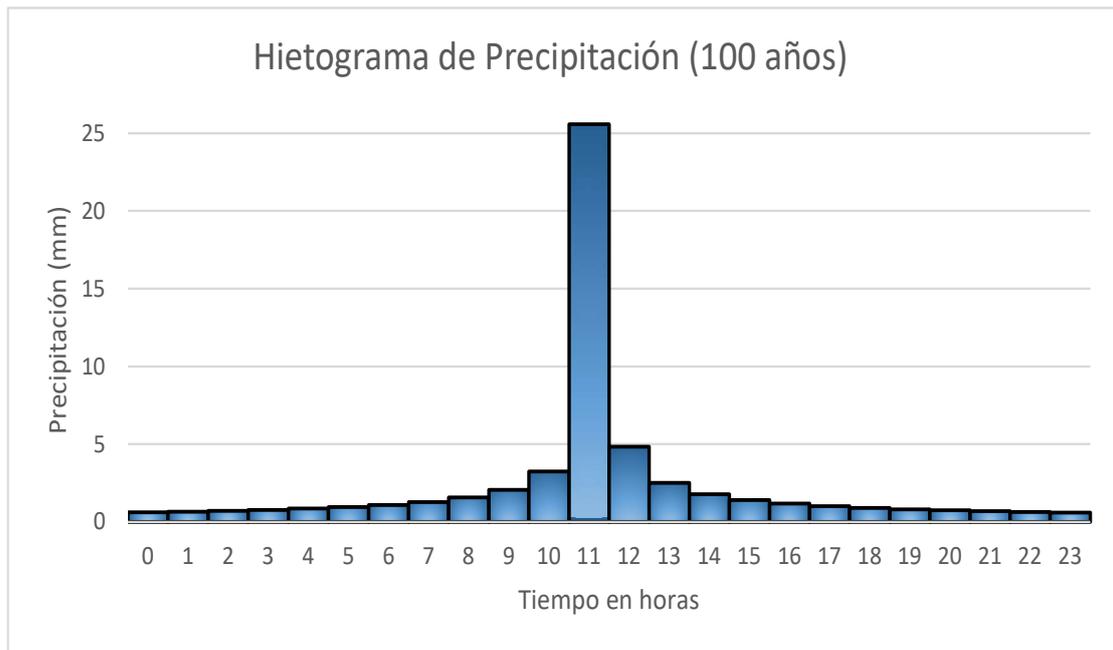


Figura 3.12: Hietograma de precipitación de la cuenca.

Tabla 3.19: Intensidades de la cuenca.

Intensidades para un periodo de retorno de 100 años					
Duración (Horas)	Duración (min)	Intensidad (mm/hr)	Duración (Horas)	Duración (min)	Intensidad (mm/hr)
0.083	5	164.96	8.000	480	5.38
0.167	10	98.09	9.000	540	4.92
0.250	15	72.37	10.000	600	4.55
0.333	20	58.32	11.000	660	4.24
0.417	25	49.33	12.000	720	3.97
0.500	30	43.03	13.000	780	3.74
0.583	35	38.33	14.000	840	3.54
0.667	40	34.68	15.000	900	3.36
0.750	45	31.75	16.000	960	3.20
0.833	50	29.33	17.000	1020	3.06
0.917	55	27.31	18.000	1080	2.93
1.000	60	25.59	19.000	1140	2.81
2.000	120	15.21	20.000	1200	2.71
3.000	180	11.22	21.000	1260	2.61
4.000	240	9.05	22.000	1320	2.52
5.000	300	7.65	23.000	1380	2.44
6.000	360	6.67	24.000	1440	2.36
7.000	420	5.95			

3.2.7. Usos del suelo de la cuenca de aporte

El mapa de suelos se determinó siguiendo la clasificación dada por el *Ministerio de Agricultura del Ecuador*, los shapets necesarios fueron descargados de la página oficial *SIG Tierras* y con la ayuda del *ArcMap* se determinó el área y uso de suelos

de la cuenca que se puede observar en la Figura 3.13. Por otra parte, las áreas que se determinaron para cada tipo de cobertura están desglosadas en la Tabla 3.21.

Tabla 3.20: Método de bloques alternos para construcción de hietograma.

Método de bloques alternos					
Tiempo Min	horas	Intensidad (mm/h)	P. Acumulada (mm)	P.incrementada	Precipitación (mm)
0	0	0	0	0	0
60	1	25.59	25.59	25.59	0.62
120	2	15.21	30.43	4.84	0.66
180	3	11.22	33.67	3.25	0.72
240	4	9.05	36.18	2.51	0.78
300	5	7.65	38.26	2.08	0.86
360	6	6.67	40.04	1.78	0.96
420	7	5.95	41.62	1.57	1.10
480	8	5.38	43.03	1.41	1.29
540	9	4.92	44.32	1.29	1.57
600	10	4.55	45.50	1.18	2.08
660	11	4.24	46.60	1.10	3.25
720	12	3.97	47.62	1.02	25.59
780	13	3.74	48.58	0.96	4.84
840	14	3.54	49.49	0.91	2.51
900	15	3.36	50.35	0.86	1.78
960	16	3.20	51.17	0.82	1.41
1020	17	3.06	51.95	0.78	1.18
1080	18	2.93	52.70	0.75	1.02
1140	19	2.81	53.42	0.72	0.91
1200	20	2.71	54.11	0.69	0.82
1260	21	2.61	54.77	0.66	0.75
1320	22	2.52	55.41	0.64	0.69
1380	23	2.44	56.03	0.62	0.64
1440	24	2.36	56.63	0.60	0.60

Tabla 3.21: Uso del suelo de la cuenca de aporte.

Cobertura	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Área poblada	13,817951	5,0 %
Bosque nativo	2,805202	1,0 %
Cuerpo agua	0,184986	0,1 %
Cultivo	19,516324	7,1 %
Erial	0,705457	0,3 %
Infraestructura antrópica	1,116804	0,4 %
Paramo	39,341996	14,4 %
Pastizal	141,533854	51,6 %
Plantación forestal	27,206533	9,9 %
Vegetación arbustiva	23,039039	8,4 %
Vegetación herbácea	4,81639	1,8 %
Total	274,084536	100,0 %

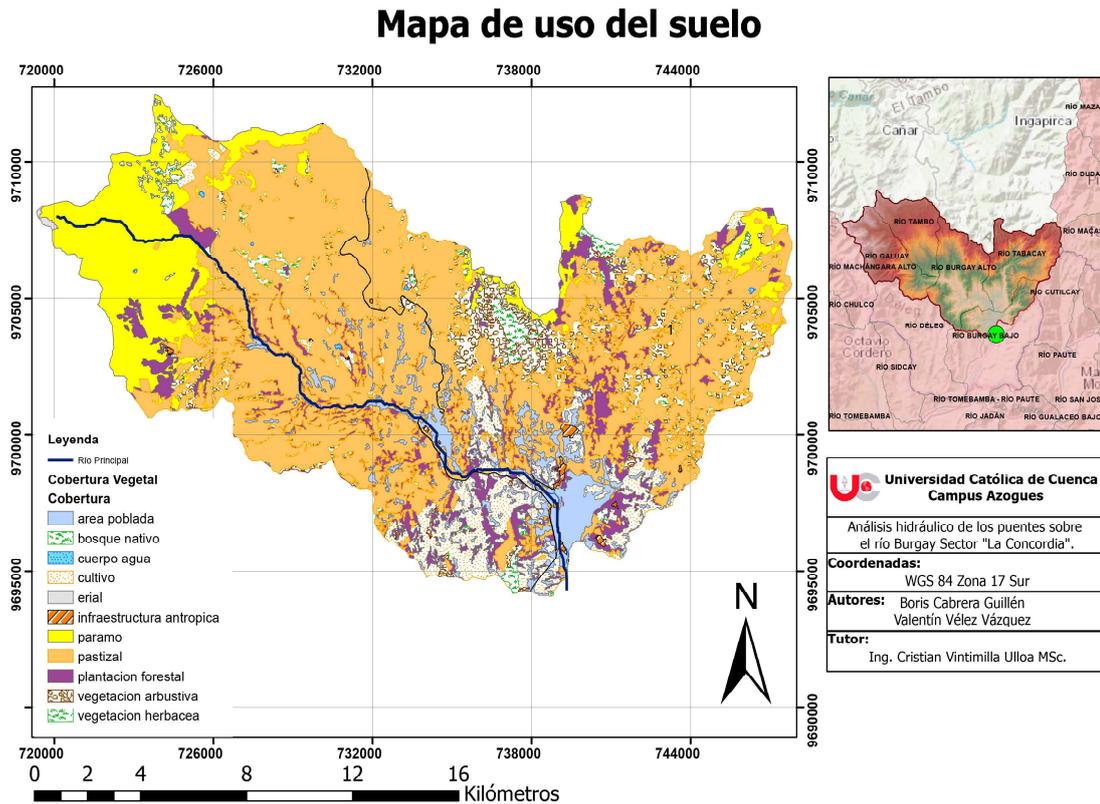


Figura 3.13: Mapa de uso del suelo.

3.2.8. Tipo de suelo

El tipo de suelo se determinó aplicando la misma metodología de la sección 3.2.7. A partir de los datos extraídos del *ArcMap* se clasificó a los suelos usando como guía la Tabla 2.6 y se definió el porcentaje que ocupan en la cuenca. La Figura 3.14 y la Tabla 3.22 describen el procedimiento.

Tabla 3.22: Tipo del suelo de la cuenca de aporte.

Textura	Geopedología		Tipo
	Area (km ²)	Porcentaje (%)	
Arcilla pesada	15,014115	5,5 %	C
Arcillo-Arenoso	0,318247	0,1 %	C
Arcillo-Limoso	3,268455	1,2 %	D
Arcilloso	15,029789	5,5 %	C
Areno Francoso	0,240999	0,1 %	A
Franco	37,128463	13,5 %	B
Franco Arcilloso-Arenoso	32,013065	11,7 %	C
Franco Arcilloso-Limoso	3,785786	1,4 %	C
Franco Arcilloso	27,619108	10,1 %	B
Franco Arenoso	127,598805	46,6 %	B
Franco Limoso	0,014729	0,0 %	B
No Aplicable	12,052973	4,4 %	NA
Total	274,084534	100 %	

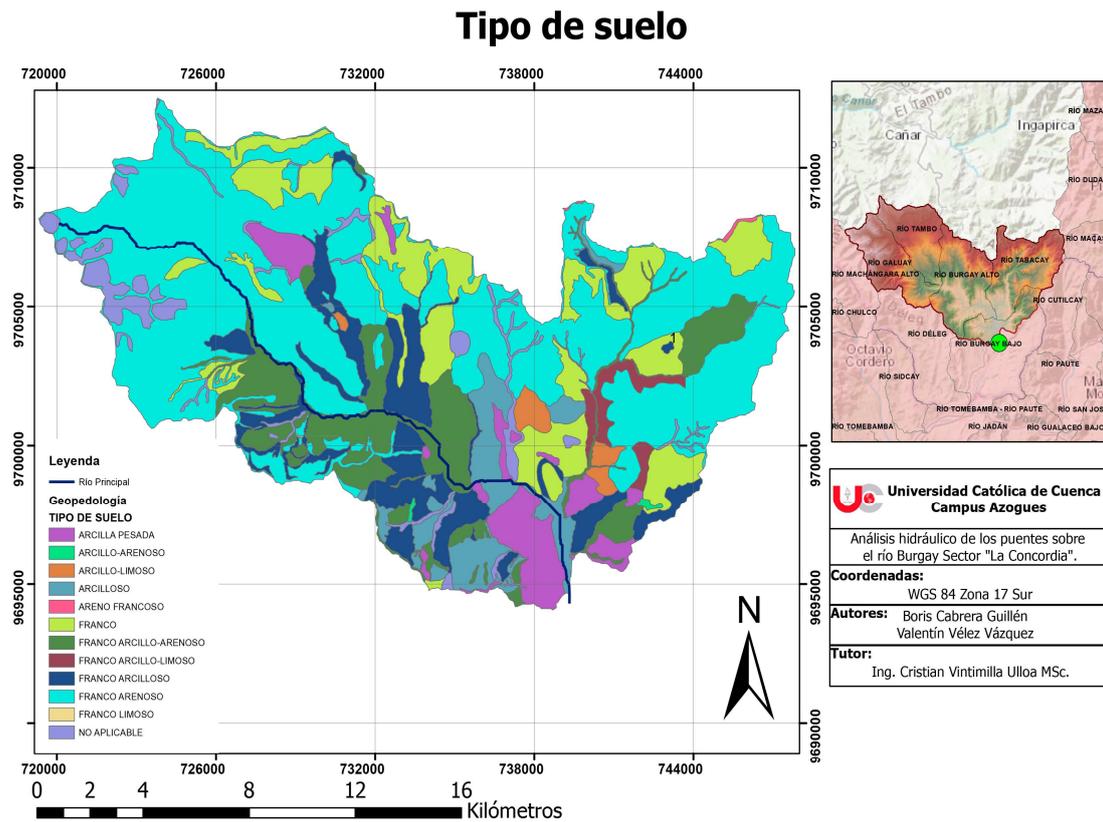


Figura 3.14: Mapa de tipo del suelo.

3.2.9. Tiempo de concentración y tiempo de retardo

Empleando la ecuación 2.7 se calculó el tiempo de concentración con una longitud del río principal L de **27.07** km los cuales se transformaron a metros y con una pendiente S media del cauce del **7.83** %, por ende el valor calculado es de **138** minutos. Para complementar con la sección se aplicó la fórmula 2.8 para determinar el tiempo de retardo que resultó de **83** minutos.

3.2.10. Estimación del número de curva

El cálculo de número de curva se determinó a partir de los mapas y tablas mostrados en las secciones 3.2.8 y 3.2.7, seguido de eso, se establecieron los números de curva para cada cobertura según la clasificación de *Chow* [21], a continuación cada número de curva asumido ubicado en la columna CN de cada tipo de suelo, fue multiplicado por el porcentaje de área que ocupa su cobertura correspondiente. Finalmente se realizó la suma de cada número de curva para dicho tipo de suelo (A, B, C y D), la sumatoria total de cada uno de ellos fue multiplicada por el porcentaje de suelo propio de cada uno, luego el CN obtenido de todos los suelos, fue sumado al final para estimar el **CN Total** de la cuenca. Cabe aclarar que esta selección

está realizada a criterio por parte de los observadores. La Tabla 3.23 muestra el procedimiento utilizado en el número de curva.

Tabla 3.23: Cálculo del número de curva.

Cobertura Vegetal			Número de Curva							
Cobertura	Área (Km)	%	A		B		C		D	
			CN	CN *%	CN	CN *%	CN	CN *%	CN	CN *%
Área poblada	13,817951	5,0 %	77	3,88	85	4,29	90	4,54	92	4,64
Bosque nativo	2,805202	1,0 %	25	0,26	55	0,56	70	0,72	77	0,79
Cuerpo agua	0,184986	0,1 %	100	0,07	100	0,07	100	0,07	100	0,07
Cultivo	19,516324	7,1 %	72	5,13	81	5,77	88	6,27	91	6,48
Erial	0,705457	0,3 %	68	0,18	79	0,20	86	0,22	89	0,23
Infraestructura antrópica	1,116804	0,4 %	98	0,40	98	0,40	98	0,40	98	0,40
Páramo	39,341996	14,4 %	39	5,60	61	8,76	74	10,62	80	11,48
Pastizal	141,533854	51,6 %	39	20,14	61	31,50	74	38,21	80	41,31
Plantación forestal	27,206533	9,9 %	25	2,48	55	5,46	70	6,95	77	7,64
Vegetación arbustiva	23,039039	8,4 %	39	3,28	61	5,13	74	6,22	80	6,72
Vegetación herbácea	4,81639	1,8 %	39	0,69	61	1,07	74	1,30	80	1,41
TOTAL	274,084536	100,0 %	Sum	42,09	Sum	63,20	Sum	74,21	sum	79,76
		Porcentaje del suelo		0,09 %		70 %		24 %		1 %
		CN Obtenido		0,04		44,36		17,91		0,95
							CN Total			63,26

Conforme indica la tabla 3.23 el valor de CN Total es de **63,26** el cual será considerado el valor ponderado del número de curva para toda la cuenca de aporte a los puentes de la avenida *16 de Abril*.

3.2.11. Retención potencial máxima y cálculo de abstracción inicial

Estas variables son el resultado del empleo de las ecuaciones 2.51 y la 2.49, como bien indican las fórmulas es necesario calcular de inicio la retención potencial máxima que requiere del número de curva CN estimado que para este caso será de 63.26, con el dato mencionado se definió una retención potencial máxima de **147 mm**. Como se mencionó anteriormente de acuerdo a la fórmula 2.49 la abstracción inicial estimada es de **30 mm** este valor servirá como dato de entrada al programa de modelización *HEC-HMS*.

3.2.12. Cálculo del caudal en *HEC-HMS*

Se ingresaron los parámetros de área y red hídrica de la cuenca, posteriormente el número de curva, abstracción inicial y tiempo de retardo fueron implementados al modelo del programa computacional *HEC-HMS* en el que se empleó la metodología *SCS* para abstracciones descrita en la sección 2.3.8, con la modelización ejecutada del caudal máximo para la cuenca resultó de **85.6 m³/s**, el cuadro de resultados del software se indican en la Figura 3.15 donde se puede apreciar el hidrograma para la cuenca de aporte a los puentes de la avenida *16 de Abril*.

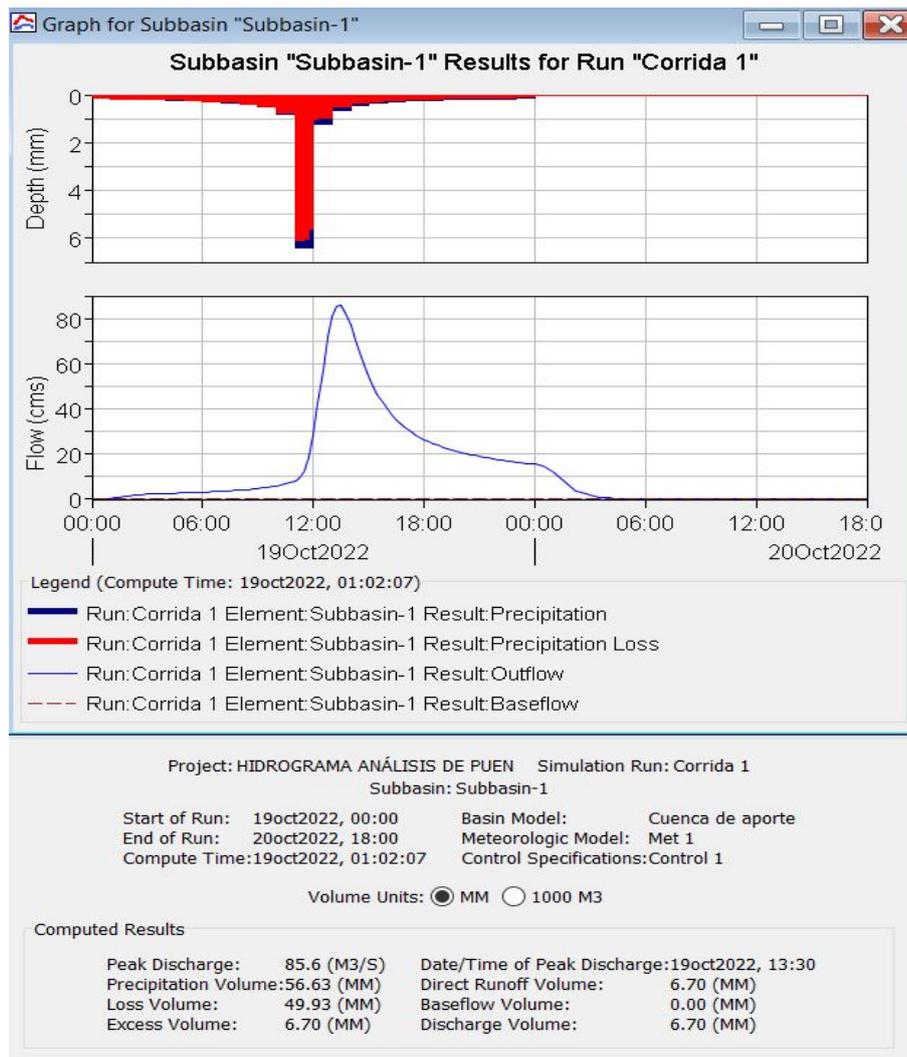


Figura 3.15: Hidrograma y resultados alcanzados en software HEC-HMS.

3.3. Análisis Hidráulico

Siguiendo la metodología aplicada por *Perozo y Rincón* [46] se recopilarán todos los datos de la batimetría, rugosidad, caudales máximos y modelos digitales del terreno para ser incorporados al modelo hidráulico unidimensional *HEC-RAS*, de tal modo que se pueda evaluar posibles inundaciones producto de crecidas máximas para periodos de retorno diferentes.

3.3.1. Topografía

La topografía se realizó con una extensión total de doscientos metros a lo largo del cauce, dividiéndolo en cien metros aguas arriba del puente y cien aguas abajo con un ancho aproximado de treinta metros, esto de acuerdo al largo de los puentes que cruzan transversalmente el río *Burgay*. En el levantamiento fue necesario el

planteamiento de cinco estaciones que sirvieron para tomar los datos en tres diferentes partes: superestructura del puente, río y llanuras de posibles inundaciones. Para el levantamiento batimétrico del río se siguieron las especificaciones de la sección 2.2.1 aplicando las consideraciones de la Figura 2.1 y los trabajos de Gallardo [8]. La Figura 3.16 muestra el resultado del levantamiento que se ingresó al *HEC-RAS*. El plano topográfico se expone con mayor detalle en la sección de Anexos.

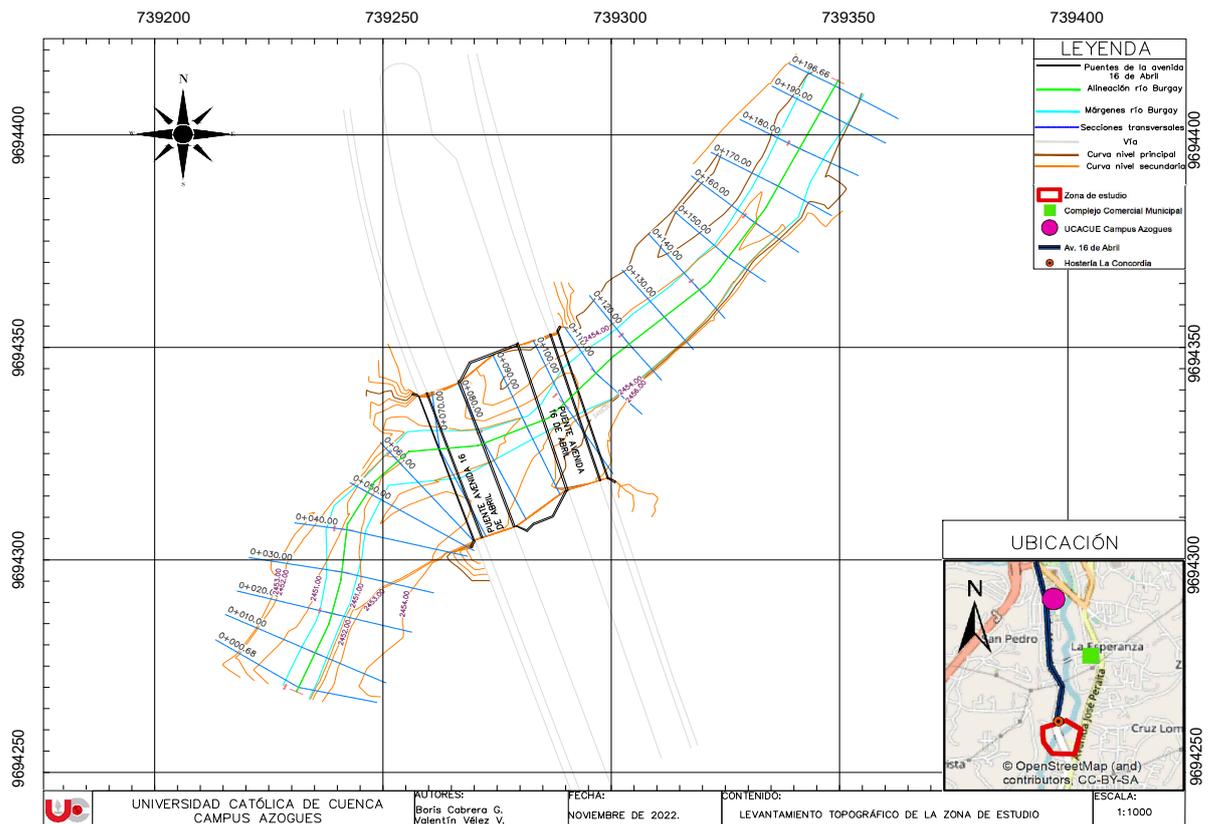


Figura 3.16: Topografía, alineamientos y secciones transversales de la zona de estudio.

3.3.2. Granulometría de suelos

La granulometría de los suelos ha sido obtenida con el propósito de encontrar los diámetros efectivos de las muestras recolectadas en diferentes porcentajes, permitiendo su ingreso en ecuaciones empíricas de autores mencionados en la sección 2.4.2 para estimar la rugosidad del cauce y márgenes del río.

La recolección de muestras se realizó siguiendo las especificaciones de la norma *INEN 686*, en cuatro puntos diferentes como se puede observar en la Figura 3.17. Para selección de los lugares de extracción fue necesario verificar que exista uniformidad en el material, sin la presencia de escombros, basura o residuos orgánicos. En cada punto se extrajo dos muestras de suelo separadas a un metro de distancia en

una cantidad de 5 kg de masa de material por cada una, después se dejó secar a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 72 horas.

Zonas de muestreo para ensayos granulométricos.

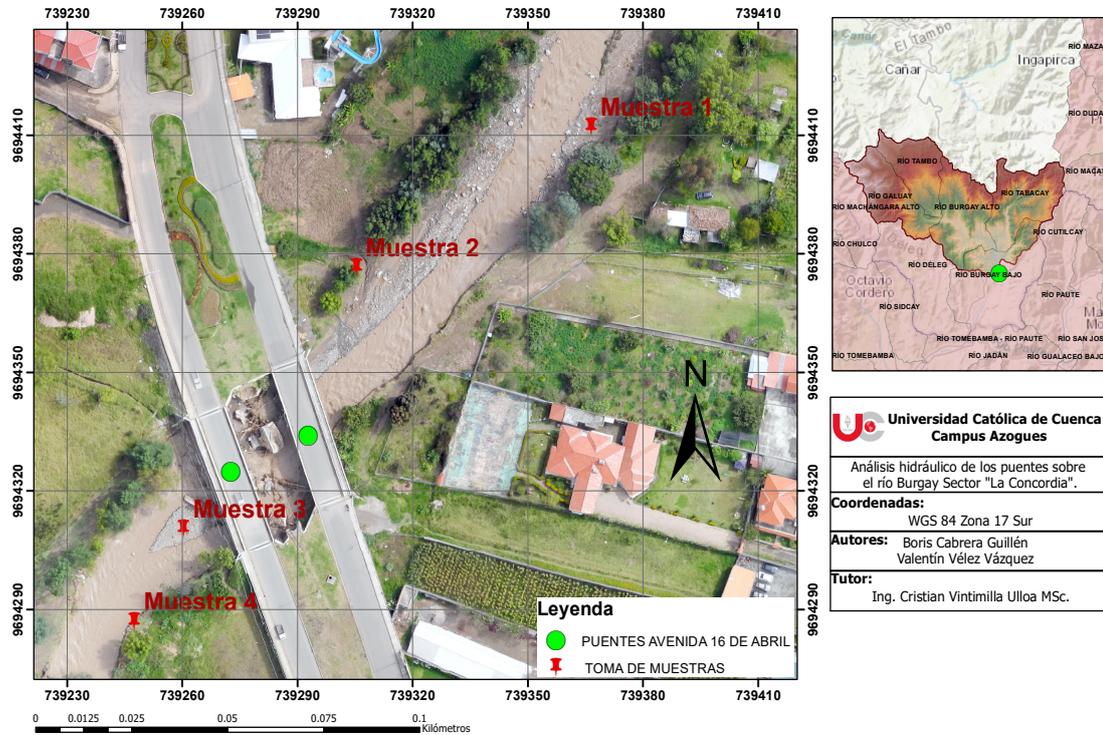


Figura 3.17: Lugares de recolección de muestras para ensayos de granulometría.

La granulometría se realizó en base a la norma *ASTM D 422* utilizando desde el tamiz de 3" (pulgadas) hasta el tamiz N°200, colocando inicialmente la muestra en la tamizadora automática del Anexo 7.7 para material grueso de partículas mayores a 4.75mm dejando que el equipo trabaje por el tiempo de un minuto, una vez culminado el procedimiento anterior se pesó el material retenido en cada uno de los tamices separándolos cuidadosamente sin perder parte de la muestra. El mismo procedimiento se realizó con el material restante menor a 4.75mm con los tamices N°4 hasta el N°200 en la tamizadora con movimientos laterales y verticales.

Los resultados de la granulometría para cada una de las muestras se encuentran especificados en las Tablas 3.24, 3.25 y 3.26, a partir de estos resultados se graficó la curva granulométrica empleando la ecuación 2.53 para encontrar los diámetros efectivos D_{50} , D_{65} , D_{90} necesarios en el cálculo del coeficiente de *Manning*.

Tabla 3.24: Granulometría de ensayo realizado para la muestra 1.

Datos granulométricos de la Muestra 1 (Cauce aguas arriba).						
Tamiz No.	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que Pasa
3"	76.100	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.300	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	221.38	221.38	14.86	14.86	85.14
3/4"	19.050	120.50	341.88	8.09	22.94	77.06
3/8"	9.525	218.66	560.54	14.67	37.62	62.38
#4	4.760	212.26	772.80	14.25	51.86	48.14
#10	2.000	212.90	985.70	14.29	66.15	33.85
#40	0.426	258.91	1244.61	17.38	83.53	16.47
#60	0.250	108.27	1352.88	7.27	90.80	9.20
#100	0.149	65.64	1418.52	4.41	95.20	4.80
#200	0.074	42.02	1460.54	2.82	98.02	1.98
	Fondo	29.49	1490.03	1.98	100.00	0.00
	Total	1490.03		100.00		

Tabla 3.25: Granulometría de ensayo realizado para la muestra 2 y 4.

Datos granulométricos de la muestra 2 y 4 (Ribera del río Burgay)						
Tamiz No.	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que Pasa
3"	76.100	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.300	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1"	25.400	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	19.050	22.16	22.16	2.62	2.62	97.38
1/2"	12.700	146.83	168.99	17.37	19.99	80.01
3/8"	9.525	137.96	306.95	16.32	36.30	63.70
#4	4.760	403.67	710.62	47.74	84.05	15.95
#10	2.000	36.91	747.53	4.37	88.41	11.59
#30	0.590	52.88	800.41	6.25	94.67	5.33
#40	0.426	12.25	812.66	1.45	96.12	3.88
#60	0.250	15.57	828.23	1.84	97.96	2.04
#100	0.149	9.46	837.69	1.12	99.08	0.92
#200	0.074	7.19	844.88	0.85	99.93	0.07
	Fondo	0.61	845.49	0.07	100.00	0.00
	Total	845.49		100.00		

Los diámetros efectivos para cada uno de las muestras obtenidas se resumen en la Tabla 3.27, como se puede apreciar los valores de la muestra 2 y 4 coinciden debido a que las muestras recolectadas de la ribera del río corresponden al mismo tipo de suelo.

Las curvas granulométricas y los diámetros efectivos de cada uno de los ensayos se muestran en las Figura 3.18, a través de las cuales se determinó el tipo de suelo para cada una de las muestras, en los ensayos 1, 2 y 4 se obtiene un suelo *Gravoso con alto contenido de arena*, mientras que el ensayo 3 presenta un suelo *Arenoso con alto contenido de grava*. Las variaciones en la distribución de las partículas sugieren un cambio significativo en las rugosidades de cada zona analizada, por lo que aplicar diferentes métodos para calcular el coeficiente de *Manning* es indispensable para un mejor acercamiento al valor real del mismo.

Tabla 3.26: Granulometría de ensayo realizado para la muestra 3.

Datos granulométricos de la Muestra 3 (Cauce aguas abajo)						
Tamiz No.	Abertura (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% que Pasa
3"	76.100	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2"	50.300	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
1 1/2"	38.100	111.14	111.14	7.41	7.41	92.59
1"	25.400	194.37	305.51	12.96	20.37	79.63
3/4"	19.050	106.78	412.29	7.12	27.49	72.51
1/2"	12.700	96.93	509.22	6.46	33.96	66.04
3/8"	9.525	32.58	541.80	2.17	36.13	63.87
#4	4.760	120.17	661.97	8.01	44.14	55.86
#10	2.000	133.55	795.52	8.91	53.05	46.95
#30	0.590	316.88	1112.40	21.13	74.18	25.82
#40	0.426	118.30	1230.70	7.89	82.07	17.93
#60	0.250	160.80	1391.50	10.72	92.79	7.21
#100	0.149	77.39	1468.89	5.16	97.95	2.05
#200	0.074	24.87	1493.76	1.66	99.61	0.39
	Fondo	5.90	1499.66	0.39	100.00	0.00
	Total	1499.66		100.00		

Tabla 3.27: Diámetros efectivos calculados para cada muestra.

Muestra	Diámetros Efectivos (mm)					
	D_{10}	D_{30}	D_{50}	D_{60}	D_{65}	D_{90}
1 (Cauce aguas arriba)	0.27	1.42	5.21	8.48	10.78	31.75
2 (Ribera río)	1.47	5.84	7.81	9.03	9.75	16.04
3 (Cauce aguas abajo)	0.29	0.75	2.69	6.81	11.06	35.13
4 (Ribera río)	1.47	5.84	7.81	9.03	9.75	16.04

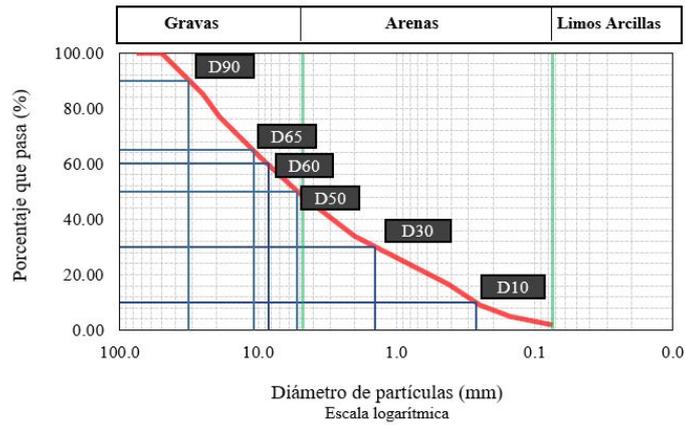
Cálculo de coeficiente de *Manning*

Para estimar el coeficiente de *Manning* en todas las muestras se aplicaron las ecuaciones empíricas de la sección 2.4.2, esto gracias a que fue posible establecer las variantes de cálculo necesarios en la sección 3.3.2. Los resultados de la tabla 3.28 obtenidos a partir de las ecuaciones empíricas brindan una aproximación de la rugosidad del material que forma parte de la ribera y cauce del río *Burgay*, no obstante, el arrastre de sedimentos y los escombros presentes que se muestran en la Figura 3.17 obligaron a un análisis mediante el método de medición de velocidades lo que otorga una mayor seguridad en los resultados.

Tabla 3.28: Estimación de n de *Manning* con ecuaciones empíricas.

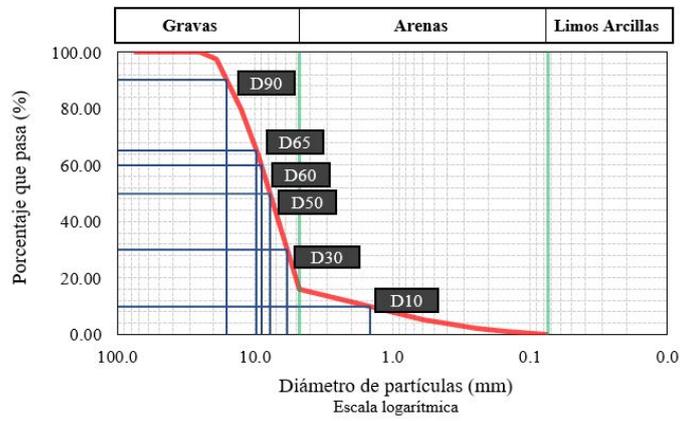
Autor	Ecuación	Coeficiente n de Manning		
		Muestra 1 (Cauce aguas arriba)	Muestra 2 y 4 (Ribera Burgay)	Muestra 3 (Cauce aguas abajo)
Meyer-Peter Muller (1948)	2.54	0.021	0.019	0.022
Raudkin (1976)	2.56	0.017	0.017	0.019
Raudkin (1976)	2.57	0.019	0.019	0.019
Garde y Raju (1976)	2.58	0.020	0.021	0.018

Distribución del Tamaño de Partículas Muestra 1



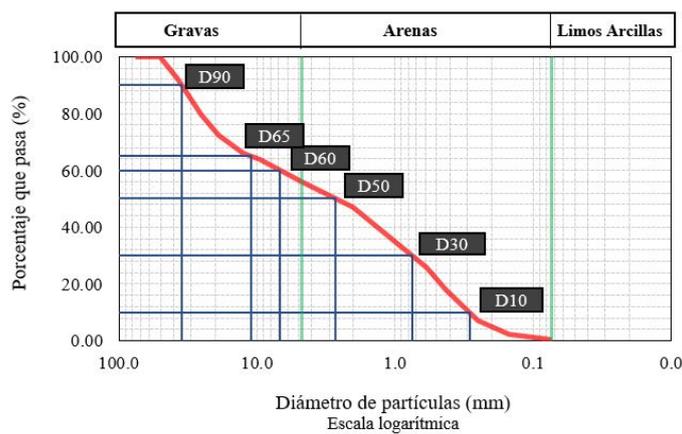
(a) Muestra 1, cauce aguas arriba.

Distribución del Tamaño de Partículas Muestras 2 y 4



(b) Muestra 2 y 4, ribera *Burgay*.

Distribución del Tamaño de Partículas Muestra 3



(c) Muestra 3, cauce aguas abajo.

Figura 3.18: Curva granulométrica y diámetros efectivos de muestras ensayadas.

Coefficiente de *Manning* con el método de medición de velocidades

Este proceso inició con la medición de la velocidad del río *Burgay* en dos secciones al 20 % y 80 % de la profundidad de cada una de sus verticales medidas desde la superficie libre del agua. En total fueron realizadas cinco mediciones con el molinete en distintos días para cada sección que estaban divididas individualmente en veinte verticales.

Con la aplicación de la ecuación 2.52 se calculó el coeficiente n correspondiente a cada una de las verticales como se presentan en el Anexo 7.9, en la columna n^* se prescindieron de los resultados que se encontraban fuera los intervalos definidos por el promedio y la suma o diferencia de una desviación estándar. En la Tabla 3.29 se sintetizan los resultados por días de cada sección examinada y su ponderación con los resultados de las ecuaciones empíricas. Como se puede observar el valor del coeficiente n de *Manning* para el cauce de aguas arriba resultó en **0.031** y para aguas abajo de **0.023**, mientras que para la ribera del *Burgay* fue de **0.020** simplemente ponderando los resultados determinados con las ecuaciones empíricas en la Tabla 3.28.

Tabla 3.29: Ponderación del coeficiente de *Manning* para cauce del río *Burgay*.

Método	Cauce Aguas arriba		Cauce Aguas abajo		
	n	n^*	n	n^*	
Medición de velocidad	Día 1	0.057	-	0.030	0.030
	Día 2	0.048	-	0.023	0.023
	Día 3	0.043	0.043	0.037	-
	Día 4	0.035	0.035	0.033	-
	Día 5	0.037	0.037	0.027	0.027
Meyer-Peter y Muller (1948)		0.021	0.021	0.022	0.022
Raudkin (1976)	Ec. 3.53	0.017	-	0.019	0.019
	Ec. 3.54	0.019	-	0.019	0.019
Garde y Raju (1976)		0.020	0.020	0.018	-
	Promedio	0.033	0.031	0.025	0.023
	Desv. Est	0.014	0.010	0.007	0.004
	- (0.014)	0.019		0.019	
	+ (0.014)	0.047		0.032	

3.3.3. Aforos en el río *Burgay*

En esta etapa del proyecto se contó con el apoyo de siete estudiantes de la carrera de *Ingeniería Civil* de la *Universidad Católica de Cuenca*, Campus Azogues, quienes cumpliendo con sus prácticas laborales brindaron su apoyo y entereza para el desarrollo de los aforos en el río *Burgay*. El proceso de medición fue realizado durante 5 días, según el horario establecido previamente con los estudiantes, con

una duración media de 3 horas en cada sección, cabe recalcar que existieron días de medición que fueron descartados por condiciones climáticas adversas y peligrosidad del río.

Mediante un recorrido a la zona de estudio, se inspeccionó los sectores del río *Burgay* aguas arriba y aguas abajo, donde se pueden emplazar las líneas de aforo correspondientes y con base en el trabajo de titulación *Estimación de caudal en cauces naturales mediante integración numérica aplicando lenguaje Python* realizado por *Jaramillo* [37], se seleccionaron los sectores que cumplen con la mayoría de condiciones descritas en el apartado 2.4.3, consecuentemente, las secciones **S1** y **S2** ubicadas en las abscisas +196.66 y +20.00 respectivamente, fueron consideradas las más adecuadas para el proceso de medición, la geometría y ubicación de cada una de ellas se muestran en la Figura 3.19. Las líneas de aforo según las abscisas descritas se exponen en la Figura 3.33

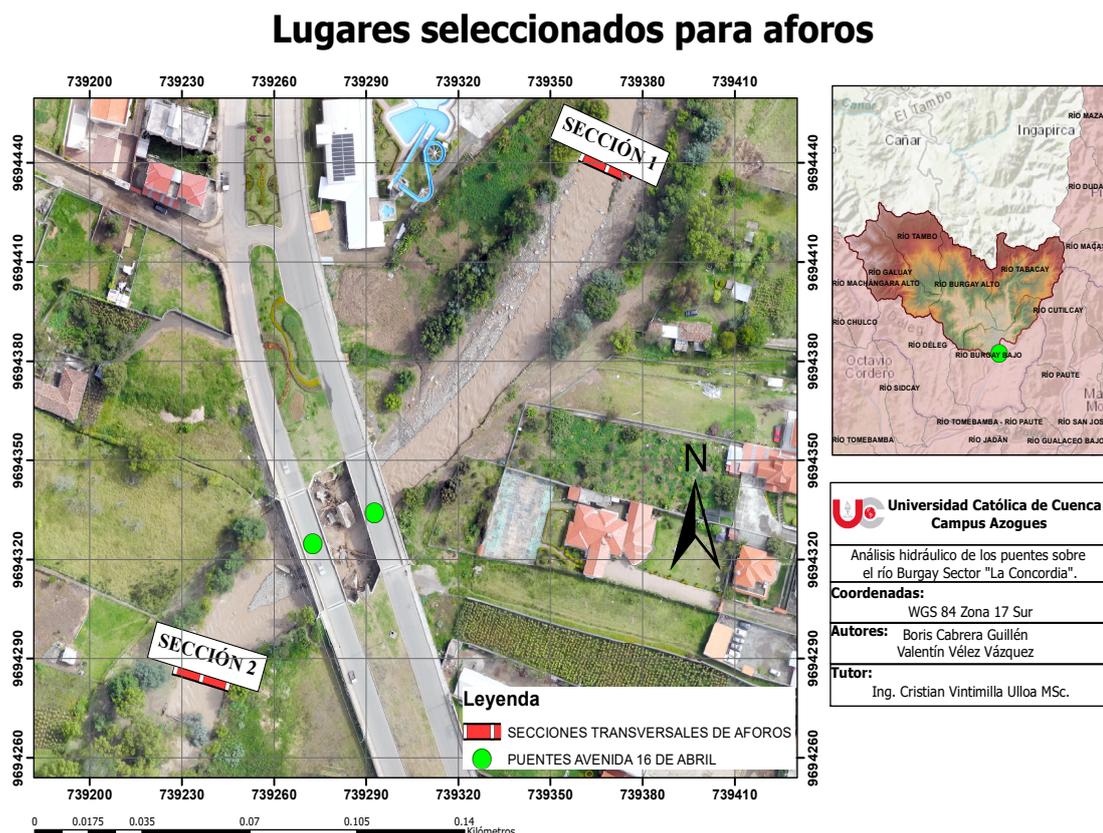


Figura 3.19: Sitios seleccionados para los aforos.

La sección **S1** se ubica en las coordenadas UTM 739362.438 m E; 9694441.682 m N, en el sector posterior de la hostería *La Concordia* y aguas arriba de los puentes de la avenida *16 de Abril*, a su vez, la sección **S2** se sitúa aguas abajo de los puentes, próximo al *Mirador Rooftop* y con las coordenadas UTM 739244.55 m E, 9694283.63

m N. Las zonas elegidas para los aforos distan de los puentes a unos 100 y 100 metros respectivamente de los mismos, no se pudieron emplazar las líneas de aforo en lugares más cercanos a la estructura de los puentes, debido a la irregularidad del terreno, tramos en forma de curva, dificultad de acceso al río por la acumulación de escombros del antiguo puente del ferrocarril y principalmente por la presencia de grandes obstáculos en gran parte de la corriente del río.

Previo al proceso de medición y conociendo los lugares donde se los realizará, se procedió a la limpieza de obstáculos en la línea de aforo, para garantizar la seguridad del personal y evitar errores en las lecturas de velocidad producto de cambios de dirección de flujo o contracorrientes. Al ser un aforo por vadeo, es decir se puede ingresar a la corriente se tomaron todas las medidas de seguridad y protección para el personal especificados en la sección 2.4.5. En cuanto a la seguridad del personal, se contó con el apoyo del benemérito *Cuerpo de Bomberos del Cantón Azogues*, quienes mediante la buena disposición del señor coronel *Jairo Araujo*, proporcionaron una capacitación en temas de seguridad para trabajos en el río, la debida supervisión in-situ y brindaron el equipo de seguridad conformado por chalecos salvavidas, arneses, mosquetones, cuerdas, entre otros instrumentos necesarios para mantener la integridad de todos los involucrados en el proyecto.



Figura 3.20: Molinete de copas.



Figura 3.21: Capacitación en temas de seguridad por parte del *Cuerpo de Bomberos del Cantón Azogues*.

Se instalaron las líneas de referencia de cada tramo seleccionado con el empleo de piola, estacas, nivel de burbuja, varilla de vadeo previamente graduada y cinta fosforescente. El lugar elegido para plantar las estacas fue el más estable posible en la zona, una vez fijadas, se templó una piola de extremo a extremo que será usada como el nivel de referencia y línea de guía para el proceso de medición, previamente en la piola se colocaron cintas con la distancia entre verticales correspondientes para cada sección, según el apartado 2.4.3 se divide el ancho total del río para 20, dando como resultados verticales cada 38 y 28 centímetros respectivamente. Para colocar la piola de manera transversal a la corriente, se siguieron las indicaciones ilustradas en la Figura 2.6, tal como se aprecia en la Figura 3.22 luego se comprobó la horizontalidad de la línea guía con el nivel de burbuja.

Para el proceso de medición de velocidades se empleó el molinete de copas disponible en la *Universidad Católica de Cuenca*, como parte del apoyo para el desarrollo de la presente investigación. El medidor de corriente fue empleado para cuantificar las velocidades a lo largo de cada sección transversal elegida para el estudio, las distancias verticales analizadas fueron del 20, 40, 60 y 80 por ciento de la altura de la lámina de agua, adicionalmente se tomó una lectura casi a nivel de la superficie libre y otra por debajo del veinte por ciento.

Según lo estipulado en la *Internacional Organization for Standardization (ISO)* [36] se recomienda tomar mínimo dos lecturas en cada punto de medición para descartar errores involuntarios por parte del operador y comprobar la normalidad de tendencia en los datos.



(a) Limpieza de obstáculos en líneas de aforo



(b) Línea de referencia en sección de aforo

Figura 3.22: Establecimiento de línea de referencia en secciones para aforos.

En la práctica se siguió la metodología de *Jaramillo* [37] la cual consistía en realizar las mediciones de velocidad en la sección S1 aguas arriba en horas de la mañana y el tramo S2 generalmente para las tardes de ese mismo día, puesto que el flujo sufre variaciones en el transcurso del día y con esto se pretende alcanzar datos certeros del comportamiento hidráulico del flujo en ese tramo del río *Burgay*. Se siguió el patrón AB-BA para ir variando con el orden de la toma de datos en cada sección durante los 5 días de aforo.

Los datos tomados en campo fueron registrados con el formato especificado en la Figura 3.23, donde se indica los datos generales del aforo como la fecha, nombre del aforador, sección, coordenadas UTM, ancho de la sección, separación entre verticales, hora de inicio y fin del aforo. También se contaba con un aparatado para escribir cualquier novedad presentada durante la práctica en la sección de observaciones. Para los números de verticales se tomaron números del 0 al 20 para enumerar las 21 separaciones de las verticales a lo largo de la sección, luego se anotaba la distancia entre el nivel de referencia y la vertical, la cual fue medida previamente y colocada en cada cinta fosforescente con su abscisa correspondiente, consecuentemente con la varilla de vadeo se midió la profundidad total del cauce hasta la línea de referencia en este caso la piola fijada con anterioridad.

Se repetía este proceso para cada una de las verticales y con el empleo de matemática básica de cada una de las alturas de lámina de agua medidas, se establecían

las distancias verticales del 20, 40, 60 y 80 por ciento de las verticales donde se tomarán las lecturas de velocidad. Cabe recalcar que a las alturas antes mencionadas se añaden dos lecturas arbitrarias cerca de la superficie libre y otra lo más cercano al lecho del río [37]. De la misma manera la Figura 3.24 ilustra el formato al que deben adaptarse los datos tomados en campo para su posterior análisis en *Python*, el cual solo difiere en el orden de algunas variables y añade una columna con una numeración del punto analizado.

Al finalizar la estimación de velocidad en cada uno de los puntos, se procede a cuantificar nuevamente la profundidad total del agua de cada vertical hasta la línea de referencia, ya que siempre existe alguna variación entre el nivel del agua al inicio y final de la práctica.

RECOLECCIÓN DE DATOS						
DATOS GENERALES						
Nombre de aforador	_____					
Fecha	_____					
Hora de Inicio	_____					
ID Sección	_____					
Coordenadas UTM	_____					
Ancho de sección (m)	_____					
Separación entre verticales (cm)	_____					
Hora de finalización	_____					
Observaciones	_____					

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (cm)	Profundidad total del cauce (cm)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de la velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)

Figura 3.23: Formato de toma de datos en campo [37].

No. Punto	No. Vertical	Distancia horizontal del margen de referencia (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (m)	Profundidad de observación de la velocidad desde la superficie libre (m)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (m)

Figura 3.24: Formato de entrada para datos en programa *Python* [37].

3.3.4. Aplicación de lenguaje de programación *Python*

El complemento *Spyder* necesario para interpretar el lenguaje de programación *Python* fue utilizado para la estimación de caudales a partir de velocidades calculadas en campo con el molinete. El proceso de cálculo del caudal utilizando *Python* inicia con el ingreso del código de programación tomado del trabajo de titulación realizado por *Johanna Jaramillo* [37] donde se detalla el algoritmo en su totalidad, luego de ingresar la codificación respectiva, el programa muestra la ventana de interacción detallada en la Figura 3.25, en donde se debe ingresar el archivo *Excel* de los datos recogidos en campo con el formato de la Figura 3.24.

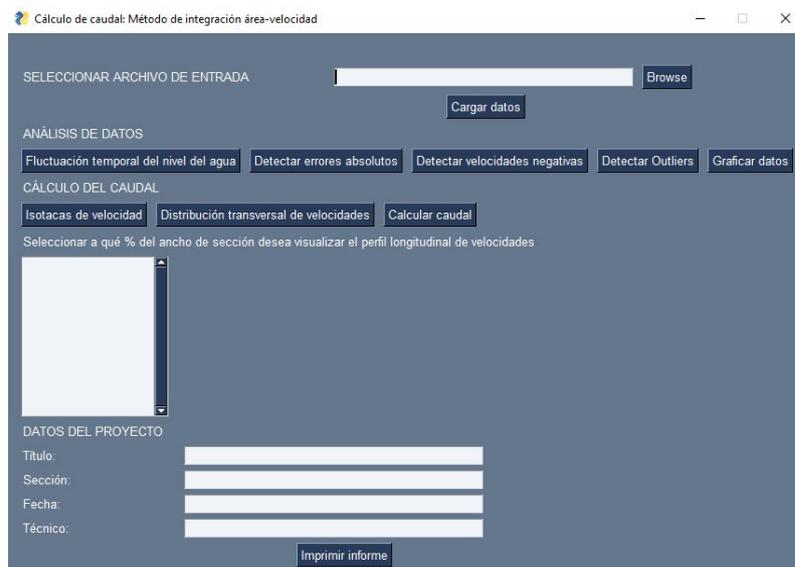


Figura 3.25: Ventana de interacción luego de ejecutar el programa [37].

Una vez ingresados los datos de los 5 días de aforo en las dos secciones motivo de estudio, el programa comprueba la irregularidad de los datos, valores negativos y errores de digitalización, luego de comprobar estos parámetros se tienen los caudales para cada día de aforo, los cuales se detallan en el siguiente apartado.

3.3.5. Caudales aforados

El proceso de aforos en la sección S1 ubicada aguas arriba y S2 localizada aguas abajo de los puentes del río *Burgay* sector *La Concordia* fueron realizados durante los días 12, 18, 19, 25 y 30 de noviembre del año 2022, en horarios tanto matutinos como vespertinos.

Los márgenes del río al estar compuestos por materiales pétreos arrastrados por la corriente y el transporte masivo de sedimentos, producido por las últimas crecientes suscitadas en el sector en el último tiempo, han provocado cambios en la geometría del cauce, por lo tanto se evidenció una variación mínima en los niveles de agua

de las dos secciones a lo largo de los 5 días aforados producto de la acumulación de sedimentos en el fondo del cauce, esto generaba un aumento o disminución del nivel del agua. En cuanto a la distribución de velocidades la Figura 3.26 muestra los gráficos de la variación de velocidades a lo largo de la sección **S1**, donde se evidencia que el lugar donde se produce las velocidades más grandes es en la mitad del cauce del río, es decir en la vertical de mayor longitud, también se puede observar que la velocidad va disminuyendo mientras más se aproxima a la frontera sólida del río. De la misma manera la Figura 3.27 es un resumen de las velocidades en la sección **S2**, en la cual los movimientos por unidad de tiempo se localizan en el eje del cauce y con un comportamiento similar a la **S1**.

Gracias a la Figura 3.27a se detectó la presencia de piedras que causan una perturbación a la geometría normal del cauce, por lo que se decidió omitir la información del día 1 en la sección S1 para el análisis.

Para comprobar las velocidades obtenidas en campo se utilizó el método de la caja de bigotes o boxplot, la Figura 3.28 ilustra el rango de velocidades conseguidas en la sección **S1** a lo largo de los cinco días de análisis, donde se puede observar que no existen valores atípicos en ningún día, es decir no fue necesaria la corrección de valores por algún error de parte del aforador. A su vez, la Figura 3.29 demuestra la correcta toma de velocidades in-situ con el molinete, por lo tanto los datos pueden tenerse como válidos en las dos secciones.

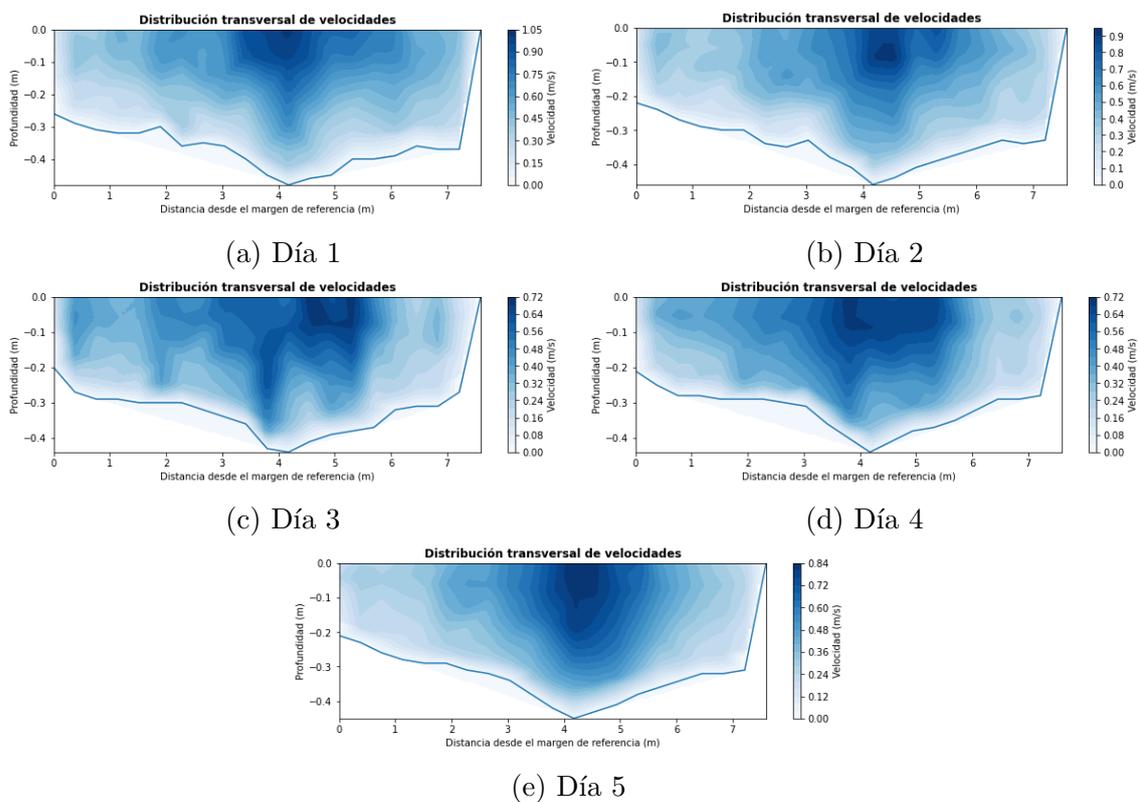


Figura 3.26: Distribución de velocidades de la sección S1.

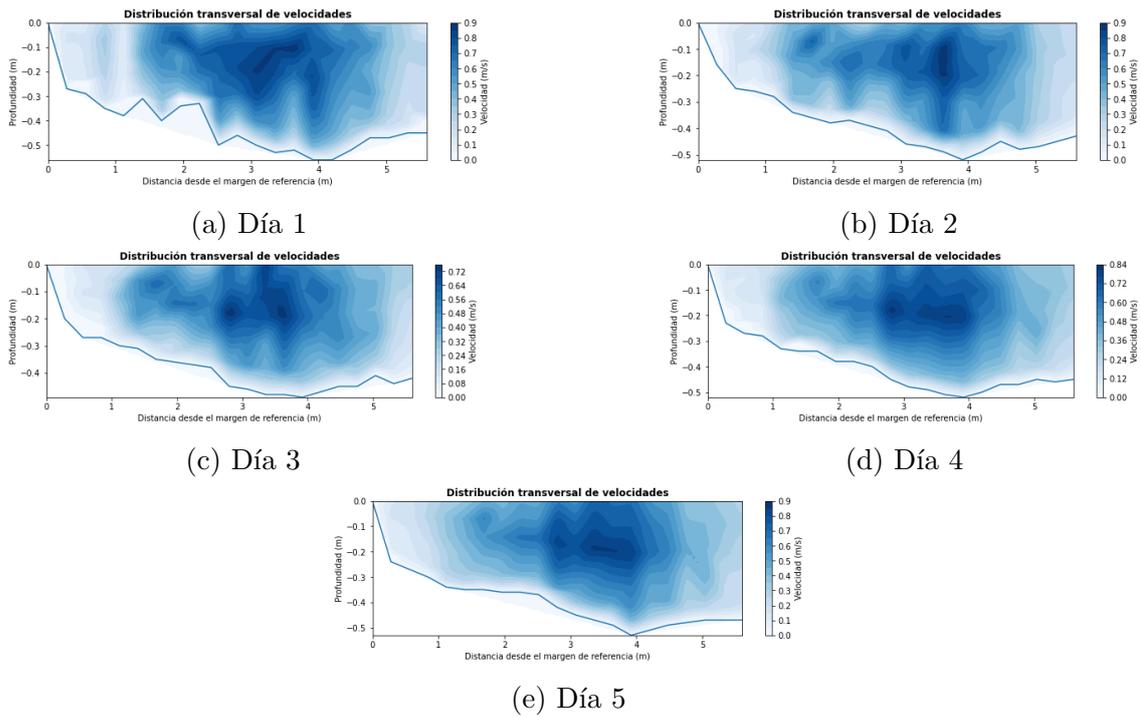


Figura 3.27: Distribución de velocidades de la sección S2.

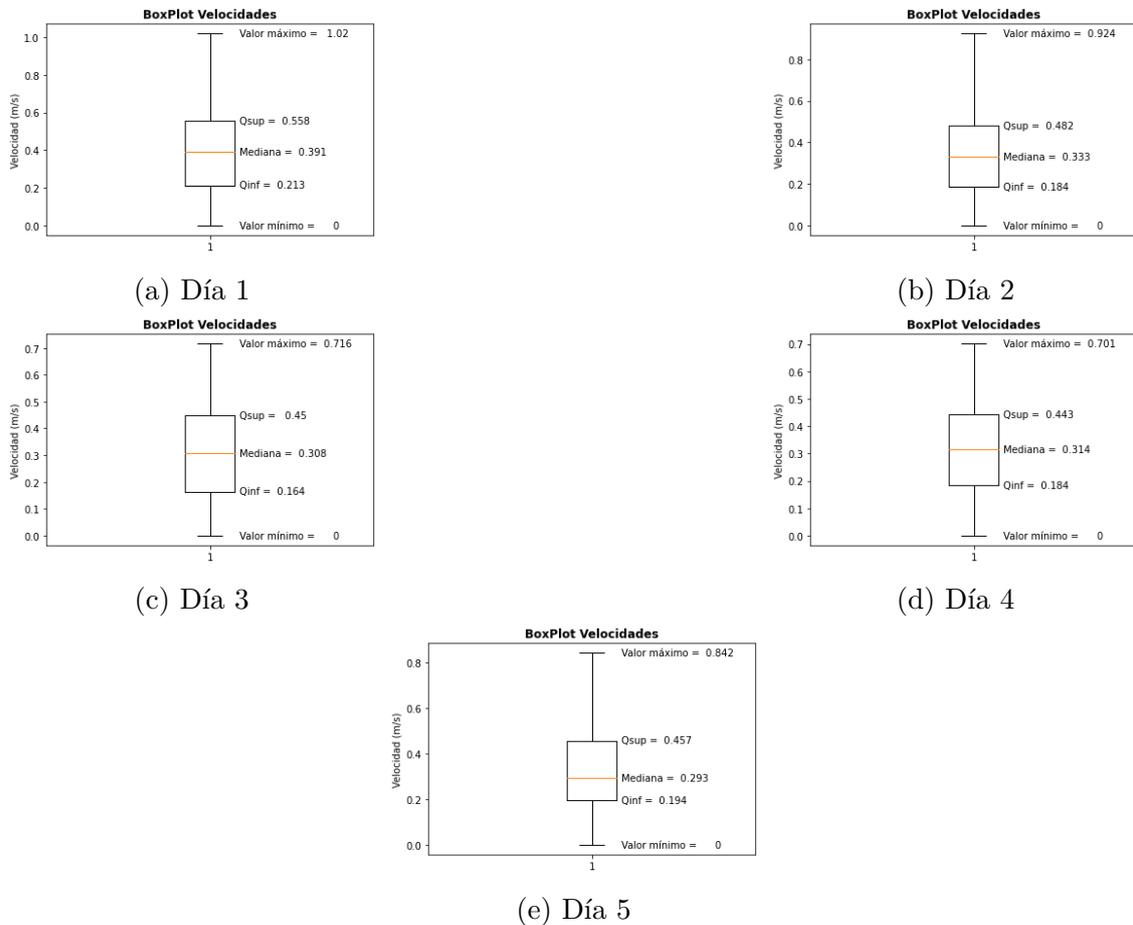


Figura 3.28: Diagrama de caja o análisis de velocidad en la sección S1.

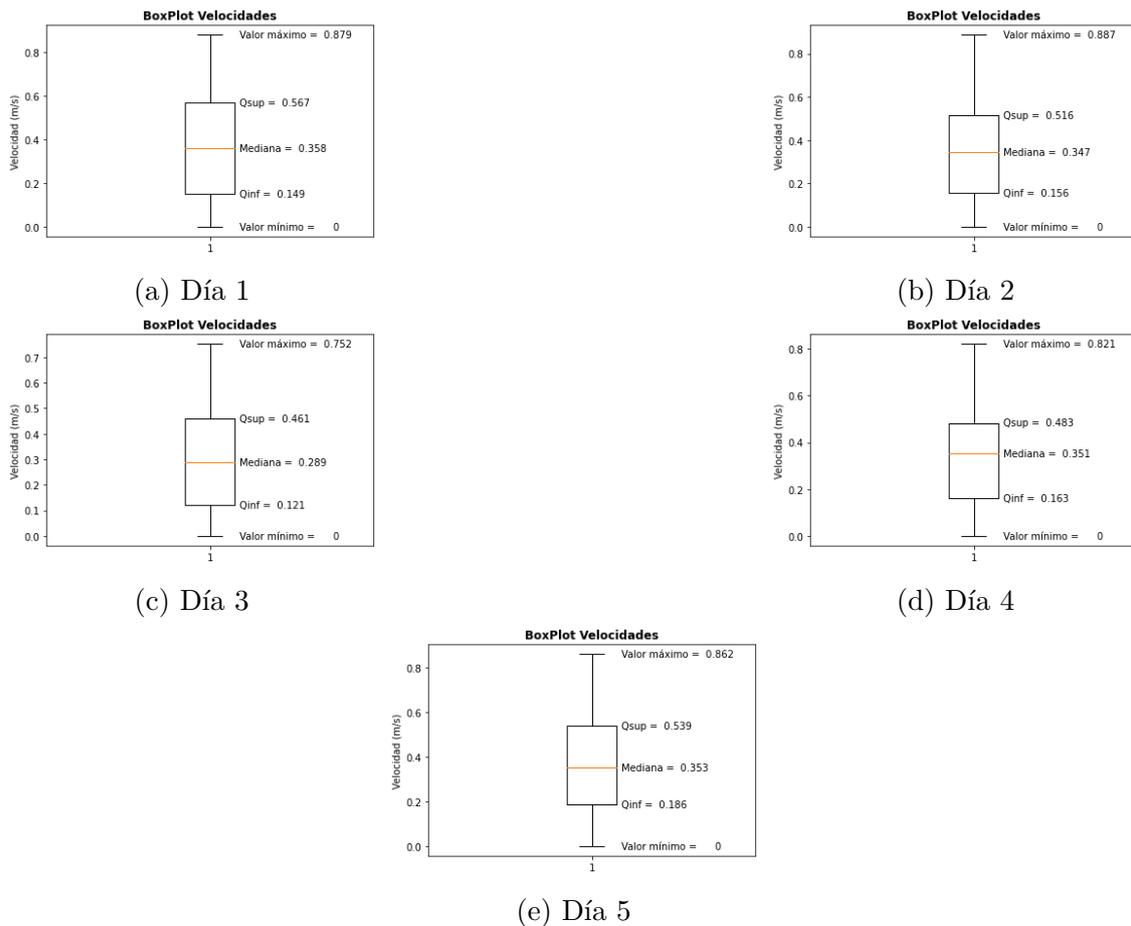


Figura 3.29: Diagrama de caja o análisis de velocidad en la sección S2.

Los puntos de cada vertical en los cuales fueron tomadas las lecturas de velocidad en las secciones aguas arriba y aguas abajo del río, se aprecian en las Figuras 3.30 y 3.31 respectivamente.

Los informes detallados de todos los días aforados en las secciones respectivas se indican en el apartado de Anexos 7.11, a partir de esta información se elaboró la Tabla 3.30 como un resumen de los cinco días empleados en aforar el río con el uso del molinete, en la tabla se detallan las fechas en las cuales fueron realizadas las lecturas de velocidades, así como la velocidad media alcanzada en la medición de cada día, y principalmente el caudal estimado mediante la ejecución del algoritmo desarrollado en *Python*, también se muestra el tirante normal en cada sección a lo largo de las jornadas de trabajo en campo.

De la Tabla 3.30 se obtiene un caudal promedio para la sección S1 de **0.99 m³/s** con un tirante normal promedio de **0.45 m**, de igual manera para la franja aforada S2 se obtuvo un caudal de **0.92 m³/s** y un tirante de **0.47 m**. Los tirantes se pueden calcular también utilizando la ecuación cuadrática de las curvas de descarga correspondiente a cada sección mostradas en la Figura 3.32.

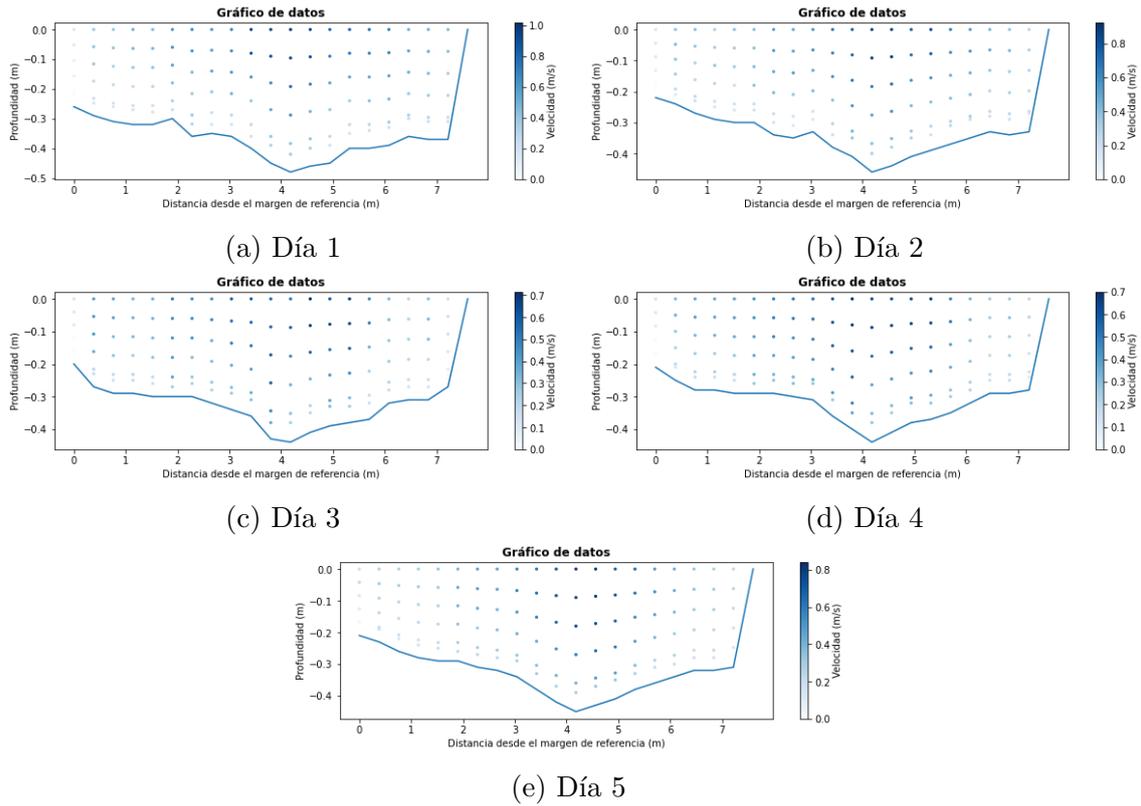


Figura 3.30: Ubicación de puntos de aforo en la sección S1 del río *Burgay*.

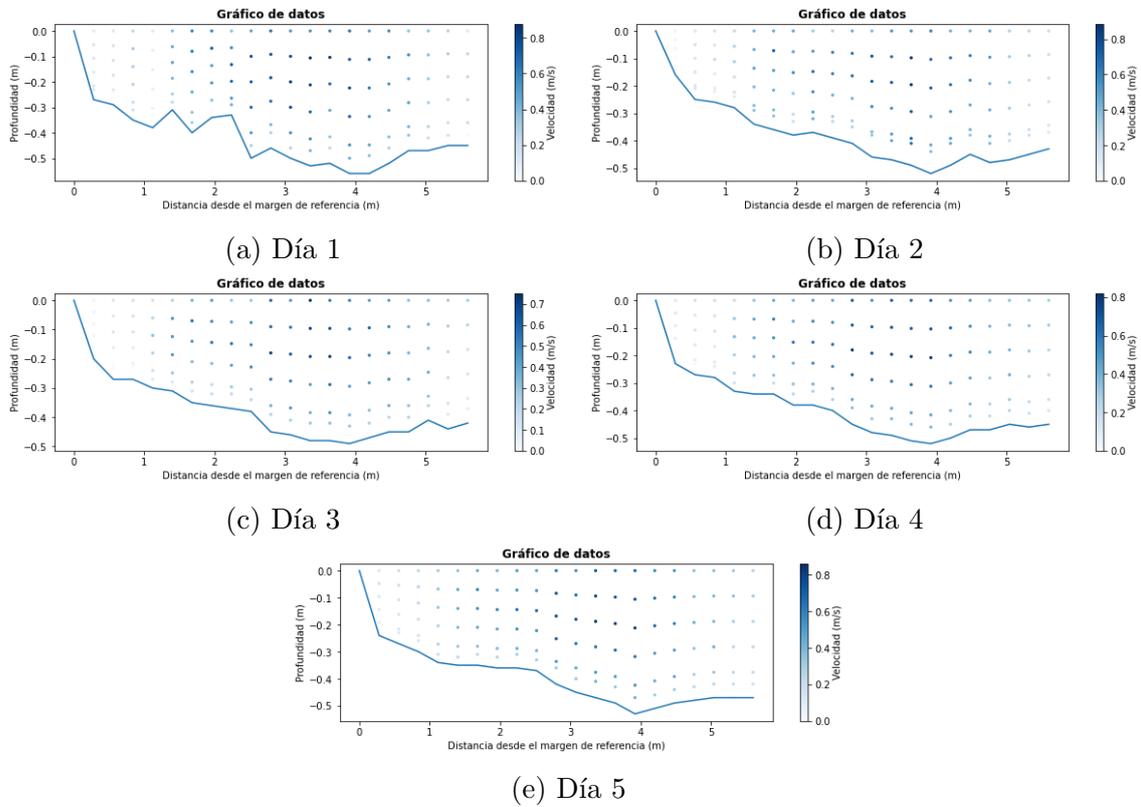


Figura 3.31: Ubicación de puntos de aforo en la sección S2 del río *Burgay*.

Tabla 3.30: Tirante y caudal aforado para el río Burgay - sector "La Concordia".

Caudal aforado río Burgay - sector "La Concordia"						
Día	Fecha	Sección	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	
1	12/11/2022	S1	0.43	1.24	0.48	
2	18/11/2022		0.38	1.02	0.46	
3	19/11/2022		0.33	0.86	0.44	
4	25/11/2022		0.34	0.87	0.44	
5	30/11/2022		0.38	0.97	0.45	
Promedio				0.99	0.45	
Día	Fecha	Sección	Velocidad media (m/s)	Caudal (m ³ /s)	Tirante (m)	
1	12/11/2022	S2	0.41	1.03	0.51	
2	18/11/2022		0.41	0.89	0.47	
3	19/11/2022		0.35	0.76	0.44	
4	25/11/2022		0.40	0.92	0.47	
5	30/11/2022		0.42	0.98	0.48	
Promedio				0.92	0.47	

Cabe también mencionar que en la gráfica de la sección 2 de la Figura 3.32 no se ha tomado en cuenta el valor del caudal del primer día, ya que como se indicó anteriormente no es un dato aceptable por la presencia de sedimentos.

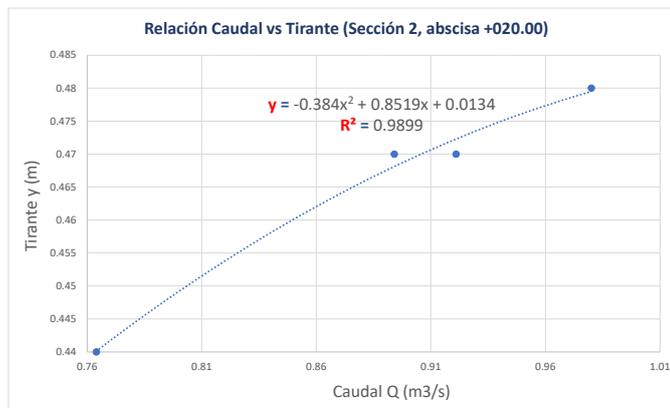
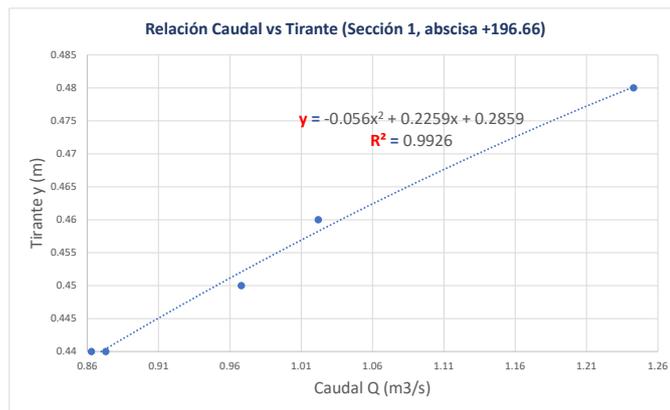


Figura 3.32: Correlación entre datos de caudal de secciones aforadas.

3.3.6. Ejecución del programa *HEC-RAS*

En la modelización hidráulica en el software *HEC-RAS* fue necesario seguir una serie de pasos que permiten el ingreso de los datos necesarios para que el programa se ejecute sin inconvenientes. Inicialmente, se creó un nuevo proyecto en la ventana *File* del menú principal para posteriormente ingresar las variables de geometría del cauce ilustrada en la Figura 3.33 y condiciones flujo permanente que se calculó con las mediciones manuales con el molinete.

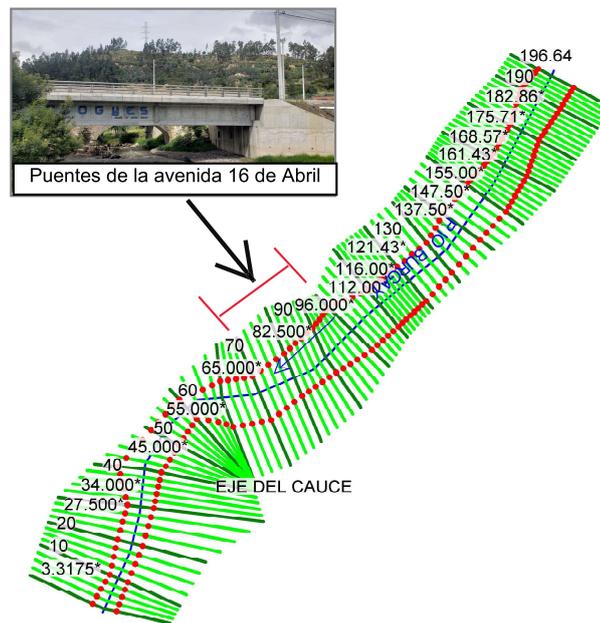


Figura 3.33: Topografía ingresada a HEC-RAS.

Para la geometría del cauce se incorporaron los coeficientes n de *Manning* que se establecieron en la sección 3.3.2, los valores ingresados fueron: márgenes $n=0.020$, cauce aguas arriba $n=0.031$ con interpolación aguas abajo hasta $n=0.023$ como se presentan en la Figura 3.34. La interpolación de la topografía se efectuó en base a las necesidades del programa en las zonas donde se requirió un mayor número de secciones. Los puentes motivo de estudio se encuentran ubicados entre la abscisas +070.00 y +100.00 en base a la Figura 3.33.

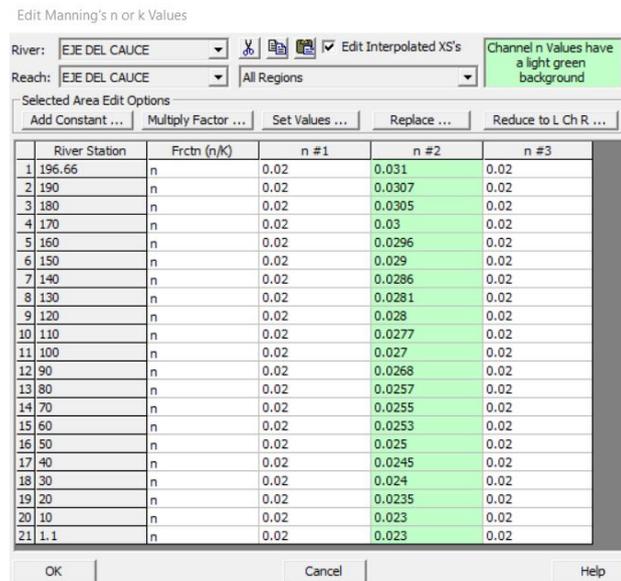


Figura 3.34: Ingreso de coeficientes de Manning en HEC-RAS

Gracias a que el programa computacional permite realizar el análisis de flujo no permanente con la herramienta *Unsteady Flow* es posible estimar el comportamiento del cauce en condiciones de caudales máximos en diferentes intervalos de tiempo, consecuentemente para modelizar se necesita de condiciones iniciales en aguas arriba y aguas abajo como se observa en la Figura 3.35, en aguas arriba se debe subir el hidrograma de la sección 3.2.12 como datos de entrada regulares en intervalos definidos como se indica en la Figura 3.36, mientras que como condición aguas abajo se ingresa la pendiente de fricción de **0.024** del cauce que se calculó como la diferencia entre las cotas máximas y mínimas divididas para la longitud total del lecho.

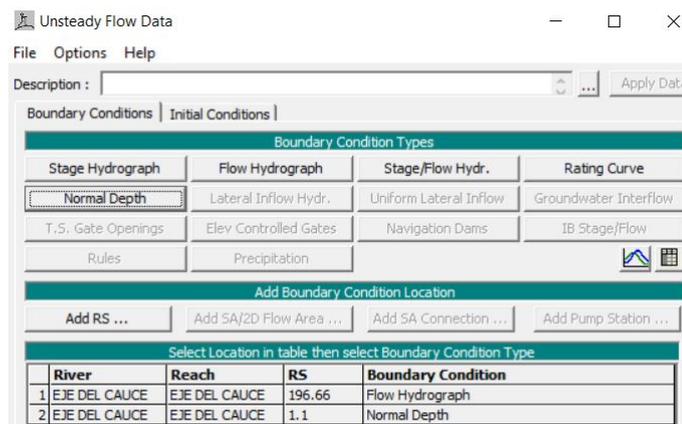
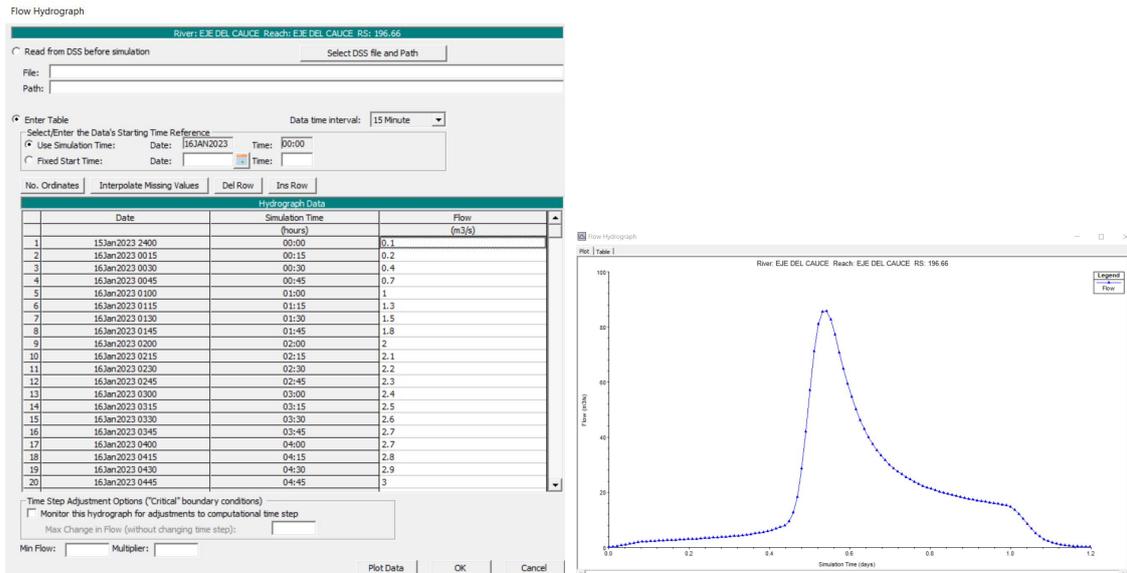


Figura 3.35: Menú de entrada para flujo no permanente en HEC-RAS.

Finalmente, al terminar el ingreso de los datos geométricos y de flujo no permanente se procederá a crear la simulación que debe constar con la fecha y hora en la que se ejecutará las variables en la Figura 3.37 se presenta la ventana para el análisis no permanente.



(a) Ingreso de datos de hidrograma

(b) Hidrograma

Figura 3.36: Ingreso de datos para flujo no permanente.

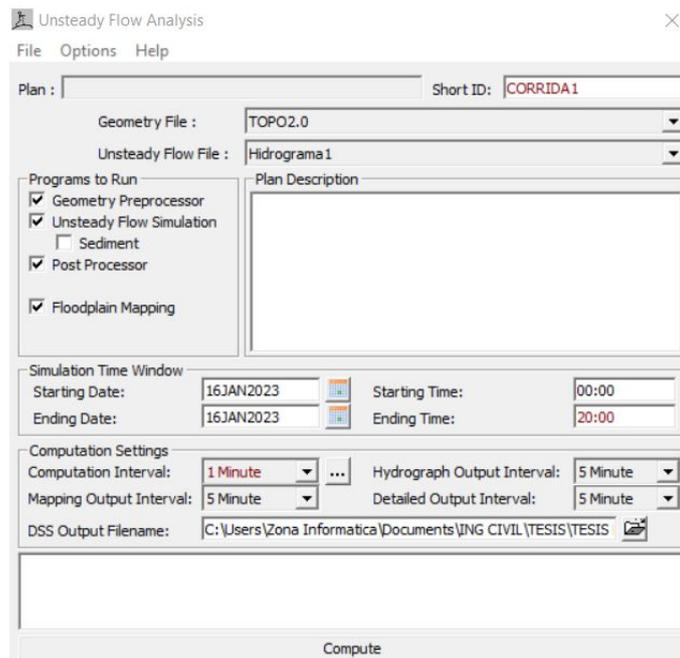


Figura 3.37: Menú de análisis para flujos no permanentes.

Calibración del modelo HEC-RAS

La confiabilidad de una modelización hidráulica requiere de una calibración en base a datos medidos en campo para dar un acercamiento certero a la realidad, por esta razón, la información proporcionada por los aforos en la sección 3.3.5 se deben establecer diferentes simulaciones con el objetivo de comprobar el comportamiento del modelo en las secciones aforadas.

En la calibración inicial se ingresaron caudales medios de **0.99** m³/s para aguas arriba en S1 y **0.92** m³/s en aguas abajo para S2 tomando en cuenta las relaciones de la Figura 3.32 que representa la variación del tirante (y) con respecto al caudal (Q). Dado que los puntos presentados en las curvas de descarga muestran un ajuste con un R^2 mayor a **0.90** son representativos y confiables.

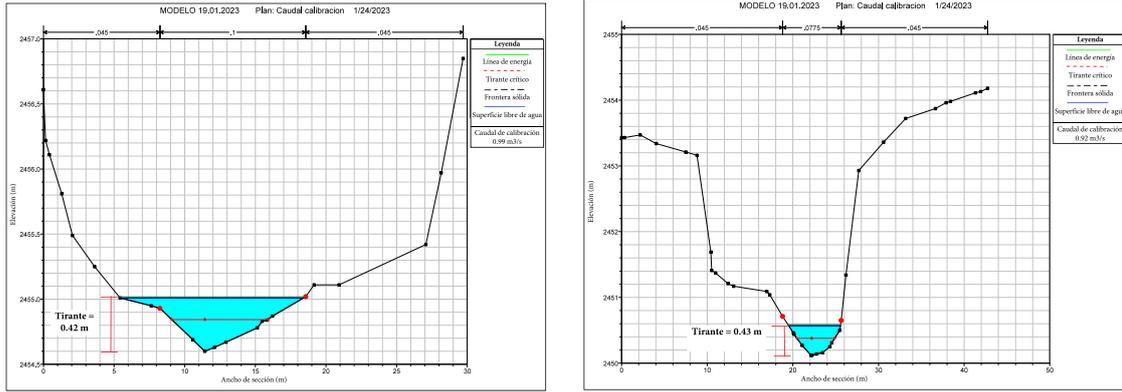
Calibrar el modelo consiste en asemejar los tirantes del modelo computacional en flujos permanentes con los tirantes obtenidos en campo, para ello se requirió modificar las condiciones de rugosidad iniciales en varios ensayos numéricos probando distintos valores de n posibles hasta que se obtuvieran las condiciones más favorables que interpreten la realidad. Los resultados para la calibración final del modelo unidimensional en *HEC-RAS* se resumen en la Tabla 3.31.

Nota: Los coeficientes de *Manning* calculados a partir de ensayos en laboratorio no coincidieron con los coeficientes de calibración en el modelo debido a que no fue posible el traslado de los elementos de mayores dimensiones como cantos rodados y partículas con diámetros superiores a 3 pulgadas. Las recomendaciones para evitar estos inconvenientes se presentan en la sección 5.1.

Tabla 3.31: Condiciones de calibración.

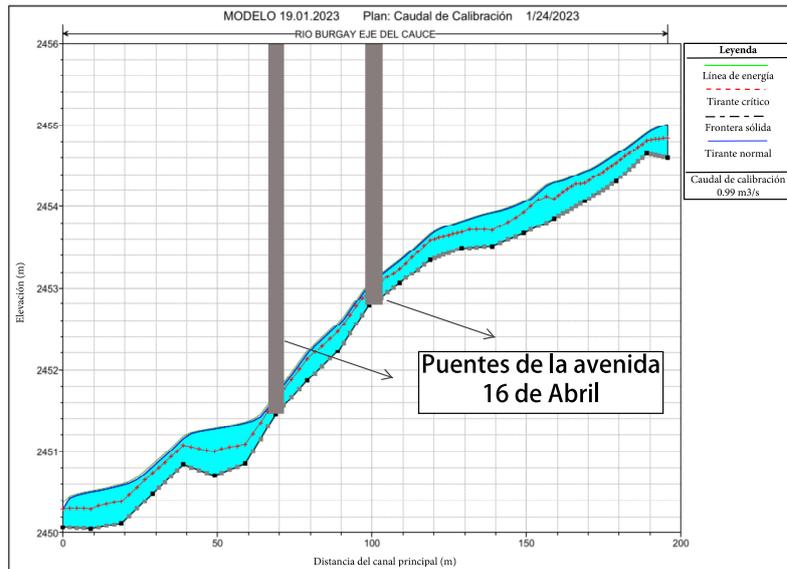
Tramo	Caudal (m/s)	Tirante				Coeficiente de Manning (n)		
		Medido (m)	Simulado	Medido (%)	Simulado (%)	Error (%)	Inicial	Calibrado
Sección 1 (Abscisa +196.66)	0.99	0.45	0.42	100 %	92.5 %	7.5 %	0.031	0.1
Sección 2 (Abscisa +020.00)	0.92	0.47	0.43	100 %	91.5 %	8.5 %	0.023	0.075

Los coeficientes de rugosidad expuestos en la Tabla 3.31 que calibraron el modelo se definieron como confiables dado que el rango de error es inferior al 10% según lo explicado en la sección 2.4.7; una vez calibrado el sistema se encontró listo para repetir el procedimiento de la sección 3.3.6 cambiando los valores en el menú de coeficiente de *Manning* de la Figura 3.34 por $n=0.1$ desde aguas arriba con una interpolación hacia aguas abajo hasta $n=0.075$. El modelo calibrado con el caudal aforado se expone en la Figura 3.38.

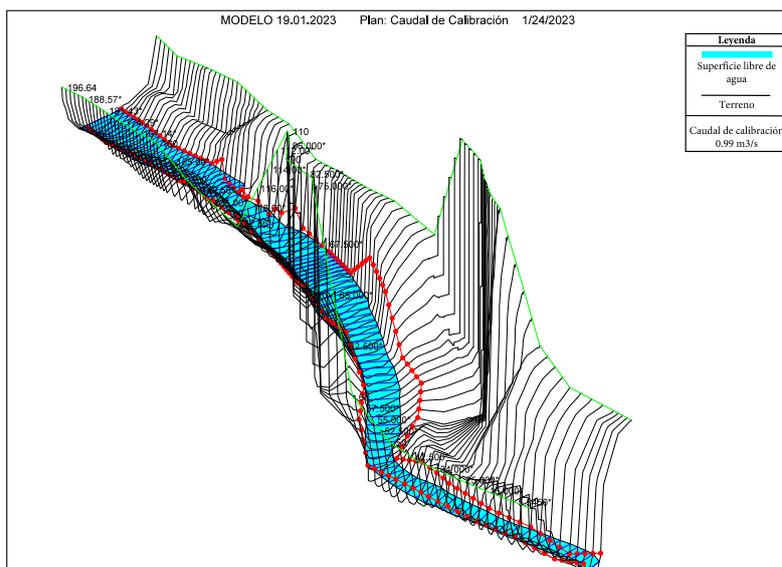


(a) Sección de puente (Aguas arriba)

(b) Sección de puente (Aguas abajo)



(c) Perfil longitudinal



(d) Modelación 3D

Figura 3.38: Simulación del modelo calibrado.

Sección 4

Resultados

4.1. Resultados de modelización unidimensional en *HEC-RAS*

Una vez calibrado el modelo se procedió a ejecutar la simulación hidráulica de un evento extremo correspondiente a un periodo de retorno de 100 años determinado en la sección 3.2.12, para ello se requirió ingresar el hidrograma de crecidas con un caudal máximo de $85.6 \text{ m}^3/\text{s}$, posteriormente se ejecutó modelos para sucesos con un tiempo de recurrencia de 25 y 50 años, consecuentemente se compararon sus diferentes aspectos hidráulicos como caudales, perfiles longitudinales, régimen de flujo, tirantes normales, velocidades, gálidos y zonas de inundación. Los caudales de 25 y 50 años son de $47.9 \text{ m}^3/\text{s}$ y $59.5 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, y se calcularon también empleando el procedimiento de la sección 3.2.12.

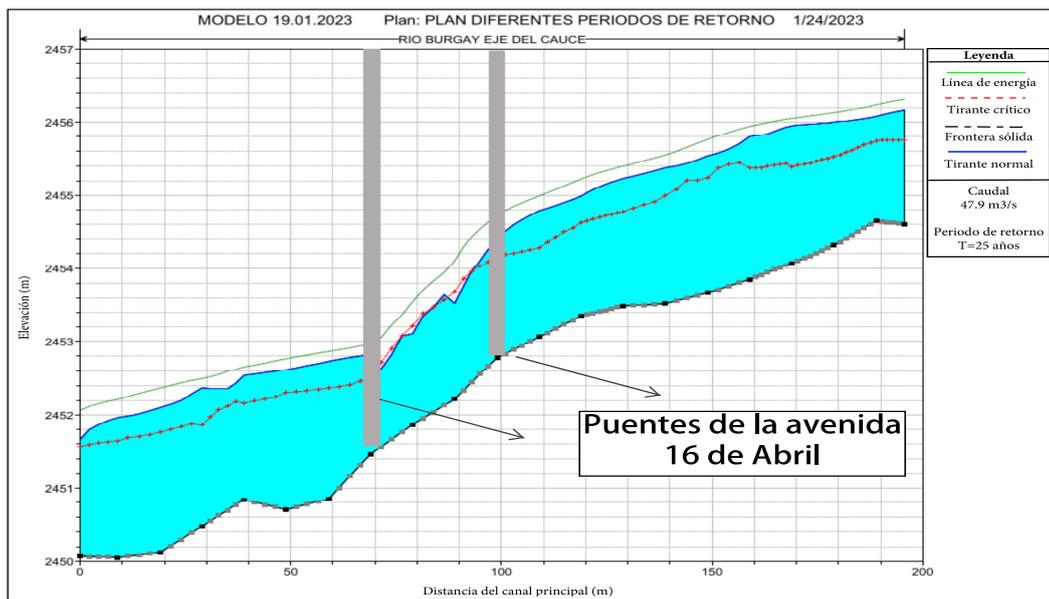
Tabla 4.1: Resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno en modelización *HEC-RAS*.

Descripción	Sección	Periodo de retorno (T) = 25 años, $Q_{\max} = 47.9 \text{ m}^3/\text{s}$						
		Tirante normal (m)	Tirante crítico (m)	Cota línea de energía (m)	Pendiente calculada (m/m)	Velocidad media del canal (m/s)	Ancho máximo de la superficie libre (m)	Número de Froude Adimensional
Inicio de puentes (aguas arriba)	+100.00	1.6	1.38	2454.72	0.037	2.58	16.64	0.71
Sección puentes más desfavorable	+090.00	1.3	1.46	2454.1	0.093	3.4	22.23	1.11
Fin puentes (aguas abajo)	+070.00	1.37	1.06	2452.97	0.011	1.36	35.24	0.41
Periodo de retorno (T) = 50 años, $Q_{\max} = 59.5 \text{ m}^3/\text{s}$								
Inicio de puentes (aguas arriba)	+100.00	1.77	1.55	2454.94	0.037	2.78	17.99	0.73
Sección puentes más desfavorable	+090.00	1.39	1.57	2454.3	0.098	3.67	23.04	1.15
Fin puentes (aguas abajo)	+070.00	1.53	1.16	2453.14	0.010	1.39	35.54	0.39
Periodo de retorno (T) = 100 años, $Q_{\max} = 85.6 \text{ m}^3/\text{s}$								
Inicio de puentes (aguas arriba)	+100.00	2.06	1.91	2455.35	0.038	3.2	21.14	0.76
Sección puentes más desfavorable	+092.00	1.71	1.93	2454.86	0.086	4.09	25.58	1.12
Fin puentes (aguas abajo)	+070.00	1.87	1.37	2453.51	0.007	1.43	35.57	0.36

El análisis hidráulico para los tres eventos de 25, 50 y 100 años obtenidos del programa *HEC-RAS* se presentan en la tabla 4.1 donde se tomaron en cuenta tres secciones diferentes para cada suceso, partiendo de aguas arriba en el inicio de los puentes, una sección intermedia considerada la más desfavorable y aguas abajo con el final de las estructuras estudiadas. La descripción de cada escenario se especifican en los párrafos siguientes.

Perfiles Longitudinales

En cada gráfica de la Figura 4.1 se muestra el comportamiento del flujo para cada uno de los caudales con respecto a los puentes motivo de estudio, se puede apreciar las líneas de energía que tienen un comportamiento descendente a medida que recorre el agua por el lecho debido a las pérdidas de energía por la disminución de la carga de posición y carga de velocidad influenciada por la rugosidad del cauce e irregularidades del fondo; también se describe el tirante crítico de todos los perfiles longitudinales, los cuales indican que todos los valores del tirante normal que sobrepasen ese nivel serán considerados flujo subcrítico y por debajo supercrítico. La frontera sólida se graficó desde aguas abajo en la abscisa 0+000.00 hacia aguas arriba a la abscisa 0+196.66.



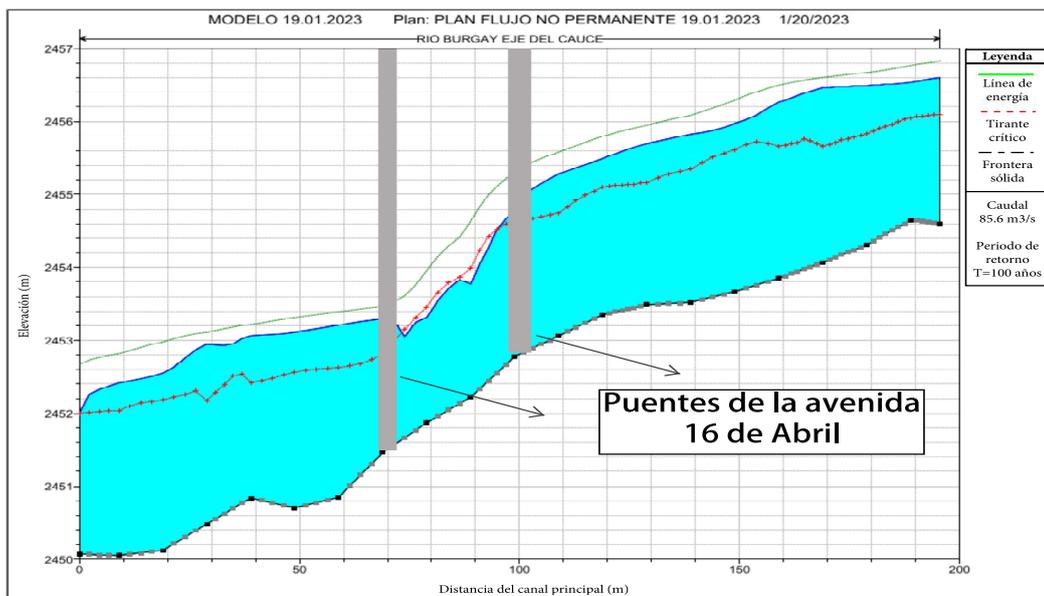
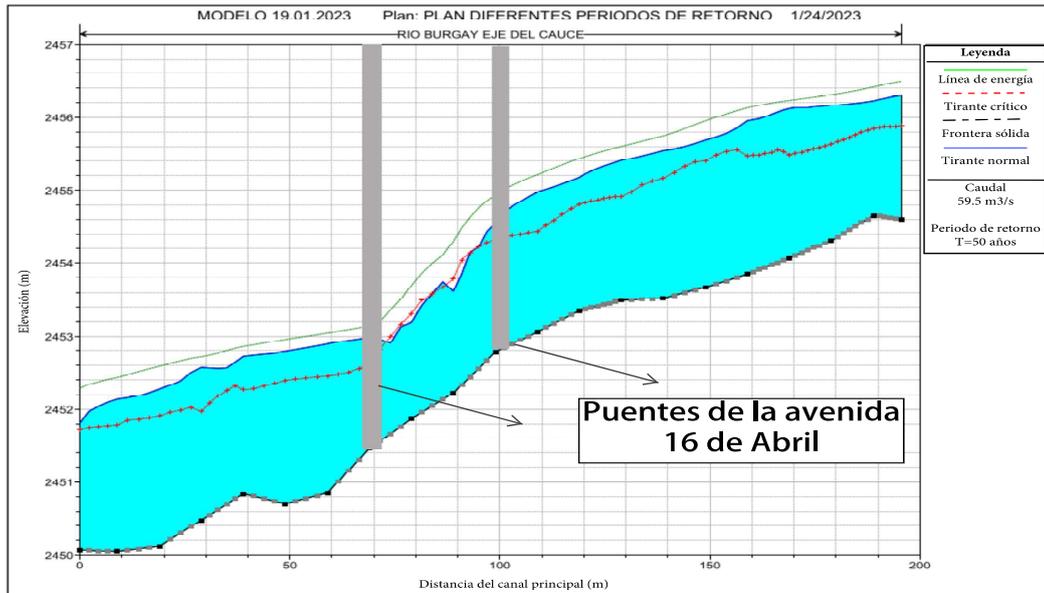
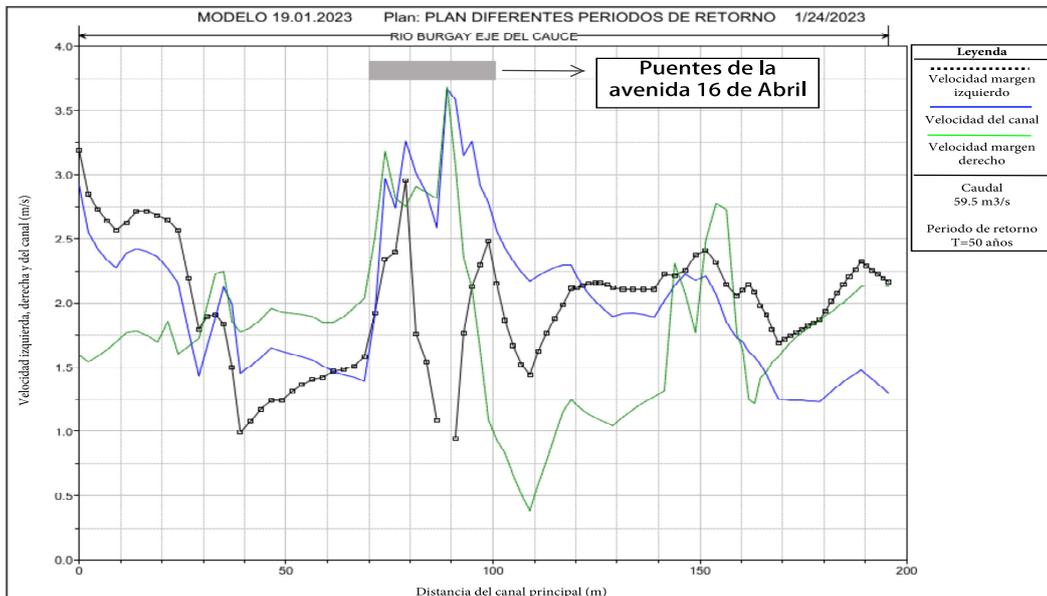
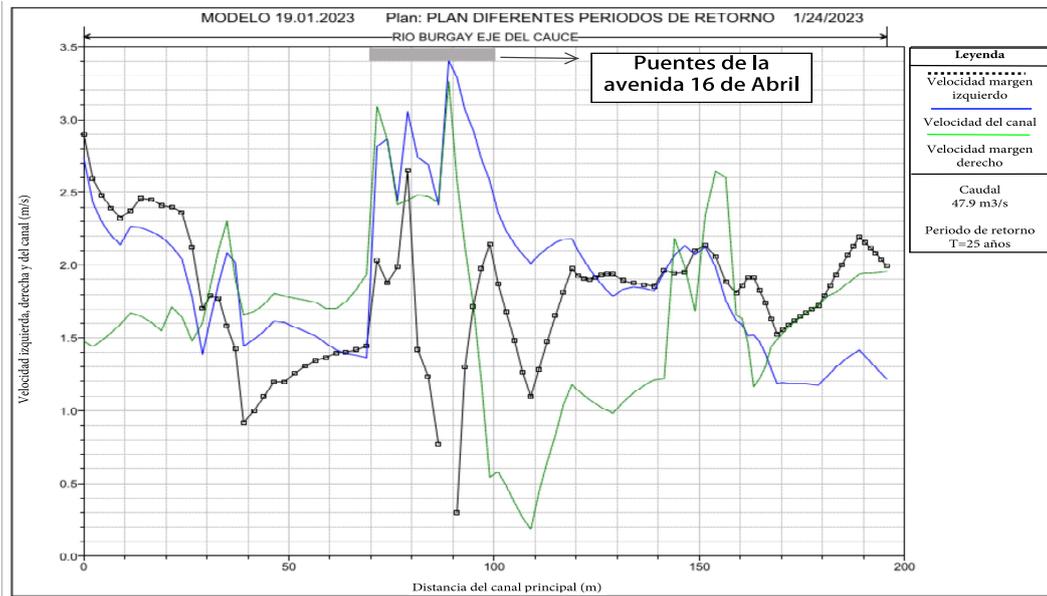


Figura 4.1: Perfil longitudinal para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

Velocidades

Se puede observar en la Figura 4.2 la distribución de velocidades a lo largo de los márgenes y eje del río para los tres periodos de retorno, en función a la ubicación de los puentes, donde cada línea denota el cambio de velocidad que experimenta el agua en las secciones del río de aguas abajo hacia aguas arriba, según lo observado las velocidades máximas se presentan en el canal y margen derecho en todos los casos por lo que se dará relevancia únicamente a estas zonas tomando en cuenta la ubicación de los puentes. Las velocidades máximas alcanzadas fueron de 3.4 m/s

para 25 años, 3.67 m/s referente a 50 años y 4.09 m/s para un periodo de retorno de 100 años en las secciones más desfavorables que se presentan en la tabla 4.1.



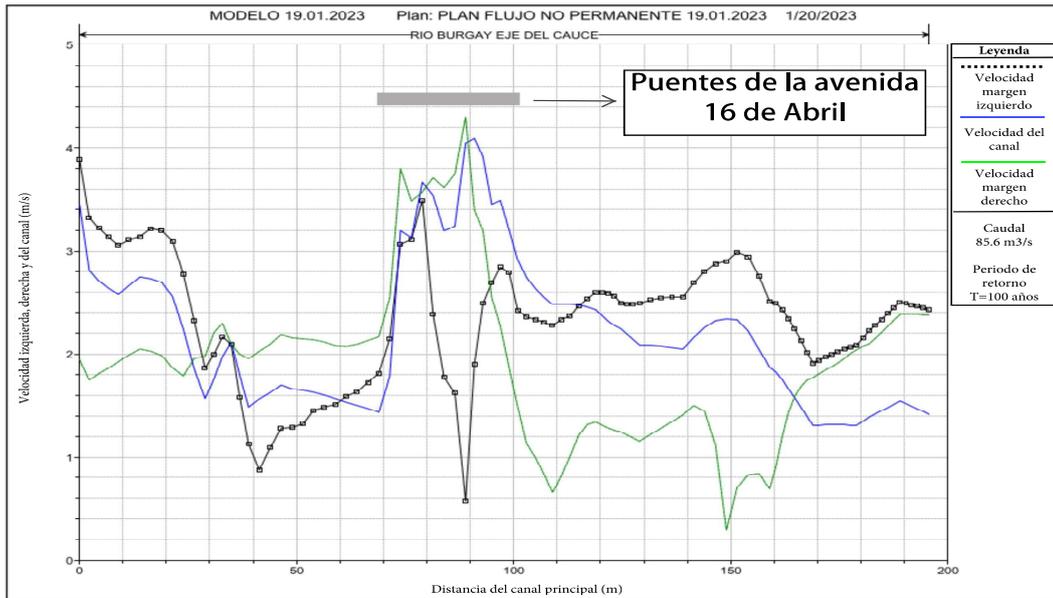
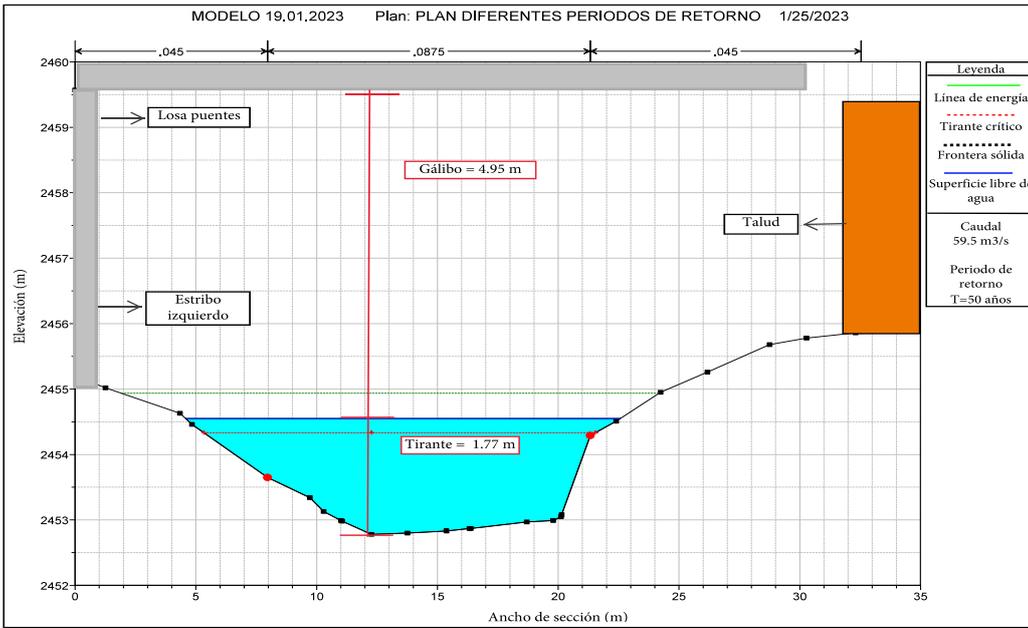
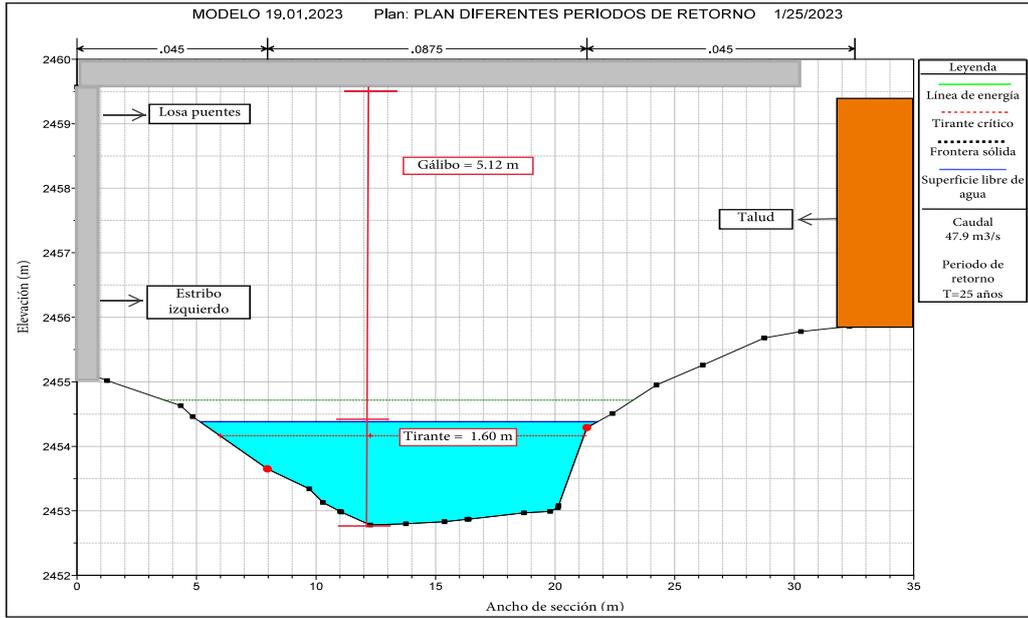


Figura 4.2: Velocidades para periodos de retorno de 25, 50, 100 años.

Secciones

Con base en la Figura 4.3 se puede identificar el estribo izquierdo a los costados de las secciones junto con la losa del puente, acompañados del talud que sostiene el estribo derecho, las secciones expuestas son las que presentan mayores tirantes y todas pertenecen a la parte donde inicia el puente en sentido longitudinal al flujo.

Se obtuvo un tirante de 1.60 m y un gálibo de 5.12 m para la sección de análisis perteneciente a un periodo de retorno $T=25$ años, a su vez para un periodo de recurrencia de 50 años se estimó un gálibo de 4.95 m con un tirante máximo de 1.77 m y finalmente para el evento más extremo de $T=100$ años, la altura máxima de la lámina de agua es de 2.06 m, correspondiente a un gálibo de 4.66 m, todos los resultados descritos se encuentran plasmados en la Figura 4.3.



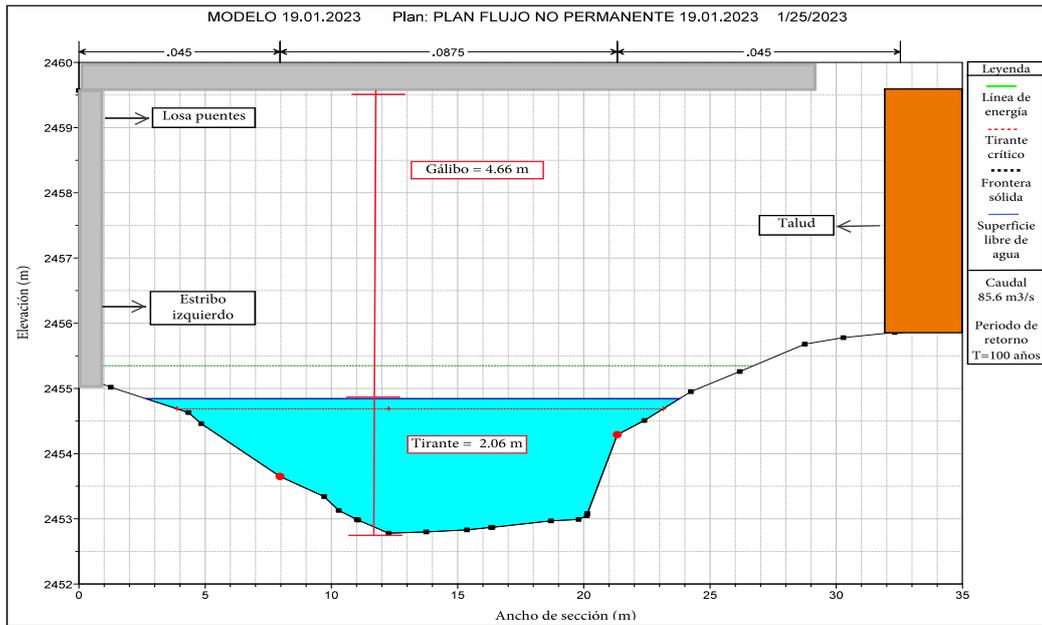
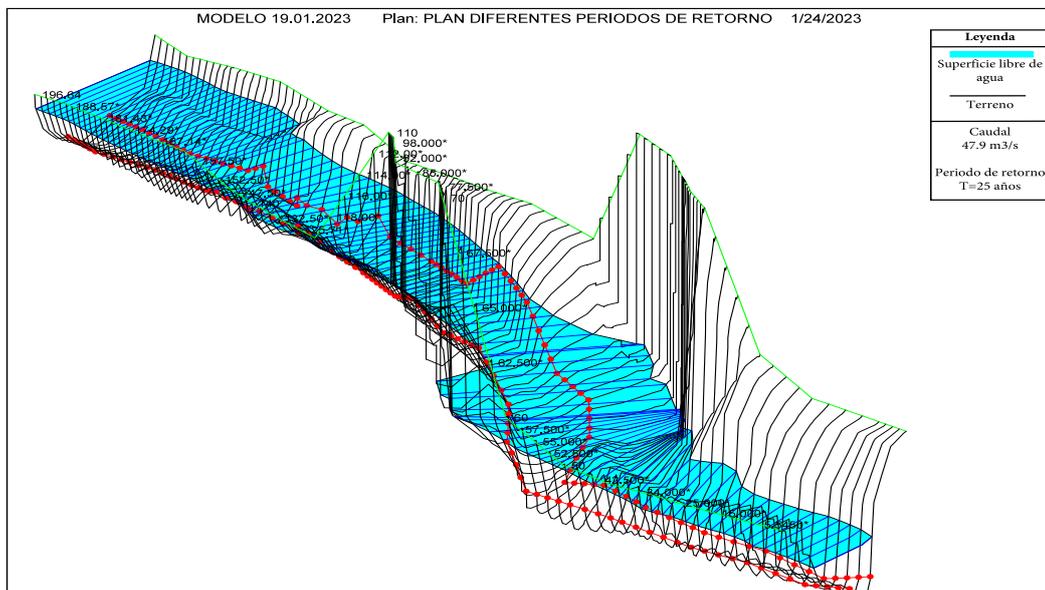


Figura 4.3: Secciones para periodos de retorno de 25, 50, 100 años.

La representación del terreno en espacios tridimensionales se exponen también en la Figura 4.4 donde se observa la circulación del flujo de izquierda a derecha hacia aguas abajo, se evidencia un incremento considerable de los niveles de superficie libre en cada uno de los tres periodos de retorno con respecto a la línea punteada roja que denota el paso normal del cauce en épocas con ausencia de eventos hidrológicos extremos. Las líneas de secciones más prominentes muestran los estribos sobre los que se asientan los puentes, con referencia a las estribos se muestra que en los tres periodos de retornos la lámina de agua alcanza los elementos estructurales en los que se apoyan los puentes.



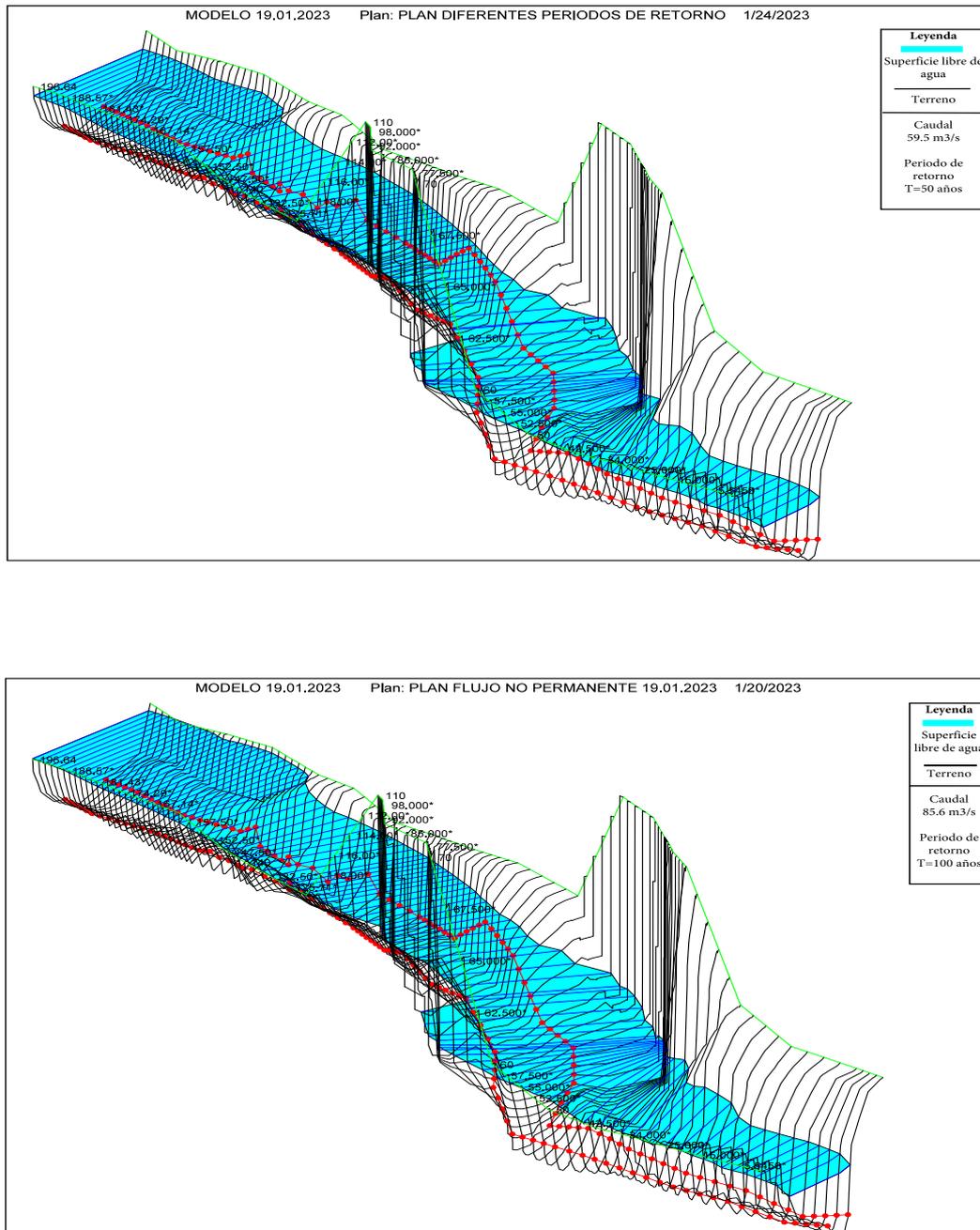


Figura 4.4: Modelo tridimensional para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

En cuanto a los tirantes calculados para cada sección, se tiene la Figura 4.5, la cual muestra las alturas que alcanza el flujo desde la frontera sólida del río hasta la superficie libre del agua con el caudal de $85.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en relación a los caudales de 25 y 50 años obteniendo una variación definida entre los tres eventos como indica la gráfica.

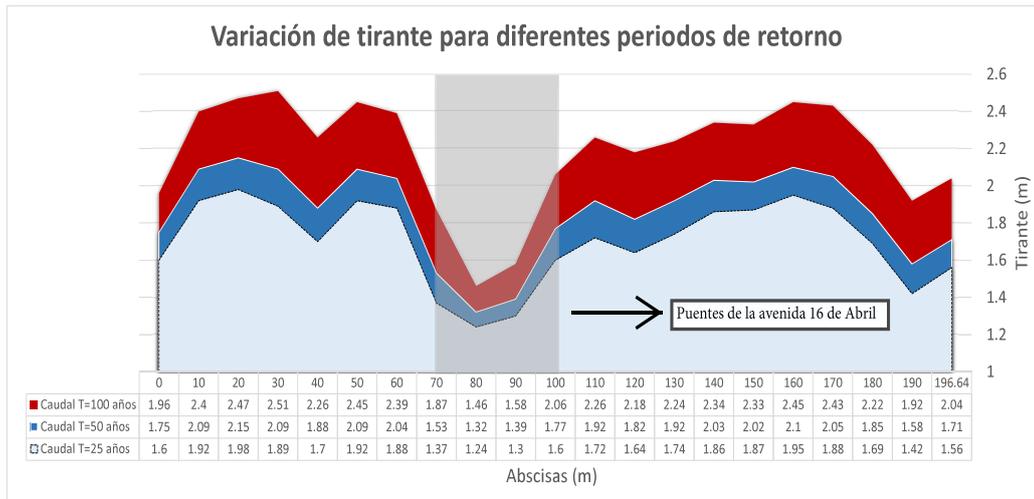


Figura 4.5: Relación de tirantes para diferentes periodos de retorno.

Si se desean observar las simulaciones descritas anteriormente, se pueden revisar escaneando los **códigos QR** de la Figura 4.6, los mismos que llevarán a una serie de videos que muestran el comportamiento hidráulico del cauce del río en diferentes escenarios para un periodo de retorno máximo de 100 años.



(a) Simulación tridimensional



(b) Simulación en perfil longitudinal



(c) Simulación de sección

Figura 4.6: Videos de simulación del modelo con un flujo no permanente.

4.2. Discusión

La cuenca de aporte para los puentes de la avenida *16 de Abril* sector *La Concordia* se delimitó en un área de 274 Km^2 por lo que su coeficiente de compacidad representó un valor de 1.7, es decir se la describe como una cuenca con bajo riesgo a inundaciones debido a su forma oval-alargada lo que disminuye las probabilidad de la formación de grandes llanuras de inundación a lo largo de su cauce con respecto a cuencas de menor tamaño.

Otro aspecto favorable es la densidad de drenaje de la cuenca hidrográfica que tiene un valor de 0.3 Km/Km^2 determinando una situación en la que su infiltración aumenta con la precipitación generando poca escorrentía, por ende el tirante de caudales extremos no será tan perjudicial con respecto a cuencas de mayores drenaje.

La curva hipsométrica que se determinó a partir de la frecuencia de altitudes de la cuenca aportante, describió una cuenca con ríos viejos los cuales tienen poco potencial erosivo de su cauce, sin embargo esto no descarta la posibilidad de erosiones o amplitud en sus riberas y cambios en la estructura del eje del río por arrastre de sedimentos o elementos de grandes tamaños.

Gracias al uso e implementación del programa computacional *HEC-HMS* y la metodología SCS se pudo determinar el hidrograma de crecidas para un periodo de retorno de 100, 50 y 25 años con un caudal máximo de 85.6, 59.5 y $47.9 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, lo que denota un buen acercamiento a los caudales obtenidos en los estudios del sector dados por *Luis y Edison Timbe* [28] pero sin considerar drenajes menores, lo que valida los valores obtenidos en esta investigación.

Para el implemento del modelo *HEC-RAS* se ingresaron los hidrogramas resultantes del análisis hidrológico de la cuenca aportante al río motivo de estudio, con el modelo ya calibrado se incorporó los caudales de 85.6, 59.5 y $47.9 \text{ m}^3/\text{s}$ presentando un comportamiento similar en los tres casos, teniendo como resultado un flujo subcrítico al inicio de la estructura del primer puente en la abscisa +100.00, seguidamente el comportamiento del régimen de agua en la zona entre los puentes donde existía el puente patrimonial del ferrocarril pasa a ser supercrítico en algunas secciones, para luego volver al comportamiento inicial, este patrón se repite hasta la zona por debajo del segundo puente, lo que indica una condición favorable para puentes cuando se produce el paso de flujo subcrítico a supercrítico, debido a que en este régimen las pendientes más pronunciadas ocasionan tirantes menores, por lo tanto se pueden evitar gálibos pequeños.

Como se mencionó anteriormente el cambio de régimen subcrítico a supercrítico ocasiona una reducción considerable del tirante máximo bajo el puente entre las abscisas 0+070.00 y 0+100.00 con respecto al nivel de la superficie libre aguas arriba,

es así entonces que los tirantes máximos mostrados en la Figura 4.3 no representan en ningún caso riesgo a la altura de 6.72 metros en los que se encuentran emplazados los puentes, resultando gálibos libres de 5.12, 4.95 y 4.66 metros para los eventos extremos con periodo de retorno de 25, 50 y 100 años respectivamente, los valores calculados son totalmente aceptables para asegurar la estabilidad de las estructuras superiores y están muy por encima del mínimo recomendado de 2.5 metros para puentes según la *NEVI 12 - Volumen 3* [47] y el *Manual para puentes* del *Ministerio de Transporte y Comunicaciones* [48] del Perú.

La línea de energía a lo largo de los diferentes perfiles longitudinales tiene una gráfica descendente pero estable hacia aguas abajo por la razón de que las rugosidades calibradas para la modelización disminuyen a medida que avanza el flujo mostrando un comportamiento normal; dado que los coeficientes de *Manning* iniciales no pudieron ser usados en el modelo final se deduce que este problema es causado por la falta de recolección de muestras con partículas y elementos mayores a 3 pulgadas, debido a la dificultad en el transporte que estas presentan.

Según los diagramas de velocidades expuestos en la Figura 4.2 se identifica una zona ubicada entre las abscisas 0+100.00 y 0+090.00 correspondiente a las estructuras analizadas que experimentan cambios bruscos de velocidad, alcanzando velocidades máximas de 3.4 *m/s* para 25 años, 3.67 *m/s* referido a 50 años y 4.09 *m/s* alusivo a 100 años, lo que implica una velocidad de flujo moderadamente alta para las estructuras de los puentes, esto podría generar una posible socavación por el súbito cambio de velocidad en zonas del río donde el agua entra en contacto con los estribos que serían las estructuras más afectadas. Según el estudio realizado por *Enriquez Soto* [49] donde sus velocidades calculadas son similares a esta investigación se demuestra que a mayores velocidades aumenta la socavación casi de manera lineal, por lo que se infiere un riesgo significativo para las infraestructuras.

Se identificó similitud en el comportamiento hidráulico en los tres periodos de retorno en la vista tridimensional se deduce que no existe una diferencia de desbordamiento significativo, por lo tanto, se asume que la topografía del cauce se encuentra bien definida al tener características de ríos viejos coincidiendo con lo explicado a partir del análisis de la curva hipsométrica.

A partir de la representación tridimensional complementada con la gráfica de variación de tirantes que compararon tres eventos extremos, se pudo establecer que en cada sección de toda la longitud analizada supera las márgenes de inundación en diferentes magnitudes con los tres periodos de recurrencia, aunque no se contemplan mayores riesgos a edificaciones y predios cercanos, si existe una influencia directa del flujo con todo el puente, ya que las infraestructuras están comprometidas en tres puntos diferentes en las siguientes secciones: 0+100.00 (inicio estribo derecho),

0+090.00 a 0+070.00 (estribo izquierdo), y finalmente en 0+070.00 (ala de estribo izquierdo), los tres caudales comparados alcanzan las estructuras en diferente proporción y pueden ser comparados con el ancho de la superficie libre de la Tabla 4.1 por lo que se podrían implementar medidas de protección como escolleras de piedra o muros de gaviones, para salvaguardar las cimentaciones de posibles socavaciones que seguramente se puedan generar en las zonas anteriormente mencionadas, aunque cabe mencionar que reducir la sección del cauce natural puede provocar aumentos de velocidad y por ende mayor socavación.

Sección 5

Conclusiones

En base a la metodología aplicada en los estudios hidrológicos con la herramienta de simulación *HEC-HMS* se determinaron los hidrogramas de crecida para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, siendo este último catalogado como el evento de mayor magnitud analizado, debido a que es el tiempo de vida útil para los que generalmente se diseñan puentes en sectores urbanos, el caudal máximo calculado de $85.6 \text{ m}^3/\text{s}$ se consideró aceptable con respecto a estudios anteriores realizados en la zona de interés, es importante mencionar que el flujo estimado no representa mayores riesgos, puesto que su valor con respecto al tamaño de la cuenca de aporte no ocasionarían escenarios catastróficos para las nuevas infraestructuras de los puentes.

Con la topografía a detalle realizada en campo se establecieron las condiciones y características del terreno adyacente a los puentes, junto con las batimetrías que sirvieron para determinar la geometría del cauce, cabe recalcar que los puntos tomados in-situ se limitaron a los linderos de los predios cercanos a los puentes, por lo que si se desea analizar los riesgos de inundabilidad para periodos de retornos mayores se requiere ampliar el levantamiento realizado.

Respecto al análisis de las condiciones granulométricas que conforman los suelos de la zona de estudio, se determinó que los coeficientes de rugosidad calculados no se ajustaron a los que calibraron el modelo, a causa de una falta de partículas de grandes tamaños en la toma de muestras, lo que genera una discrepancia con los valores asumidos para la calibración, esto se debe a que los equipos del laboratorio de la universidad no fueron los adecuados para este tipo de ensayos, lo que exige una estimación de rugosidades aplicando diferentes criterios y metodologías como inteligencia artificial a través de fotografías digitales.

Para el proyecto se consideró una zona de influencia directa a los puentes de doscientos metros aplicando un modelo de flujo no permanente con un caudal máximo en su hidrograma de $85.3 \text{ m}^3/\text{s}$, manifestándose al mismo tiempo ciertas dificultades en la calibración del modelo por la falta de una herramienta en la interfaz del

programa *HEC-RAS* que permita automatizar y acercar los caudales reales con los estimados, lo que evitaría el ingreso manual de datos asumidos sin análisis previos.

En esta investigación se aplicó únicamente la modelización unidimensional (1D) en el programa computacional *HEC-RAS* ya que demostró ser suficiente para definir el comportamiento hidráulico del río *Burgay*, porque al ser un río pequeño proveniente de una cuenca de tercer orden con ausencia de embalses de grandes cantidades de agua, no afectaría la simulación en el programa como ocurre en el análisis de ríos extremadamente anchos para los cuales se requiere la modelización bidimensional (2D) o cuasi-dimensional.

De los resultados se observó el comportamiento de un flujo mixto a lo largo del cauce con condiciones de flujo supercrítico bajo los puentes por un posible aumento de la pendiente en la zona producto de posibles excavaciones o nuevos espacios como consecuencia del colapso de las cimentaciones y pilares del puente patrimonial del ferrocarril, lo que provoca una disminución considerable del tirante y ancho de inundación en aquella zona, previniendo grandes erosiones en los estribos en épocas de crecientes. Sin embargo esto no significa seguridad absoluta para las cimentaciones ya que se especificaron ciertas secciones donde el aumento del nivel de agua puede provocar socavaciones en el apoyo de los estribos.

Finalmente, con todo lo mencionado se establece que los puentes de la avenida *16 de Abril* sector *La Concordia* son estables en el aspecto hidráulico, dado que el flujo no forma gálidos pequeños y la losa de los puentes no se expone a un acercamiento riesgoso con el agua. Aunque las velocidades pueden ser un tanto elevadas tomando en cuenta las obtenidas con un periodo de retorno de 100 años en la zona cercana a los estribos y provocar socavaciones junto con una lámina de agua ancha, se puede realizar un estudio que implemente enrocamientos en las zonas vulnerables tomando en cuenta que deben ser debidamente verificados con modelos matemáticos y físicos que representen el comportamiento del flujo aguas arriba cuando se disminuya las secciones bajo los puentes.

5.1. Recomendaciones

Para dar un acercamiento más certero a la granulometría en cauces se recomienda realizar métodos de inspección visual que permitan estimar el coeficiente de *Manning* a partir de fotografías cuando no existe la posibilidad de un análisis completo con ensayos de laboratorio convencionales como fue el caso de esta investigación.

Si se desea realizar un análisis bidimensional (2D) o una simulación para periodos de retorno mayores al de este trabajo, se sugiere amplificar la topografía hacia los predios aledaños a la zona de estudio.

En el caso de presentarse problemas para la simulación con la herramienta *Unsteady Flow* se puede ejecutar las condiciones de un hidrograma en la ventana de flujo permanente ingresando manualmente y de forma individual cada uno de los caudales correspondientes a un intervalo de tiempo específico, tomando en cuenta siempre que este procedimiento no puede ser aplicado cuando se manejen sedimentos, para ello se recomienda el empleo de softwares alternativos como *Iber* que es un modelo computacional estrictamente enfocado en análisis de flujo bidimensional.

Para el diseño de futuras obras de protección y mejoramiento de las márgenes del río, se puede tomar toda la información recopilada a lo largo de esta investigación como fundamento para la ejecución e implementación de dichas obras que contribuyan a la estabilidad de los puentes motivo de estudio. Las nuevas estructuras modifican el comportamiento natural del cauce, es decir cuando se reduce una sección aumenta la velocidad y también los tirantes aguas arriba, por ello un modelo físico será la mejor opción para analizar este comportamiento.

Sección 6

Bibliografía

- [1] T. Ochoa, *Hidrología hidráulica y socavación en puentes*, 1ra. Bogotá: ECOE Ediciones, 2017, ISBN: 978-958-771-435-7.
- [2] American Association of State Highway Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 8th Edition*, 2017.
- [3] N. Almonte Pilco y S. De La Cruz Vega, «Evaluación y diseño de protección frente a la socavación hidráulica del puente Unocolla, Juliaca – Puno,» *Tayacaja*, vol. 4, págs. 164-166, 2021. DOI: 10.47797/1lamkasun.v3i1.85. dirección: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/74137>.
- [4] S. Hasan y E. Elwakil, «Stochastic regression deterioration models for superstructure of prestressed concrete bridges in California,» *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, vol. 4, n.º 2, págs. 97-108, 2019, ISSN: 24705322. DOI: 10.1080/24705314.2019.1603194.
- [5] H. Marengo, *Obras de desvío en proyectos hidráulicos, aspectos de diseño y construcción*. Instituto de Ingeniería UNAM, 2019, pág. 206, ISBN: 9786073026680.
- [6] J. Álvarez y G. Calle, *Estudio De Parámetros Hidráulicos E Hidrológicos Para El Dimensionamiento De Obras Para Drenaje Vial En La Vía De Acceso Al Sector “La Unión” En Santa Isabel – Azuay*. Cuenca: Universidad de Cuenca, 2013. dirección: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/4472>.
- [7] W. Gámez, *Texto Básico Autoformativo de Topografía General*. Managua: Universidad Nacional Agraria, 2015, ISBN: 978-99924-1-036-3.
- [8] J. F. Gallardo Sancha, *Batimetría de ríos, arroyos, embalses y estuarios de la comunidad autónoma del país Vasco. Trabajos de topografía*. Ingeniería Cartográfica GAROA, S.L., 2014, vol. I, pág. 110.
- [9] M. Vásconez, A. Mancheno, C. Álvarez, C. Cevallos y L. Ortiz, *Cuencas Hidrográficas*. Universidad Politécnica Salesiana, 2019, pág. 136.

- [10] G. T. Hernández y L. A. V. Manzo, «Caracterización morfométrica de la cuenca del río Huitzilac, Puebla, México,» *Boletín Geográfico*, vol. 44, n.º 1, págs. 41-58, jul. de 2022, ISSN: 0326-1735. dirección: <http://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/3438>.
- [11] J. Zhicay, *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, 2020, pág. 120. dirección: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18364/1/UPS-CT008684.pdf>.
- [12] J. Senciales, «El análisis morfológico de las cuencas fluviales aplicado al estudio hidrográfico,» *Norba. Revista de geografía*, págs. 155-183, 1998. dirección: <http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/109746.pdf>.
- [13] L. S. Cano, *Estudio hidrológico cuenca Altavista*. Medellín: Universidad de Antioquia Facultad de Ingeniería, 2020. dirección: https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15606/2/CanoLuis_2020_EstudioHidrologicoAltavista.pdf.
- [14] M. Villón, *Hidrología*. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Cartago, 2004, ISBN: 9977 66-159-6.
- [15] L. A. Arias, F. Calderón, F. L. Ramírez et al., «Relleno de datos faltantes en series de datos de precipitación para la ciudad de Guanajuato,» *Jóvenes en la Ciencia*, vol. 10, págs. 1-10, 2021. dirección: <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3323>.
- [16] B. Castañeda, *Estimación de datos faltantes de precipitación en las estaciones meteorológicas de la microcuenca del río Tabacay*. Azogues: Universidad Católica de Cuenca, 2021, pág. 131, ISBN: 1105169294. dirección: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7954>.
- [17] J. Gómez y M. Aguayo, «Evaluación de desempeño de métodos de relleno de datos pluviométricos en dos zonas morfoestructurales del centro Sur de Chile,» *Investigaciones Geográficas*, vol. 99, n.º 2448-7279, pág. 16, 2019. DOI: [dx.doi.org/10.14350/rig.59837](https://doi.org/10.14350/rig.59837).
- [18] J. A. Mejía Marcauzco, *Probabilidad y estadística en hidrología*. Fondo Editorial-UNALM, 2017.
- [19] M. Villón Bejar, *Hidrología estadística*. Lima: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2006, pág. 443.
- [20] J. L. Mélice y C. J. Reason, «Return period of extreme rainfall at George, South Africa,» *South African Journal of Science*, vol. 103, n.º 11-12, págs. 499-501, 2007, ISSN: 00382353.

- [21] V. T. Chow, *Hidrología Aplicada*. Santa Fé de Bogotá: McGRAW-HILL, 2008, ISBN: 958-600-171-7.
- [22] Gobierno del Perú, *Manual De Hidrología, Hidráulica Y Drenaje*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2021, pág. 222.
- [23] L. Mediero, *Hidrología*. Madrid: Ediciones Paraninfo, S.A., 2021, ISBN: 9788428345002.
- [24] M. Portuguez y C. Verano, «Generación de mapa de número de curva con sistema de información geográfica,» *Naturaleza y Sociedad*, vol. 01, n.º 01, págs. 91-99, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2016029>.
- [25] K. Soto, *Estudio de máximas avenidas en la cuenca del Río Moche mediante el software HEC-HMS*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo, 2019, pág. 172. dirección: <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/12359>.
- [26] L. Carreras, *Metodología para la modelación distribuida con el software HEC-HMS*. La Habana: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2013, pág. 95.
- [27] S. Kozani e I. Markonis, *Hydrognomon versión 4: Guía del usuario*, Universidad Técnica Nacional de Atenas, Atenas, Grecia, 2009.
- [28] L. Timbe y E. Timbe, «Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del río Burgay,» *Maskana*, vol. 3, n.º 1, págs. 87-96, 2012, ISSN: 13906143. DOI: [10.18537/mskn.03.01.07](https://doi.org/10.18537/mskn.03.01.07).
- [29] M. Pérez, *Frente de Pareto de la calibración en régimen impermanente de un modelo hidráulico del río Yanuncay, de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: Universidad del Azuay, 2019.
- [30] M. Guevara, *Socavación en puentes: Evaluación, instrumentación y cálculo*. Popayán: Universidad del Cauca, 2021.
- [31] C. Fernández, A. León, Y. Rodríguez, P. Martínez y D. Meneses, «Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales,» *INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL*, vol. XXXIX, págs. 17-31, ene. de 2018, ISSN: ISSN 1815-591X. dirección: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v39n1/riha02118.pdf>.
- [32] Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, «ASTM D-422 Método de Ensayo Estándar para el Análisis Granulométrico.,» *ASTM Internacional*, págs. 1-15, 2007.
- [33] Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, «Mecánica de suelos. Toma de muestras alteradas. INEN 686 1982-05,» *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, págs. 1-9, 1987, ISSN: 1096-6080. dirección: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_686.pdf.

- [34] V. Romero, *Caudales, aforos y cálculo de las persistencias*. Moquegua: Universidad José Carlos Mariátegui, 2021, pág. 101.
- [35] D. Fernández, *Calibración de un molinete de aspas para la realización de un aforo por vadeo de un cauce pequeño*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2019, vol. 6, págs. 5-10, ISBN: 6103544947. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- [36] ISO, *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats (ISO 748:2007)*. 2007, pág. 46. dirección: <https://www.iso.org/standard/37573.html>.
- [37] J. Jaramillo, *Estimación de caudal en cauces naturales mediante integración numérica aplicando lenguaje Python*. Azogues, 2021, págs. 1-71, ISBN: 1105169294. dirección: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/7954>.
- [38] Organización Meteorológica Mundial (OMM), *Guía de prácticas hidrológicas. Volumen II. Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. 2011, pág. 330, ISBN: 978-92-63-30168-0. dirección: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=9404#.X10SsWgzBdC.
- [39] F. Quiñones Márquez y S. Guzmán Ríos, *Determinación de caudal y técnicas de muestreo en agua superficial*. San Juan, Puerto Rico, 1986, pág. 76. dirección: <https://pubs.usgs.gov/of/1985/0089/report.pdf>.
- [40] Subdirección Ambiental - Área Metropolitana del Valle de Aburrá, *Manual para la realización de aforos de caudal en fuentes superficiales de agua*. Medellín, 2019, vol. 1, pág. 15. dirección: <https://www.metropol.gov.co/area/Documents/transparencia/M-GAA-RR-03%20Manual%20para%20la%20realizaci%7B%5C%27%7Bo%7D%7Dn%20aforos%20caudal%20fuentes%20superficiales.pdf>.
- [41] E. Soto, «Python en Ingeniería en Ciencias Informáticas: proyecciones de las dimensiones práctica, científica y social,» *Serie Científica de la Universidad de las Ciencias Informáticas*, vol. 14, n.º 12, págs. 1-15, 2021.
- [42] A. Bolaños y B. Narváez, «Una breve introducción a Python y sus aplicaciones en la ingeniería,» *La Ingeniería y sus aplicaciones: una perspectiva desde la industria, la investigación y la educación*, vol. 9, págs. 86-103, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.10288.43523.
- [43] J. O. Lasso Martínez y F. R. Mafla Chamorro, «Modelación de la erosión general en cauces naturales mediante software HEC RAS,» *Boletín Informativo CEI-Universidad Mariana*, vol. 7, n.º 3, págs. 132-137, 2020. dirección: <http://editorial.umariana.edu.co/revistas/index.php/BoletinInformativoCEI/article/download/2405/2619>.

- [44] R. Santos, C. Cubillos y A. Vargas, «Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS,» *Avances en recursos hidráulicos*, vol. 17, págs. 43-54, 2008.
- [45] F. Santacruz, *Estimación estadística de precipitaciones máximas en el cantón Azogues*. Azogues: Universidad Católica de Cuenca, 2020, pág. 59.
- [46] M. d. I. A. Perozo y J. C. Rincón, «Evaluación hidráulica de un puente sobre una quebrada con régimen mixto y lecho móvil,» *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, vol. 36, n.º 1, págs. 16-30, 2015, ISSN: 1815-591X. dirección: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000100002&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- [47] Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador, *Nevi-12 Volumen N°3 Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. 2013, vol. 3, pág. 1028. dirección: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_3.pdf.
- [48] MTC, *Manual de puentes*, Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Lima, jul. de 2003.
- [49] E. Soto Amador, *Modelo de socavación en la base del pilar del puente Mariscal Cáceres*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2013, pág. 170. dirección: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/434>.
- [50] M. Villón, *Cálculos hidrológicos e hidráulicos en Cuencas Hidrográficas*. Tegucigalpa: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, 2018, pág. 72.

Sección 7

Anexos

7.1. Tabla de valores críticos para el test de Kolmogorov-Smirnov

Test de Kolmogorov-Smirnov sobre Bondad de Ajuste								
<i>n</i>	Nivel de significación α							
	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002	0.001
1	0.90000	0.95000	0.97500	0.99000	0.99500	0.99750	0.99900	0.99950
2	0.68337	0.77639	0.84189	0.90000	0.92929	0.95000	0.96838	0.97764
3	0.56481	0.63604	0.70760	0.78456	0.82900	0.86428	0.90000	0.92065
4	0.49265	0.56522	0.62394	0.68887	0.73424	0.77639	0.82217	0.85047
5	0.44698	0.50945	0.56328	0.62718	0.66853	0.70543	0.75000	0.78137
6	0.41037	0.46799	0.51926	0.57741	0.61661	0.65287	0.69571	0.72479
7	0.38148	0.43607	0.48342	0.53844	0.57581	0.60975	0.65071	0.67930
8	0.35831	0.40962	0.45427	0.50654	0.54179	0.57429	0.61368	0.64098
9	0.33910	0.38746	0.43001	0.47960	0.51332	0.54443	0.58210	0.60846
10	0.32260	0.36866	0.40925	0.45562	0.48893	0.51872	0.55500	0.58042
11	0.30829	0.35242	0.39122	0.43670	0.46770	0.49539	0.53135	0.55588
12	0.29577	0.33815	0.37543	0.41918	0.44905	0.47672	0.51047	0.53422
13	0.28470	0.32549	0.36143	0.40362	0.43247	0.45921	0.49189	0.51490
14	0.27481	0.31417	0.34890	0.38970	0.41762	0.44352	0.47520	0.49753
15	0.26589	0.30397	0.33750	0.37713	0.40420	0.42934	0.45611	0.48182
16	0.25778	0.29472	0.32733	0.36571	0.39201	0.41644	0.44637	0.46750
17	0.25039	0.28627	0.31796	0.35528	0.38086	0.40464	0.43380	0.45540

Figura 7.1: Valores críticos Test *Kolmogorov-Smirnov* [18].

7.2. Aplicación test Kolmogorov-Smirnov

Tabla 7.1: Aplicación de prueba *Kolmogorov-Smirnov*, estación *Condoryacu*.

n	Año	Precipitación máxima 24h	pi	z	p(zi)	p(zi)-p(i)	p(zi)-p(i)-1
1	2010	23	0.0833	-1.0327	0.1509	0.0675	0.1509
2	2017	26.162	0.1667	-0.6866	0.2462	0.0795	0.1628
3	2021	26.4	0.2500	-0.6606	0.2544	0.0044	0.0878
4	2020	27	0.3333	-0.5949	0.2760	0.0574	0.0260
5	2013	27.686	0.4167	-0.5198	0.3016	0.1151	0.0317
6	2019	28	0.5000	-0.4854	0.3137	0.1863	0.1030
7	2016	29.21	0.5833	-0.3530	0.3620	0.2213	0.1380
8	2011	30	0.6667	-0.2665	0.3949	0.2718	0.1884
9	2015	32.258	0.7500	-0.0194	0.4923	0.2577	0.1744
10	2014	42.672	0.8333	1.1204	0.8687	0.0354	0.1187
11	2012	43.434	0.9167	1.2038	0.8857	0.0310	0.0523
12	2018	53.4	1.0000	2.2946	0.9891	0.0109	0.0725
Total		389.222					

Tabla 7.2: Aplicación de prueba *Kolmogorov-Smirnov*, estación *Nudpud*.

n	Año	Prec maxima 24h	pi	z	p(zi)	p(zi)-p(i)	p(zi)-p(i)-1
1	2010	23	0.0833	-1.0327	0.1509	0.0675	0.1509
2	2017	26.162	0.1667	-0.6866	0.2462	0.0795	0.1628
3	2021	26.4	0.2500	-0.6606	0.2544	0.0044	0.0878
4	2020	27	0.3333	-0.5949	0.2760	0.0574	0.0260
5	2013	27.686	0.4167	-0.5198	0.3016	0.1151	0.0317
6	2019	28	0.5000	-0.4854	0.3137	0.1863	0.1030
7	2016	29.21	0.5833	-0.3530	0.3620	0.2213	0.1380
8	2011	30	0.6667	-0.2665	0.3949	0.2718	0.1884
9	2015	32.258	0.7500	-0.0194	0.4923	0.2577	0.1744
10	2014	42.672	0.8333	1.1204	0.8687	0.0354	0.1187
11	2012	43.434	0.9167	1.2038	0.8857	0.0310	0.0523
12	2018	53.4	1.0000	2.2946	0.9891	0.0109	0.0725
Total		389.222					

Tabla 7.3: Aplicación de prueba *Kolmogorov-Smirnov*, estación *Guapán*.

n	Año	Prec maxima 24h	pi	z	p(zi)	p(zi)-p(i)	p(zi)-p(i)-1
1	2010	22.5	0.0833	-1.4743	0.0702	0.0131	0.0702
2	2021	25	0.1667	-1.1526	0.1245	0.0421	0.0412
3	2018	30	0.2500	-0.5092	0.3053	0.0553	0.1386
4	2019	30	0.3333	-0.5092	0.3053	0.0280	0.0553
5	2017	31.8	0.4167	-0.2776	0.3907	0.0260	0.0573
6	2015	31.9372	0.5000	-0.2599	0.3975	0.1025	0.0192
7	2012	33.02	0.5833	-0.1206	0.4520	0.1313	0.0480
8	2015	33.38	0.6667	-0.0743	0.4704	0.1963	0.1129
9	2020	37.4	0.7500	0.4430	0.6711	0.0789	0.0045
10	2016	38.608	0.8333	0.5985	0.7252	0.1081	0.0248
11	2014	42.34	0.9167	1.0787	0.8596	0.0570	0.0263
12	2011	51.5	1.0000	2.2575	0.9880	0.0120	0.0713
Total		407.4852					

Tabla 7.4: Aplicación de prueba *Kolmogorov-Smirnov*, estación *Llaucay*.

n	Año	Prec maxima 24h	pi	z	p(zi)	p(zi)-p(i)	p(zi)-p(i)-1
1	2010	12.97	0.0833	-1.4108	0.0792	0.0042	0.0792
2	2013	15.61	0.1667	-1.0766	0.1408	0.0258	0.0575
3	2011	16.91	0.2500	-0.9115	0.1810	0.0690	0.0143
4	2015	19.81	0.3333	-0.5450	0.2929	0.0405	0.0429
5	2016	20.07	0.4167	-0.5129	0.3040	0.1126	0.0293
6	2018	23.88	0.5000	-0.0309	0.4877	0.0123	0.0710
7	2012	24.49	0.5833	0.0468	0.5186	0.0647	0.0186
8	2019	25.15	0.6667	0.1298	0.5516	0.1150	0.0317
9	2014	25.40	0.7500	0.1619	0.5643	0.1857	0.1023
10	2020	30.73	0.8333	0.8368	0.7986	0.0347	0.0486
11	2021	34.54	0.9167	1.3188	0.9064	0.0103	0.0730
12	2017	39.88	1.0000	1.9936	0.9769	0.0231	0.0602
Total		289.44					

7.3. Número de curva de escorrentía

TABLA 5.5.2
Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación con tratamientos de conservación	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastizales: condiciones pobres condiciones óptimas	68 39	79 61	86 74	89 80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena ²	45 25	66 55	77 70	83 77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	39 49	61 69	74 79	80 84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Figura 7.2: Número de curva de escorrentía para uso selecto de tierras [21].

7.4. Coeficiente de escorrentía

TABLA 5.5.2
Números de curva de escorrentía para usos selectos de tierra agrícola, sub-urbana y urbana (condiciones antecedentes de humedad II, $I_a = 0.2S$)

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación con tratamientos de conservación	72 62	81 71	88 78	91 81
Pastizales: condiciones pobres condiciones óptimas	68 39	79 61	86 74	89 80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena ²	45 25	66 55	77 70	83 77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	39 49	61 69	74 79	80 84
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Figura 7.3: Coeficiente de escorrentía para diferentes uso de suelo en relación a su pendiente [21].

7.5. Comparación de métodos en el programa computacional Hydrognomon 4

Tabla 7.5: Elección de método de distribución para la estación *Condoryacu*.

Datos estación Condoryacu			
Test Kolmogorov-Smirnov	Confiabilidad=95 %	Resultado	DMax
Normal	Aceptado	48.10 %	0.22047
LogNormal	Aceptado	75.33 %	0.17275
Gamma	Aceptado	67.51 %	0.18636
Log Pearson III	Aceptado	97.31 %	0.11785
EV1-Max (Gumbel)	Aceptado	81.35 %	0.16162

Tabla 7.6: Elección de método de distribución para la estación *Nudpud*.

Datos estación Nudpud			
Test Kolmogorov-Smirnov	Confiabilidad=95 %	Resultado	DMax
Normal	Aceptado	99.83 %	0.08986
LogNormal	Aceptado	95.01 %	0.12804
Gamma	Aceptado	97.85 %	0.11471
Log Pearson III	Aceptado	81.61 %	0.16113
EV1-Max (Gumbel)	Aceptado	85.64 %	0.15297

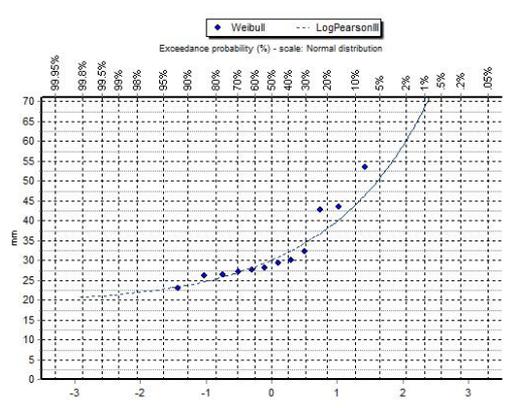
Tabla 7.7: Elección de método de distribución para la estación *Guapán*.

Datos estación Guapán			
Test Kolmogorov-Smirnov	Confiabilidad=95 %	Resultado	DMax
Normal	Aceptado	99.628 %	0.09585
LogNormal	Aceptado	99.990 %	0.0737
Gamma	Aceptado	99.997 %	0.06895
Log Pearson III	Aceptado	99.993 %	0.07216
EV1-Max (Gumbel)	Aceptado	99.847 %	0.08899

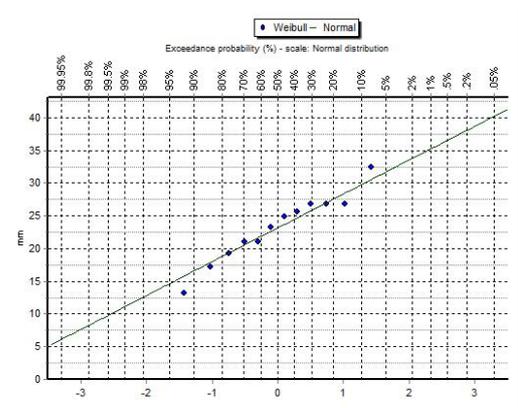
Tabla 7.8: Elección de método de distribución para la estación *Llaucay*.

Datos estación Llaucay			
Test Kolmogorov-Smirnov	Confiabilidad=95 %	Resultado	DMax
Normal	Aceptado	95.020 %	0.12798
LogNormal	Aceptado	99.834 %	0.08954
Gamma	Aceptado	99.892 %	0.08658
Log Pearson III	Aceptado	99.906 %	0.08572
EV1-Max (Gumbel)	Aceptado	99.610 %	0.09626

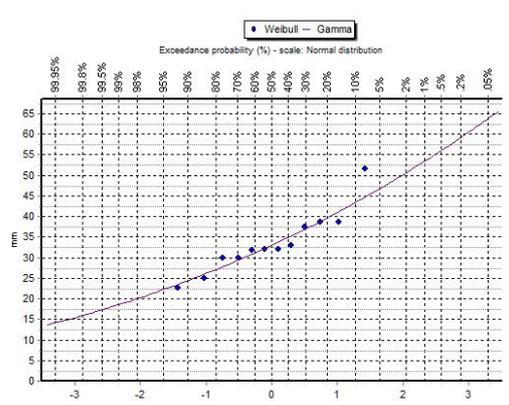
7.6. Gráficas de distribución que mejor se ajustan a cada serie de datos



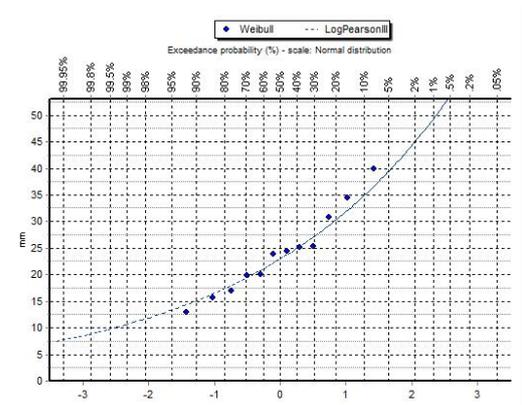
(a) Estación *Condoryacu* - Distribución *Log-Pearson III*.



(b) Estación *Nudpud* - Distribución *Normal*.



(c) Estación *Guapán* - Distribución *Gamma*.



(d) Estación *LLaucay* - Distribución *Log Pearson III*.

Figura 7.4: Gráficas de distribución que mejor se ajusta para cada estación.

7.7. Tamizadora de partículas gruesas



Figura 7.5: Tamizadora utilizada para análisis granulométrico de partículas gruesas.

7.8. Valores de rugosidad típicos para cauces naturales

Tabla 7.9: Coeficientes de rugosidad típicos para corrientes naturales[50].

Superficie	Condiciones			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
(1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos.	0.025	0.028	0.030	0.033
(2) Igual al (1) pero con algo de hierba y piedra.	0.030	0.033	0.035	0.040
(3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpio	0.033	0.035	0.040	0.045
(4) Igual al (3), de poco tirante, con pendiente y sección menos eficiente	0.040	0.045	0.050	0.055
(5) Igual al (3), algo de hierba y piedras.	0.035	0.040	0.045	0.050
(6) Igual al (4), secciones pedregosas.	0.045	0.050	0.055	0.060
(7) Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos.	0.050	0.060	0.070	0.080
(8) Playas muy enyerbadas	0.075	0.100	0.125	0.150

7.9. Matrices para el cálculo del coeficiente de rugosidad con el método de medición de velocidades

Tabla 7.10: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 1 en la sección 1.

RUGOSIDAD AGUAS ARRIBA DÍA 1								
Abscisa (m)	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V	n	n*
0.38	0.29	0.232	0.058	0.241	0.425	1.76348548	0.041	-
0.76	0.31	0.248	0.062	0.19	0.409	2.15263158	0.055	0.055
1.14	0.32	0.256	0.064	0.241	0.493	2.04564315	0.052	0.052
1.52	0.32	0.256	0.064	0.216	0.489	2.26388889	0.058	0.058
1.9	0.3	0.24	0.06	0.335	0.644	1.92238806	0.047	0.047
2.28	0.36	0.288	0.072	0.403	0.627	1.55583127	0.034	-
2.66	0.35	0.28	0.07	0.241	0.589	2.4439834	0.064	0.064
3.04	0.36	0.288	0.072	0.287	0.644	2.24390244	0.059	0.059
3.42	0.4	0.32	0.08	0.286	0.884	3.09090909	0.080	-
3.8	0.45	0.36	0.09	0.409	0.932	2.27872861	0.062	0.062
4.18	0.48	0.384	0.097	0.428	0.953	2.22663551	0.061	0.061
4.56	0.46	0.368	0.092	0.409	0.885	2.16381418	0.059	0.059
4.94	0.45	0.36	0.09	0.275	0.732	2.66181818	0.072	-
5.32	0.4	0.32	0.08	0.286	0.751	2.62587413	0.070	-
5.7	0.4	0.32	0.08	0.31	0.692	2.23225806	0.060	0.060
6.08	0.39	0.312	0.078	0.38	0.693	1.82368421	0.046	0.046
6.46	0.36	0.288	0.072	0.343	0.562	1.63848397	0.037	-
6.84	0.37	0.296	0.074	0.316	0.532	1.6835443	0.039	-
7.22	0.37	0.296	0.074	0.252	0.427	1.69444444	0.040	-
Promedio	0.37578947					Promedio	0.055	0.057
Desv	0.05580878					Desv.est	0.013	0.006
						+(0.013)	0.067	
						-(0.013)	0.042	

Tabla 7.11: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 2 en la sección 1.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ARRIBA DIA2						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.38	0.24	0.192	0.048	0.26	0.43	1.65384615	0.036	0.036
0.76	0.27	0.216	0.054	0.241	0.367	1.52282158	0.031	-
1.14	0.29	0.232	0.058	0.184	0.333	1.80978261	0.043	0.043
1.52	0.3	0.24	0.06	0.196	0.351	1.79081633	0.042	0.042
1.9	0.3	0.24	0.06	0.217	0.396	1.82488479	0.044	0.044
2.28	0.34	0.272	0.068	0.224	0.543	2.42410714	0.063	0.063
2.66	0.35	0.28	0.07	0.167	0.504	3.01796407	0.077	-
3.04	0.33	0.264	0.066	0.186	0.593	3.18817204	0.079	-
3.42	0.38	0.304	0.076	0.291	0.627	2.15463918	0.057	0.057
3.8	0.41	0.328	0.082	0.442	0.707	1.59954751	0.036	0.036
4.18	0.46	0.368	0.092	0.409	0.901	2.20293399	0.060	0.060
4.56	0.44	0.352	0.088	0.421	0.924	2.19477435	0.059	0.059
4.94	0.41	0.328	0.082	0.362	0.694	1.91712707	0.049	0.049
5.32	0.39	0.312	0.078	0.286	0.751	2.62587413	0.070	-
5.7	0.37	0.296	0.074	0.296	0.612	2.06756757	0.054	0.054
6.08	0.35	0.28	0.07	0.334	0.567	1.69760479	0.040	0.040
6.46	0.33	0.264	0.066	0.251	0.483	1.92430279	0.048	0.048
6.84	0.34	0.272	0.068	0.263	0.423	1.60836502	0.036	0.036
7.22	0.33	0.264	0.066	0.229	0.294	1.28384279	0.019	-
Promedio	0.34894737					n Promedio	0.050	0.048
Desviación. Est.	0.05714453					Des. Est	0.016	0.010
						(+)0.016	0.066	
						(-)0.016	0.034	

Tabla 7.12: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 3 en la sección 1.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ARRIBA DÍA 3						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.38	0.27	0.216	0.054	0.214	0.45	2.10280374	0.052	0.052
0.76	0.29	0.232	0.058	0.197	0.392	1.98984772	0.049	0.049
1.14	0.29	0.232	0.058	0.224	0.36	1.60714286	0.035	0.035
1.52	0.3	0.24	0.06	0.191	0.358	1.87434555	0.045	0.045
1.9	0.3	0.24	0.06	0.41	0.474	1.15609756	0.011	-
2.28	0.3	0.24	0.06	0.29	0.484	1.66896552	0.038	0.038
2.66	0.32	0.256	0.064	0.283	0.498	1.75971731	0.042	0.042
3.04	0.34	0.272	0.068	0.314	0.543	1.72929936	0.041	0.041
3.42	0.36	0.288	0.072	0.357	0.561	1.57142857	0.034	0.034
3.8	0.43	0.344	0.086	0.51	0.593	1.1627451	0.012	-
4.18	0.44	0.352	0.088	0.308	0.604	1.96103896	0.052	0.052
4.56	0.41	0.328	0.082	0.224	0.68	3.03571429	0.079	-
4.94	0.39	0.312	0.078	0.4	0.681	1.7025	0.041	0.041
5.32	0.38	0.304	0.076	0.334	0.692	2.07185629	0.054	0.054
5.7	0.37	0.296	0.074	0.164	0.516	3.14634146	0.080	-
6.08	0.32	0.256	0.064	0.227	0.325	1.43171806	0.027	0.027
6.46	0.31	0.248	0.062	0.183	0.237	1.29508197	0.019	-
6.84	0.31	0.248	0.062	0.177	0.339	1.91525424	0.047	0.047
7.22	0.27	0.216	0.054	0.08	0.157	1.9625	0.048	0.048
Promedio	0.33684211					n Promedio	0.042	0.043
Desviación. Est.	0.05292055					Des. Est	0.018	0.008
						(+)0.018	0.061	
						(-)0.018	0.024	

Tabla 7.13: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 4 en la sección 1.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ARRIBA DÍA 4						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.38	0.25	0.2	0.05	0.187	0.366	1.95721925	0.047	0.047
0.76	0.28	0.224	0.056	0.216	0.413	1.91203704	0.046	0.046
1.14	0.28	0.224	0.056	0.239	0.396	1.65690377	0.037	0.037
1.52	0.29	0.232	0.058	0.226	0.417	1.84513274	0.044	0.044
1.9	0.29	0.232	0.058	0.371	0.458	1.23450135	0.016	-
2.28	0.29	0.232	0.058	0.333	0.502	1.50750751	0.030	0.030
2.66	0.3	0.24	0.06	0.347	0.524	1.51008646	0.030	0.030
3.04	0.31	0.248	0.062	0.386	0.557	1.44300518	0.027	0.027
3.42	0.36	0.288	0.072	0.416	0.623	1.49759615	0.031	0.031
3.8	0.4	0.32	0.08	0.493	0.692	1.40365112	0.026	0.026
4.18	0.44	0.352	0.088	0.335	0.682	2.0358209	0.054	-
4.56	0.41	0.328	0.082	0.327	0.674	2.06116208	0.055	-
4.94	0.38	0.304	0.076	0.413	0.672	1.62711864	0.037	0.037
5.32	0.37	0.296	0.074	0.368	0.656	1.7826087	0.044	0.044
5.7	0.35	0.28	0.07	0.284	0.538	1.8943662	0.047	0.047
6.08	0.32	0.256	0.064	0.243	0.347	1.42798354	0.027	0.027
6.46	0.29	0.232	0.058	0.186	0.261	1.40322581	0.025	0.025
6.84	0.29	0.232	0.058	0.193	0.296	1.53367876	0.031	0.031
7.22	0.28	0.224	0.056	0.141	0.211	1.4964539	0.029	0.029
Promedio	0.32526316					Promedio	0.036	0.035
Desv	0.05357948					Desv.est	0.011	0.008
						+(0.011)	0.047	
						-(0.011)	0.025	

Tabla 7.14: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 5 en la sección 1.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ARRIBA DÍA 5						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.38	0.23	0.184	0.046	0.228	0.314	1.37719298	0.023	-
0.76	0.26	0.208	0.052	0.194	0.287	1.47938144	0.028	-
1.14	0.28	0.224	0.056	0.187	0.306	1.63636364	0.036	0.036
1.52	0.29	0.232	0.058	0.226	0.323	1.42920354	0.026	-
1.9	0.29	0.232	0.058	0.283	0.437	1.54416961	0.032	0.032
2.28	0.31	0.248	0.062	0.29	0.484	1.66896552	0.038	0.038
2.66	0.32	0.256	0.064	0.308	0.482	1.56493506	0.033	0.033
3.04	0.34	0.272	0.068	0.347	0.572	1.64841499	0.037	0.037
3.42	0.38	0.304	0.076	0.363	0.642	1.76859504	0.043	0.043
3.8	0.42	0.336	0.084	0.421	0.751	1.78384798	0.045	-
4.18	0.45	0.36	0.09	0.427	0.812	1.90163934	0.050	-
4.56	0.43	0.344	0.086	0.483	0.806	1.66873706	0.040	0.040
4.94	0.41	0.328	0.082	0.482	0.735	1.52489627	0.033	0.033
5.32	0.38	0.304	0.076	0.387	0.653	1.6873385	0.040	0.040
5.7	0.36	0.288	0.072	0.274	0.527	1.92335766	0.049	-
6.08	0.34	0.272	0.068	0.268	0.431	1.60820896	0.036	0.036
6.46	0.32	0.256	0.064	0.213	0.364	1.70892019	0.040	0.040
6.84	0.32	0.256	0.064	0.218	0.317	1.45412844	0.028	0.028
7.22	0.31	0.248	0.062	0.143	0.247	1.72727273	0.040	0.040
Promedio	0.33894737					n Promedio	0.037	0.037
Desviación. Est.	0.06017518					Des. Est	0.007	0.004
						(+)0.007	0.044	
						(-)0.007	0.029	

Tabla 7.15: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 1 en la sección 2.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ABAJO DÍA 1						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.28	0.27	0.216	0.054	0.122	0.157	1.28688525	0.019	0.019
0.56	0.29	0.232	0.058	0.138	0.155	1.12318841	0.009	-
0.84	0.35	0.28	0.07	0.221	0.329	1.48868778	0.030	0.030
1.12	0.38	0.304	0.076	0.063	0.089	1.41269841	0.027	0.027
1.4	0.31	0.248	0.062	0.312	0.452	1.44871795	0.028	0.028
1.68	0.4	0.32	0.08	0.364	0.657	1.80494505	0.045	0.045
1.96	0.34	0.272	0.068	0.381	0.778	2.04199475	0.052	-
2.24	0.33	0.264	0.066	0.532	0.578	1.08646617	0.006	-
2.52	0.5	0.4	0.1	0.512	0.758	1.48046875	0.032	0.032
2.8	0.46	0.368	0.092	0.413	0.771	1.86682809	0.049	-
3.08	0.5	0.4	0.1	0.571	0.795	1.39229422	0.027	0.027
3.36	0.53	0.424	0.106	0.536	0.858	1.60074627	0.038	0.038
3.64	0.52	0.416	0.104	0.347	0.879	2.53314121	0.071	-
3.92	0.56	0.448	0.112	0.582	0.736	1.26460481	0.019	0.019
4.2	0.56	0.448	0.112	0.476	0.707	1.48529412	0.032	0.032
4.48	0.52	0.416	0.104	0.372	0.623	1.67473118	0.041	0.041
4.76	0.47	0.376	0.094	0.432	0.575	1.33101852	0.023	0.023
5.04	0.47	0.376	0.094	0.267	0.372	1.39325843	0.027	0.027
5.32	0.45	0.36	0.09	0.187	0.289	1.54545455	0.034	0.034
5.6	0.45	0.36	0.09	0.228	0.257	1.12719298	0.010	-
Promedio	0.433					n Promedio	0.031	0.030
Desviación. Est.	0.09234375					Des. Est	0.016	0.008
						(+)0.016	0.047	
						(-)0.016	0.015	

Tabla 7.16: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 2 en la sección 2.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ABAJO DÍA 2						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.56	0.25	0.2	0.05	0.151	0.169	1.1192053	0.008	-
0.84	0.26	0.208	0.052	0.093	0.14	1.50537634	0.030	0.030
1.12	0.28	0.224	0.056	0.19	0.308	1.62105263	0.035	0.035
1.4	0.34	0.272	0.068	0.4	0.467	1.1675	0.012	0.012
1.68	0.36	0.288	0.072	0.39	0.728	1.86666667	0.047	-
1.96	0.38	0.304	0.076	0.237	0.488	2.05907173	0.054	-
2.24	0.37	0.296	0.074	0.512	0.543	1.06054688	0.005	-
2.52	0.39	0.312	0.078	0.31	0.61	1.96774194	0.051	-
2.8	0.41	0.328	0.082	0.31	0.644	2.07741935	0.055	-
3.08	0.46	0.368	0.092	0.411	0.778	1.89294404	0.050	-
3.36	0.47	0.376	0.094	0.523	0.676	1.29254302	0.021	0.021
3.64	0.49	0.392	0.098	0.71	0.887	1.24929577	0.018	0.018
3.92	0.52	0.416	0.104	0.467	0.689	1.47537473	0.032	0.032
4.2	0.49	0.392	0.098	0.52	0.677	1.30192308	0.021	0.021
4.48	0.45	0.36	0.09	0.432	0.644	1.49074074	0.032	0.032
4.76	0.48	0.384	0.096	0.423	0.528	1.24822695	0.018	0.018
5.04	0.47	0.376	0.094	0.284	0.325	1.1443662	0.011	-
5.32	0.45	0.36	0.09	0.213	0.274	1.28638498	0.020	0.020
5.6	0.43	0.344	0.086	0.16	0.198	1.2375	0.017	0.017
Promedio	0.40789474					Promedio	0.028	0.023
Desv	0.08107465					Desv.est	0.016	0.007
						+(0.016)	0.044	
						-(0.016)	0.012	

Tabla 7.17: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 3 en la sección 2.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ABAJO DÍA 3						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.84	0.27	0.216	0.054	0.051	0.141	2.76470588	0.069	-
1.12	0.3	0.24	0.06	0.176	0.24	1.36363636	0.023	0.023
1.4	0.31	0.248	0.062	0.301	0.475	1.57807309	0.034	0.034
1.68	0.35	0.28	0.07	0.251	0.593	2.3625498	0.062	-
1.96	0.36	0.288	0.072	0.203	0.521	2.56650246	0.067	-
2.24	0.37	0.296	0.074	0.286	0.423	1.47902098	0.030	0.030
2.52	0.38	0.304	0.076	0.287	0.476	1.65853659	0.039	0.039
2.8	0.45	0.36	0.09	0.381	0.603	1.58267717	0.036	0.036
3.08	0.46	0.368	0.092	0.465	0.572	1.23010753	0.017	-
3.36	0.48	0.384	0.096	0.365	0.694	1.90136986	0.050	0.050
3.64	0.48	0.384	0.096	0.487	0.687	1.41067762	0.028	0.028
3.92	0.49	0.392	0.098	0.364	0.553	1.51923077	0.034	0.034
4.2	0.47	0.376	0.094	0.321	0.603	1.87850467	0.049	0.049
4.48	0.45	0.36	0.09	0.392	0.493	1.25765306	0.018	-
4.76	0.45	0.36	0.09	0.315	0.388	1.23174603	0.017	-
5.04	0.41	0.328	0.082	0.3	0.375	1.25	0.018	-
5.32	0.44	0.352	0.088	0.141	0.257	1.82269504	0.046	0.046
5.6	0.42	0.336	0.084	0.106	0.232	2.18867925	0.059	-
Promedio	0.40777778					n Promedio	0.039	0.037
Desviación. Est.	0.06787147					Des. Est	0.018	0.009
						(+)0.018	0.056	
						(-)0.018	0.021	

Tabla 7.18: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 4 en la sección 2

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ABAJO DÍA 4						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.56	0.27	0.216	0.054	0.083	0.114	1.37349398	0.023	0.023
0.84	0.28	0.224	0.056	0.097	0.163	1.68041237	0.038	0.038
1.12	0.33	0.264	0.066	0.253	0.336	1.32806324	0.021	-
1.4	0.34	0.272	0.068	0.332	0.457	1.37650602	0.024	0.024
1.68	0.34	0.272	0.068	0.341	0.576	1.68914956	0.039	0.039
1.96	0.38	0.304	0.076	0.354	0.443	1.25141243	0.017	-
2.24	0.38	0.304	0.076	0.419	0.574	1.3699284	0.024	0.024
2.52	0.4	0.32	0.08	0.386	0.518	1.34196891	0.023	0.023
2.8	0.45	0.36	0.09	0.428	0.701	1.63785047	0.039	0.039
3.08	0.48	0.384	0.096	0.433	0.679	1.56812933	0.036	0.036
3.36	0.49	0.392	0.098	0.442	0.734	1.66063348	0.040	0.040
3.64	0.51	0.408	0.102	0.462	0.692	1.4978355	0.033	0.033
3.92	0.52	0.416	0.104	0.451	0.712	1.57871397	0.037	0.037
4.2	0.5	0.4	0.1	0.384	0.673	1.75260417	0.045	-
4.48	0.47	0.376	0.094	0.385	0.554	1.43896104	0.029	0.029
4.76	0.47	0.376	0.094	0.264	0.401	1.51893939	0.033	0.033
5.04	0.45	0.36	0.09	0.313	0.364	1.1629393	0.012	-
5.32	0.46	0.368	0.092	0.225	0.354	1.57333333	0.036	0.036
5.6	0.45	0.36	0.09	0.195	0.304	1.55897436	0.035	0.035
Promedio	0.41947368					Promedio	0.031	0.033
Desv	0.07777987					Desv.est	0.009	0.006
						+	0.040	
						-	0.022	

Tabla 7.19: Coeficiente de rugosidad calculado para el día 5 en la sección 2.

Abscisa (m)	RUGOSIDAD AGUAS ABAJO DÍA 5						n	n*
	Total	0.8d	0.2d	V0.8	V0.2	V		
0.28	0.24	0.192	0.048	0.094	0.161	1.71276596	0.038	-
0.56	0.27	0.216	0.054	0.13	0.173	1.33076923	0.021	0.021
0.84	0.3	0.24	0.06	0.166	0.264	1.59036145	0.034	0.034
1.12	0.34	0.272	0.068	0.284	0.362	1.27464789	0.019	0.019
1.4	0.35	0.28	0.07	0.332	0.461	1.38855422	0.025	0.025
1.68	0.35	0.28	0.07	0.363	0.612	1.68595041	0.039	-
1.96	0.36	0.288	0.072	0.393	0.483	1.22900763	0.016	-
2.24	0.36	0.288	0.072	0.436	0.552	1.26605505	0.018	0.018
2.52	0.37	0.296	0.074	0.421	0.544	1.29216152	0.020	0.020
2.8	0.42	0.336	0.084	0.544	0.783	1.43933824	0.029	0.029
3.08	0.45	0.36	0.09	0.466	0.702	1.50643777	0.032	0.032
3.36	0.47	0.376	0.094	0.523	0.793	1.51625239	0.033	0.033
3.64	0.49	0.392	0.098	0.521	0.743	1.42610365	0.029	0.029
3.92	0.53	0.424	0.106	0.561	0.752	1.34046346	0.024	0.024
4.2	0.51	0.408	0.102	0.439	0.653	1.48747153	0.032	0.032
4.48	0.49	0.392	0.098	0.466	0.573	1.22961373	0.017	-
4.76	0.48	0.384	0.096	0.303	0.412	1.35973597	0.025	0.025
5.04	0.47	0.376	0.094	0.349	0.401	1.14899713	0.011	-
5.32	0.47	0.376	0.094	0.244	0.358	1.46721311	0.031	0.031
5.6	0.47	0.376	0.094	0.224	0.318	1.41964286	0.028	0.028
Promedio	0.4095					n Promedio	0.026	0.027
Desviación. Est.	0.08506808					Des. Est	0.008	0.005
						(+)0.018	0.034	
						(-)0.018	0.018	

7.10. Datos procesados de cada día de aforo

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Ángeles León - Paola Pérez
Fecha	12-Nov-22
Hora de Inicio	08:30 A.M.
ID Sección	S1
Coordenadas UTM	N 9694441.682 - E 739362.438
Ancho de sección (m)	7.6
Separación entre verticales (cm)	0.38
Hora de finalización	11:00 AM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	1.09	26	26	0.162	28
0	0	1.09	26	20.8	0.14	28
0	0	1.09	26	15.6	0.09	28
0	0	1.09	26	10.4	0.087	28
0	0	1.09	26	5.2	0	28
0	0	1.09	26	4	0	28
1	0.38	1.13	29	29	0.391	31
1	0.38	1.13	29	23.2	0.425	31
1	0.38	1.13	29	17.4	0.409	31
1	0.38	1.13	29	11.6	0.274	31
1	0.38	1.13	29	5.8	0.241	31
1	0.38	1.13	29	4.2	0.162	31
2	0.76	1.15	31	31	0.381	32
2	0.76	1.15	31	24.8	0.409	32
2	0.76	1.15	31	18.6	0.341	32
2	0.76	1.15	31	12.4	0.272	32
2	0.76	1.15	31	6.2	0.19	32
2	0.76	1.15	31	5	0.156	32
3	1.14	1.15	32	32	0.512	34
3	1.14	1.15	32	25.6	0.493	34
3	1.14	1.15	32	19.2	0.4	34
3	1.14	1.15	32	12.8	0.27	34
3	1.14	1.15	32	6.4	0.241	34
3	1.14	1.15	32	5	0.192	34
4	1.52	1.16	32	32	0.462	35
4	1.52	1.16	32	25.6	0.489	35
4	1.52	1.16	32	19.2	0.442	35
4	1.52	1.16	32	12.8	0.305	35
4	1.52	1.16	32	6.4	0.216	35
4	1.52	1.16	32	4.2	0.194	35
5	1.9	1.14	30	30	0.612	34
5	1.9	1.14	30	24	0.644	34
5	1.9	1.14	30	18	0.586	34
5	1.9	1.14	30	12	0.442	34
5	1.9	1.14	30	6	0.335	34
5	1.9	1.14	30	3	0.216	34
6	2.28	1.18	36	36	0.663	39
6	2.28	1.18	36	28.8	0.627	39
6	2.28	1.18	36	21.6	0.476	39
6	2.28	1.18	36	14.4	0.406	39
6	2.28	1.18	36	7.2	0.403	39
6	2.28	1.18	36	4.2	0.321	39
7	2.66	1.17	35	35	0.623	38
7	2.66	1.17	35	28	0.589	38
7	2.66	1.17	35	21	0.592	38
7	2.66	1.17	35	14	0.425	38
7	2.66	1.17	35	7	0.241	38
7	2.66	1.17	35	3	0.197	38
8	3.04	1.19	36	36	0.672	38
8	3.04	1.19	36	28.8	0.644	38
8	3.04	1.19	36	21.6	0.624	38
8	3.04	1.19	36	14.4	0.504	38
8	3.04	1.19	36	7.2	0.287	38
8	3.04	1.19	36	4	0.211	38

9	3.42	1.23	40	40	0.936	42
9	3.42	1.23	40	32	0.884	42
9	3.42	1.23	40	24	0.61	42
9	3.42	1.23	40	16	0.392	42
9	3.42	1.23	40	8	0.286	42
9	3.42	1.23	40	4	0.201	42
10	3.8	1.27	45	45	0.961	47
10	3.8	1.27	45	36	0.932	47
10	3.8	1.27	45	27	0.677	47
10	3.8	1.27	45	18	0.538	47
10	3.8	1.27	45	9	0.409	47
10	3.8	1.27	45	6	0.35	47
11	4.18	1.3	48	48	1.02	50
11	4.18	1.3	48	38.4	0.953	50
11	4.18	1.3	48	28.8	0.813	50
11	4.18	1.3	48	19.2	0.689	50
11	4.18	1.3	48	9.6	0.428	50
11	4.18	1.3	48	6	0.392	50
12	4.56	1.27	46	46	0.912	48
12	4.56	1.27	46	36.8	0.885	48
12	4.56	1.27	46	27.6	0.702	48
12	4.56	1.27	46	18.4	0.482	48
12	4.56	1.27	46	9.2	0.409	48
12	4.56	1.27	46	6	0.35	48
13	4.94	1.26	45	45	0.812	47
13	4.94	1.26	45	36	0.732	47
13	4.94	1.26	45	27	0.556	47
13	4.94	1.26	45	18	0.391	47
13	4.94	1.26	45	9	0.275	47
13	4.94	1.26	45	6	0.214	47
14	5.32	1.24	40	40	0.83	43
14	5.32	1.24	40	32	0.751	43
14	5.32	1.24	40	24	0.56	43
14	5.32	1.24	40	16	0.389	43
14	5.32	1.24	40	8	0.286	43
14	5.32	1.24	40	5	0.187	43
15	5.7	1.26	40	40	0.75	42
15	5.7	1.26	40	32	0.692	42
15	5.7	1.26	40	24	0.536	42
15	5.7	1.26	40	16	0.439	42
15	5.7	1.26	40	8	0.31	42
15	5.7	1.26	40	6	0.223	42
16	6.08	1.23	39	39	0.701	42
16	6.08	1.23	39	31.2	0.693	42
16	6.08	1.23	39	23.4	0.568	42
16	6.08	1.23	39	15.6	0.483	42
16	6.08	1.23	39	7.8	0.38	42
16	6.08	1.23	39	6	0.223	42
17	6.46	1.2	36	36	0.501	39
17	6.46	1.2	36	28.8	0.562	39
17	6.46	1.2	36	21.6	0.529	39
17	6.46	1.2	36	14.4	0.404	39
17	6.46	1.2	36	7.2	0.343	39
17	6.46	1.2	36	6	0.263	39
18	6.84	1.21	37	37	0.498	39
18	6.84	1.21	37	29.6	0.532	39
18	6.84	1.21	37	22.2	0.472	39
18	6.84	1.21	37	14.8	0.385	39
18	6.84	1.21	37	7.4	0.316	39
18	6.84	1.21	37	6	0.235	39
19	7.22	1.22	37	37	0.443	38
19	7.22	1.22	37	29.6	0.427	38
19	7.22	1.22	37	22.2	0.361	38
19	7.22	1.22	37	14.8	0.309	38
19	7.22	1.22	37	7.4	0.252	38
19	7.22	1.22	37	6	0.213	38
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0

Figura 7.6: Aforos en la sección S1 - día 1

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Valeria Campoverde - Angeles León
Fecha	12-Nov-22
Hora de Inicio	2:00 PM
ID Sección	S2
Coordenadas UTM	E 739244.55, N 9694283.63
Ancho de sección (m)	5.6
Separación entre verticales (m)	0.28
Hora de finalización	5:00 PM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	0.28	1.19	27	27	0.116	26
1	0.28	1.19	27	21.6	0.157	26
1	0.28	1.19	27	16.2	0.143	26
1	0.28	1.19	27	10.8	0.132	26
1	0.28	1.19	27	5.4	0.122	26
1	0.28	1.19	27	4	0.109	26
2	0.56	1.21	29	29	0.121	29
2	0.56	1.21	29	23.2	0.155	29
2	0.56	1.21	29	17.4	0.151	29
2	0.56	1.21	29	11.6	0.149	29
2	0.56	1.21	29	5.8	0.138	29
2	0.56	1.21	29	5	0	29
3	0.84	1.26	35	35	0.255	36
3	0.84	1.26	35	28	0.329	36
3	0.84	1.26	35	21	0.305	36
3	0.84	1.26	35	14	0.272	36
3	0.84	1.26	35	7	0.221	36
3	0.84	1.26	35	4	0.189	36
4	1.12	1.28	38	38	0.106	38
4	1.12	1.28	38	30.4	0.089	38
4	1.12	1.28	38	22.8	0.087	38
4	1.12	1.28	38	15.2	0.084	38
4	1.12	1.28	38	7.6	0.063	38
4	1.12	1.28	38	5	0	38
5	1.4	1.31	31	31	0.378	33
5	1.4	1.31	31	24.8	0.452	33
5	1.4	1.31	31	18.6	0.488	33
5	1.4	1.31	31	12.4	0.395	33
5	1.4	1.31	31	6.2	0.312	33
5	1.4	1.31	31	3	0.236	33
6	1.68	1.28	40	40	0.612	39
6	1.68	1.28	40	32	0.657	39
6	1.68	1.28	40	24	0.589	39
6	1.68	1.28	40	16	0.467	39
6	1.68	1.28	40	8	0.364	39
6	1.68	1.28	40	4	0.311	39
7	1.96	1.2	34	34	0.61	34
7	1.96	1.2	34	27.2	0.778	34
7	1.96	1.2	34	20.4	0.526	34
7	1.96	1.2	34	13.6	0.543	34
7	1.96	1.2	34	6.8	0.381	34
7	1.96	1.2	34	3	0	34
8	2.24	1.13	33	33	0.364	31
8	2.24	1.13	33	26.4	0.578	31
8	2.24	1.13	33	19.8	0.751	31
8	2.24	1.13	33	13.2	0.668	31
8	2.24	1.13	33	6.6	0.532	31
8	2.24	1.13	33	4	0.426	31

9	2.52	1.34	50	50	0.476	50
9	2.52	1.34	50	40	0.758	50
9	2.52	1.34	50	30	0.714	50
9	2.52	1.34	50	20	0.677	50
9	2.52	1.34	50	10	0.512	50
9	2.52	1.34	50	5	0.301	50
10	2.8	1.16	46	46	0.672	44
10	2.8	1.16	46	36.8	0.771	44
10	2.8	1.16	46	27.6	0.802	44
10	2.8	1.16	46	18.4	0.696	44
10	2.8	1.16	46	9.2	0.413	44
10	2.8	1.16	46	6	0.294	44
11	3.08	1.31	50	50	0.539	48
11	3.08	1.31	50	40	0.795	48
11	3.08	1.31	50	30	0.862	48
11	3.08	1.31	50	20	0.802	48
11	3.08	1.31	50	10	0.571	48
11	3.08	1.31	50	4	0.276	48
12	3.36	1.21	53	53	0.529	52
12	3.36	1.21	53	42.4	0.858	52
12	3.36	1.21	53	31.8	0.795	52
12	3.36	1.21	53	21.2	0.662	52
12	3.36	1.21	53	10.6	0.536	52
12	3.36	1.21	53	6	0.397	52
13	3.64	1.33	52	52	0.61	50
13	3.64	1.33	52	41.6	0.879	50
13	3.64	1.33	52	31.2	0.684	50
13	3.64	1.33	52	20.8	0.459	50
13	3.64	1.33	52	10.4	0.347	50
13	3.64	1.33	52	6	0.256	50
14	3.92	1.39	56	56	0.673	54
14	3.92	1.39	56	44.8	0.736	54
14	3.92	1.39	56	33.6	0.815	54
14	3.92	1.39	56	22.4	0.747	54
14	3.92	1.39	56	11.2	0.582	54
14	3.92	1.39	56	6	0.442	54
15	4.2	1.41	56	56	0.502	53
15	4.2	1.41	56	44.8	0.707	53
15	4.2	1.41	56	33.6	0.629	53
15	4.2	1.41	56	22.4	0.558	53
15	4.2	1.41	56	11.2	0.476	53
15	4.2	1.41	56	7	0.372	53
16	4.48	1.36	52	52	0.567	52
16	4.48	1.36	52	41.6	0.623	52
16	4.48	1.36	52	31.2	0.547	52
16	4.48	1.36	52	20.8	0.468	52
16	4.48	1.36	52	10.4	0.372	52
16	4.48	1.36	52	6	0.296	52
17	4.76	1.3	47	47	0.362	46
17	4.76	1.3	47	37.6	0.575	46
17	4.76	1.3	47	28.2	0.458	46
17	4.76	1.3	47	18.8	0.513	46
17	4.76	1.3	47	9.4	0.432	46
17	4.76	1.3	47	6	0.347	46
18	5.04	1.31	47	47	0.358	48
18	5.04	1.31	47	37.6	0.372	48
18	5.04	1.31	47	28.2	0.343	48
18	5.04	1.31	47	18.8	0.306	48
18	5.04	1.31	47	9.4	0.267	48
18	5.04	1.31	47	5	0.208	48
19	5.32	1.28	45	45	0.265	43
19	5.32	1.28	45	36	0.289	43
19	5.32	1.28	45	27	0.237	43
19	5.32	1.28	45	18	0.21	43
19	5.32	1.28	45	9	0.187	43
19	5.32	1.28	45	4	0.163	43
20	5.6	1.29	45	45	0.111	41
20	5.6	1.29	45	36	0.257	41
20	5.6	1.29	45	27	0.25	41
20	5.6	1.29	45	18	0.241	41
20	5.6	1.29	45	9	0.228	41
20	5.6	1.29	45	4	0	41

Figura 7.7: Aforos en la sección S2 - día 1

RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Yurena León - Rosita Contreras
Fecha	18-Nov-22
Hora de Inicio	9:30 AM
ID Sección	S1
Coordenadas UTM	N 9694441.682 - E 739362.438
Ancho de sección (m)	7.6
Separación entre verticales (cm)	0.38
Hora de finalización	12:00 PM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	1.09	22	22	0.157	24
0	0	1.09	22	17.6	0.147	24
0	0	1.09	22	13.2	0.131	24
0	0	1.09	22	8.8	0.09	24
0	0	1.09	22	4.4	0	24
0	0	1.09	22	3	0	24
1	0.38	1.12	24	24	0.383	26
1	0.38	1.12	24	19.2	0.43	26
1	0.38	1.12	24	14.4	0.386	26
1	0.38	1.12	24	9.6	0.34	26
1	0.38	1.12	24	4.8	0.26	26
1	0.38	1.12	24	3	0.134	26
2	0.76	1.17	27	27	0.386	31
2	0.76	1.17	27	21.6	0.367	31
2	0.76	1.17	27	16.2	0.301	31
2	0.76	1.17	27	10.8	0.257	31
2	0.76	1.17	27	5.4	0.241	31
2	0.76	1.17	27	4	0.184	31
3	1.14	1.16	29	29	0.294	33
3	1.14	1.16	29	23.2	0.333	33
3	1.14	1.16	29	17.4	0.373	33
3	1.14	1.16	29	11.6	0.274	33
3	1.14	1.16	29	5.8	0.184	33
3	1.14	1.16	29	4	0.137	33
4	1.52	1.17	30	30	0.392	33
4	1.52	1.17	30	24	0.351	33
4	1.52	1.17	30	18	0.356	33
4	1.52	1.17	30	12	0.217	33
4	1.52	1.17	30	6	0.196	33
4	1.52	1.17	30	4	0.154	33
5	1.9	1.18	30	30	0.406	33
5	1.9	1.18	30	24	0.396	33
5	1.9	1.18	30	18	0.419	33
5	1.9	1.18	30	12	0.392	33
5	1.9	1.18	30	6	0.217	33
5	1.9	1.18	30	4	0.186	33
6	2.28	1.19	34	34	0.517	36
6	2.28	1.19	34	27.2	0.543	36
6	2.28	1.19	34	20.4	0.489	36
6	2.28	1.19	34	13.6	0.425	36
6	2.28	1.19	34	6.8	0.224	36
6	2.28	1.19	34	4	0.176	36
7	2.66	1.2	35	35	0.482	37
7	2.66	1.2	35	28	0.504	37
7	2.66	1.2	35	21	0.572	37
7	2.66	1.2	35	14	0.375	37
7	2.66	1.2	35	7	0.167	37
7	2.66	1.2	35	4	0.152	37
8	3.04	1.18	33	33	0.564	36
8	3.04	1.18	33	26.4	0.593	36
8	3.04	1.18	33	19.8	0.504	36
8	3.04	1.18	33	13.2	0.439	36
8	3.04	1.18	33	6.6	0.186	36
8	3.04	1.18	33	4	0.138	36

9	3.42	1.23	38	38	0.658	40
9	3.42	1.23	38	30.4	0.627	40
9	3.42	1.23	38	22.8	0.593	40
9	3.42	1.23	38	15.2	0.39	40
9	3.42	1.23	38	7.6	0.291	40
9	3.42	1.23	38	4	0.201	40
10	3.8	1.28	41	41	0.728	42
10	3.8	1.28	41	32.8	0.707	42
10	3.8	1.28	41	24.6	0.661	42
10	3.8	1.28	41	16.4	0.56	42
10	3.8	1.28	41	8.2	0.442	42
10	3.8	1.28	41	6	0.371	42
11	4.18	1.3	46	46	0.874	47
11	4.18	1.3	46	36.8	0.901	47
11	4.18	1.3	46	27.6	0.677	47
11	4.18	1.3	46	18.4	0.538	47
11	4.18	1.3	46	9.2	0.409	47
11	4.18	1.3	46	6	0.327	47
12	4.56	1.27	44	44	0.871	47
12	4.56	1.27	44	35.2	0.924	47
12	4.56	1.27	44	26.4	0.712	47
12	4.56	1.27	44	17.6	0.598	47
12	4.56	1.27	44	8.8	0.421	47
12	4.56	1.27	44	6	0.316	47
13	4.94	1.27	41	41	0.744	47
13	4.94	1.27	41	32.8	0.694	47
13	4.94	1.27	41	24.6	0.573	47
13	4.94	1.27	41	16.4	0.423	47
13	4.94	1.27	41	8.2	0.362	47
13	4.94	1.27	41	6	0.31	47
14	5.32	1.26	39	39	0.83	43
14	5.32	1.26	39	31.2	0.751	43
14	5.32	1.26	39	23.4	0.56	43
14	5.32	1.26	39	15.6	0.389	43
14	5.32	1.26	39	7.8	0.286	43
14	5.32	1.26	39	5	0.187	43
15	5.7	1.26	37	37	0.645	42
15	5.7	1.26	37	29.6	0.612	42
15	5.7	1.26	37	22.2	0.483	42
15	5.7	1.26	37	14.8	0.413	42
15	5.7	1.26	37	7.4	0.296	42
15	5.7	1.26	37	6	0.274	42
16	6.08	1.24	35	35	0.536	42
16	6.08	1.24	35	28	0.567	42
16	6.08	1.24	35	21	0.473	42
16	6.08	1.24	35	14	0.411	42
16	6.08	1.24	35	7	0.334	42
16	6.08	1.24	35	6	0.224	42
17	6.46	1.23	33	33	0.433	36
17	6.46	1.23	33	26.4	0.483	36
17	6.46	1.23	33	19.8	0.377	36
17	6.46	1.23	33	13.2	0.276	36
17	6.46	1.23	33	6.6	0.251	36
17	6.46	1.23	33	5	0.193	36
18	6.84	1.21	34	34	0.365	35
18	6.84	1.21	34	27.2	0.423	35
18	6.84	1.21	34	20.4	0.328	35
18	6.84	1.21	34	13.6	0.312	35
18	6.84	1.21	34	6.8	0.263	35
18	6.84	1.21	34	5	0.185	35
19	7.22	1.2	33	33	0.267	35
19	7.22	1.2	33	26.4	0.294	35
19	7.22	1.2	33	19.8	0.283	35
19	7.22	1.2	33	13.2	0.264	35
19	7.22	1.2	33	6.6	0.229	35
19	7.22	1.2	33	6	0.176	35
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0

Figura 7.8: Aforos en la sección S1 - día 2

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Rosita Contreras - Valentín Vélez
Fecha	18-Nov-22
Hora de Inicio	2:00 PM
ID Sección	S2
Coordenadas UTM	E 739244.55, N 9694283.63
Ancho de sección (m)	5.6
Separación entre verticales (m)	0.28
Hora de finalización	5:00 PM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	0.28	0.75	16	16	0.038	18
1	0.28	0.75	16	12.8	0.047	18
1	0.28	0.75	16	9.6	0.035	18
1	0.28	0.75	16	6.4	0	18
1	0.28	0.75	16	3.2	0	18
1	0.28	0.75	16	2	0	18
2	0.56	0.84	25	25	0.123	22
2	0.56	0.84	25	20	0.169	22
2	0.56	0.84	25	15	0.155	22
2	0.56	0.84	25	10	0.153	22
2	0.56	0.84	25	5	0.151	22
2	0.56	0.84	25	4	0.148	22
3	0.84	0.85	26	26	0.167	25
3	0.84	0.85	26	20.8	0.14	25
3	0.84	0.85	26	15.6	0.22	25
3	0.84	0.85	26	10.4	0.11	25
3	0.84	0.85	26	5.2	0.093	25
3	0.84	0.85	26	4	0.08	25
4	1.12	0.87	28	28	0.245	30
4	1.12	0.87	28	22.4	0.308	30
4	1.12	0.87	28	16.8	0.329	30
4	1.12	0.87	28	11.2	0.22	30
4	1.12	0.87	28	5.6	0.19	30
4	1.12	0.87	28	4	0.12	30
5	1.4	0.9	34	34	0.429	32
5	1.4	0.9	34	27.2	0.467	32
5	1.4	0.9	34	20.4	0.517	32
5	1.4	0.9	34	13.6	0.407	32
5	1.4	0.9	34	6.8	0.4	32
5	1.4	0.9	34	5	0.38	32
6	1.68	0.9	36	36	0.442	35
6	1.68	0.9	36	28.8	0.728	35
6	1.68	0.9	36	21.6	0.519	35
6	1.68	0.9	36	14.4	0.439	35
6	1.68	0.9	36	7.2	0.39	35
6	1.68	0.9	36	5	0.36	35
7	1.96	0.92	38	38	0.477	35
7	1.96	0.92	38	30.4	0.488	35
7	1.96	0.92	38	22.8	0.592	35
7	1.96	0.92	38	15.2	0.361	35
7	1.96	0.92	38	7.6	0.237	35
7	1.96	0.92	38	5	0.21	35
8	2.24	0.89	37	37	0.338	36
8	2.24	0.89	37	29.6	0.543	36
8	2.24	0.89	37	22.2	0.706	36
8	2.24	0.89	37	14.8	0.607	36
8	2.24	0.89	37	7.4	0.512	36
8	2.24	0.89	37	5	0.46	36

9	2.52	0.92	39	39	0.274	40
9	2.52	0.92	39	31.2	0.61	40
9	2.52	0.92	39	23.4	0.627	40
9	2.52	0.92	39	15.6	0.439	40
9	2.52	0.92	39	7.8	0.31	40
9	2.52	0.92	39	6	0.25	40
10	2.8	0.93	41	41	0.439	44
10	2.8	0.93	41	32.8	0.644	44
10	2.8	0.93	41	24.6	0.677	44
10	2.8	0.93	41	16.4	0.423	44
10	2.8	0.93	41	8.2	0.31	44
10	2.8	0.93	41	6	0.272	44
11	3.08	0.96	46	46	0.409	50
11	3.08	0.96	46	36.8	0.778	50
11	3.08	0.96	46	27.6	0.741	50
11	3.08	0.96	46	18.4	0.607	50
11	3.08	0.96	46	9.2	0.411	50
11	3.08	0.96	46	8	0.34	50
12	3.36	0.96	47	47	0.553	48
12	3.36	0.96	47	37.6	0.676	48
12	3.36	0.96	47	28.2	0.759	48
12	3.36	0.96	47	18.8	0.56	48
12	3.36	0.96	47	9.4	0.523	48
12	3.36	0.96	47	7	0.48	48
13	3.64	1	49	49	0.543	52
13	3.64	1	49	39.2	0.887	52
13	3.64	1	49	29.4	0.875	52
13	3.64	1	49	19.6	0.745	52
13	3.64	1	49	9.8	0.71	52
13	3.64	1	49	8	0.683	52
14	3.92	1.01	52	52	0.61	55
14	3.92	1.01	52	41.6	0.689	55
14	3.92	1.01	52	31.2	0.728	55
14	3.92	1.01	52	20.8	0.493	55
14	3.92	1.01	52	10.4	0.467	55
14	3.92	1.01	52	8	0.38	55
15	4.2	0.98	49	49	0.442	53
15	4.2	0.98	49	39.2	0.677	53
15	4.2	0.98	49	29.4	0.694	53
15	4.2	0.98	49	19.6	0.571	53
15	4.2	0.98	49	9.8	0.52	53
15	4.2	0.98	49	8	0.47	53
16	4.48	0.96	45	45	0.429	49
16	4.48	0.96	45	36	0.644	49
16	4.48	0.96	45	27	0.58	49
16	4.48	0.96	45	18	0.485	49
16	4.48	0.96	45	9	0.432	49
16	4.48	0.96	45	7	0.353	49
17	4.76	0.99	48	48	0.491	49
17	4.76	0.99	48	38.4	0.528	49
17	4.76	0.99	48	28.8	0.434	49
17	4.76	0.99	48	19.2	0.439	49
17	4.76	0.99	48	9.6	0.423	49
17	4.76	0.99	48	7	0.403	49
18	5.04	0.99	47	47	0.29	49
18	5.04	0.99	47	37.6	0.325	49
18	5.04	0.99	47	28.2	0.327	49
18	5.04	0.99	47	18.8	0.308	49
18	5.04	0.99	47	9.4	0.284	49
18	5.04	0.99	47	7	0.22	49
19	5.32	0.96	45	45	0.256	47
19	5.32	0.96	45	36	0.274	47
19	5.32	0.96	45	27	0.23	47
19	5.32	0.96	45	18	0.21	47
19	5.32	0.96	45	9	0.213	47
19	5.32	0.96	45	7	0.18	47
20	5.6	0.93	43	43	0.205	45
20	5.6	0.93	43	34.4	0.198	45
20	5.6	0.93	43	25.8	0.22	45
20	5.6	0.93	43	17.2	0.184	45
20	5.6	0.93	43	8.6	0.16	45
20	5.6	0.93	43	6	0.12	45

Figura 7.9: Aforos en la sección S2 - día 2

RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS GENERALES

Nombre de aforador	Boris Cabrera - Valentin Vélez
Fecha	19-Nov-22
Hora de Inicio	10:00 AM
ID Sección	S1
Coordenadas UTM	N 9694441.682 - E 739362.438
Ancho de sección (m)	7.6
Separación entre verticales (cm)	0.38
Hora de finalización	1:00 PM

Observaciones

DATOS DE AFORO

No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	1.07	20	20	0.136	22
0	0	1.07	20	16	0.114	22
0	0	1.07	20	12	0.098	22
0	0	1.07	20	8	0	22
0	0	1.07	20	4	0	22
0	0	1.07	20	2	0	22
1	0.38	1.15	27	27	0.416	28
1	0.38	1.15	27	21.6	0.45	28
1	0.38	1.15	27	16.2	0.432	28
1	0.38	1.15	27	10.8	0.375	28
1	0.38	1.15	27	5.4	0.214	28
1	0.38	1.15	27	4	0.177	28
2	0.76	1.16	29	29	0.381	31
2	0.76	1.16	29	23.2	0.392	31
2	0.76	1.16	29	17.4	0.308	31
2	0.76	1.16	29	11.6	0.286	31
2	0.76	1.16	29	5.8	0.197	31
2	0.76	1.16	29	4	0.147	31
3	1.14	1.15	29	29	0.341	32
3	1.14	1.15	29	23.2	0.36	32
3	1.14	1.15	29	17.4	0.332	32
3	1.14	1.15	29	11.6	0.263	32
3	1.14	1.15	29	5.8	0.224	32
3	1.14	1.15	29	4	0.183	32
4	1.52	1.16	30	30	0.361	32
4	1.52	1.16	30	24	0.358	32
4	1.52	1.16	30	18	0.33	32
4	1.52	1.16	30	12	0.3	32
4	1.52	1.16	30	6	0.191	32
4	1.52	1.16	30	4	0.158	32
5	1.9	1.15	30	30	0.507	33
5	1.9	1.15	30	24	0.474	33
5	1.9	1.15	30	18	0.442	33
5	1.9	1.15	30	12	0.42	33
5	1.9	1.15	30	6	0.41	33
5	1.9	1.15	30	3	0.263	33
6	2.28	1.15	30	30	0.466	34
6	2.28	1.15	30	24	0.484	34
6	2.28	1.15	30	18	0.451	34
6	2.28	1.15	30	12	0.318	34
6	2.28	1.15	30	6	0.29	34
6	2.28	1.15	30	4	0.244	34
7	2.66	1.16	32	32	0.461	35
7	2.66	1.16	32	25.6	0.498	35
7	2.66	1.16	32	19.2	0.369	35
7	2.66	1.16	32	12.8	0.32	35
7	2.66	1.16	32	6.4	0.283	35
7	2.66	1.16	32	4	0.229	35
8	3.04	1.17	34	34	0.586	36
8	3.04	1.17	34	27.2	0.543	36
8	3.04	1.17	34	20.4	0.52	36
8	3.04	1.17	34	13.6	0.367	36
8	3.04	1.17	34	6.8	0.314	36
8	3.04	1.17	34	5	0.261	36

9	3.42	1.2	36	36	0.588	38
9	3.42	1.2	36	28.8	0.561	38
9	3.42	1.2	36	21.6	0.526	38
9	3.42	1.2	36	14.4	0.404	38
9	3.42	1.2	36	7.2	0.357	38
9	3.42	1.2	36	5	0.294	38
10	3.8	1.26	43	43	0.574	45
10	3.8	1.26	43	34.4	0.593	45
10	3.8	1.26	43	25.8	0.643	45
10	3.8	1.26	43	17.2	0.628	45
10	3.8	1.26	43	8.6	0.51	45
10	3.8	1.26	43	5	0.385	45
11	4.18	1.28	44	44	0.542	46
11	4.18	1.28	44	35.2	0.604	46
11	4.18	1.28	44	26.4	0.476	46
11	4.18	1.28	44	17.6	0.365	46
11	4.18	1.28	44	8.8	0.308	46
11	4.18	1.28	44	6	0.254	46
12	4.56	1.23	41	41	0.716	44
12	4.56	1.23	41	32.8	0.68	44
12	4.56	1.23	41	24.6	0.577	44
12	4.56	1.23	41	16.4	0.341	44
12	4.56	1.23	41	8.2	0.224	44
12	4.56	1.23	41	6	0.193	44
13	4.94	1.23	39	39	0.622	41
13	4.94	1.23	39	31.2	0.681	41
13	4.94	1.23	39	23.4	0.539	41
13	4.94	1.23	39	15.6	0.461	41
13	4.94	1.23	39	7.8	0.4	41
13	4.94	1.23	39	6	0.334	41
14	5.32	1.23	38	38	0.704	40
14	5.32	1.23	38	30.4	0.692	40
14	5.32	1.23	38	22.8	0.624	40
14	5.32	1.23	38	15.2	0.503	40
14	5.32	1.23	38	7.6	0.334	40
14	5.32	1.23	38	5	0.266	40
15	5.7	1.23	37	37	0.469	39
15	5.7	1.23	37	29.6	0.516	39
15	5.7	1.23	37	22.2	0.358	39
15	5.7	1.23	37	14.8	0.242	39
15	5.7	1.23	37	7.4	0.164	39
15	5.7	1.23	37	5	0.152	39
16	6.08	1.18	32	32	0.317	34
16	6.08	1.18	32	25.6	0.325	34
16	6.08	1.18	32	19.2	0.281	34
16	6.08	1.18	32	12.8	0.264	34
16	6.08	1.18	32	6.4	0.227	34
16	6.08	1.18	32	4	0.175	34
17	6.46	1.21	31	31	0.207	33
17	6.46	1.21	31	24.8	0.237	33
17	6.46	1.21	31	18.6	0.256	33
17	6.46	1.21	31	12.4	0.217	33
17	6.46	1.21	31	6.2	0.183	33
17	6.46	1.21	31	4	0.142	33
18	6.84	1.19	31	31	0.306	33
18	6.84	1.19	31	24.8	0.339	33
18	6.84	1.19	31	18.6	0.325	33
18	6.84	1.19	31	12.4	0.2	33
18	6.84	1.19	31	6.2	0.177	33
18	6.84	1.19	31	4	0.135	33
19	7.22	1.15	27	27	0.134	29
19	7.22	1.15	27	21.6	0.157	29
19	7.22	1.15	27	16.2	0.138	29
19	7.22	1.15	27	10.8	0.112	29
19	7.22	1.15	27	5.4	0.08	29
19	7.22	1.15	27	4	0	29
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0

Figura 7.10: Aforos en la sección S1 - día 3

RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS GENERALES

Nombre de aforador	Ronny Heredia - Valeria Campoverde
Fecha	19-Nov-22
Hora de Inicio	2:30 PM
ID Sección	S2
Coordenadas UTM	E 739244.55, N 9694283.63
Ancho de sección (m)	5.6
Separación entre verticales (m)	0.28
Hora de finalización	5:00 PM

Observaciones:

DATOS DE AFORO

No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	0.28	0.82	20	20	0.036	21
1	0.28	0.82	20	16	0.041	21
1	0.28	0.82	20	12	0.031	21
1	0.28	0.82	20	8	0.029	21
1	0.28	0.82	20	4	0	21
1	0.28	0.82	20	2	0	21
2	0.56	0.89	27	27	0.122	27
2	0.56	0.89	27	21.6	0.102	27
2	0.56	0.89	27	16.2	0.125	27
2	0.56	0.89	27	10.8	0.08	27
2	0.56	0.89	27	5.4	0	27
2	0.56	0.89	27	4	0	27
3	0.84	0.88	27	27	0.152	28
3	0.84	0.88	27	21.6	0.141	28
3	0.84	0.88	27	16.2	0.134	28
3	0.84	0.88	27	10.8	0.09	28
3	0.84	0.88	27	5.4	0.051	28
3	0.84	0.88	27	4	0	28
4	1.12	0.9	30	30	0.157	30
4	1.12	0.9	30	24	0.24	30
4	1.12	0.9	30	18	0.321	30
4	1.12	0.9	30	12	0.257	30
4	1.12	0.9	30	6	0.176	30
4	1.12	0.9	30	3	0.102	30
5	1.4	0.9	31	31	0.233	33
5	1.4	0.9	31	24.8	0.475	33
5	1.4	0.9	31	18.6	0.467	33
5	1.4	0.9	31	12.4	0.459	33
5	1.4	0.9	31	6.2	0.301	33
5	1.4	0.9	31	3	0.12	33
6	1.68	0.92	35	35	0.362	35
6	1.68	0.92	35	28	0.593	35
6	1.68	0.92	35	21	0.468	35
6	1.68	0.92	35	14	0.337	35
6	1.68	0.92	35	7	0.251	35
6	1.68	0.92	35	4	0.143	35
7	1.96	0.93	36	36	0.44	37
7	1.96	0.93	36	28.8	0.521	37
7	1.96	0.93	36	21.6	0.577	37
7	1.96	0.93	36	14.4	0.334	37
7	1.96	0.93	36	7.2	0.203	37
7	1.96	0.93	36	4	0.196	37
8	2.24	0.92	37	37	0.291	38
8	2.24	0.92	37	29.6	0.423	38
8	2.24	0.92	37	22.2	0.574	38
8	2.24	0.92	37	14.8	0.425	38
8	2.24	0.92	37	7.4	0.286	38
8	2.24	0.92	37	5	0.201	38

9	2.52	0.93	38	38	0.291	40
9	2.52	0.93	38	30.4	0.476	40
9	2.52	0.93	38	22.8	0.519	40
9	2.52	0.93	38	15.2	0.486	40
9	2.52	0.93	38	7.6	0.287	40
9	2.52	0.93	38	4	0.214	40
10	2.8	0.99	45	45	0.6	46
10	2.8	0.99	45	36	0.603	46
10	2.8	0.99	45	27	0.752	46
10	2.8	0.99	45	18	0.562	46
10	2.8	0.99	45	9	0.381	46
10	2.8	0.99	45	6	0.251	46
11	3.08	0.98	46	46	0.453	47
11	3.08	0.98	46	36.8	0.572	47
11	3.08	0.98	46	27.6	0.653	47
11	3.08	0.98	46	18.4	0.543	47
11	3.08	0.98	46	9.2	0.465	47
11	3.08	0.98	46	5	0.262	47
12	3.36	0.99	48	48	0.711	50
12	3.36	0.99	48	38.4	0.694	50
12	3.36	0.99	48	28.8	0.661	50
12	3.36	0.99	48	19.2	0.425	50
12	3.36	0.99	48	9.6	0.365	50
12	3.36	0.99	48	6	0.279	50
13	3.64	1	48	48	0.542	51
13	3.64	1	48	38.4	0.687	51
13	3.64	1	48	28.8	0.739	51
13	3.64	1	48	19.2	0.606	51
13	3.64	1	48	9.6	0.487	51
13	3.64	1	48	6	0.313	51
14	3.92	1.01	49	49	0.52	52
14	3.92	1.01	49	39.2	0.553	52
14	3.92	1.01	49	29.4	0.61	52
14	3.92	1.01	49	19.6	0.459	52
14	3.92	1.01	49	9.8	0.364	52
14	3.92	1.01	49	6	0.294	52
15	4.2	0.98	47	47	0.419	50
15	4.2	0.98	47	37.6	0.603	50
15	4.2	0.98	47	28.2	0.525	50
15	4.2	0.98	47	18.8	0.442	50
15	4.2	0.98	47	9.4	0.321	50
15	4.2	0.98	47	5	0.243	50
16	4.48	0.99	45	45	0.425	49
16	4.48	0.99	45	36	0.493	49
16	4.48	0.99	45	27	0.475	49
16	4.48	0.99	45	18	0.5	49
16	4.48	0.99	45	9	0.392	49
16	4.48	0.99	45	5	0.221	49
17	4.76	0.98	45	45	0.321	49
17	4.76	0.98	45	36	0.388	49
17	4.76	0.98	45	27	0.362	49
17	4.76	0.98	45	18	0.425	49
17	4.76	0.98	45	9	0.315	49
17	4.76	0.98	45	5	0.246	49
18	5.04	0.94	41	41	0.325	46
18	5.04	0.94	41	32.8	0.375	46
18	5.04	0.94	41	24.6	0.356	46
18	5.04	0.94	41	16.4	0.389	46
18	5.04	0.94	41	8.2	0.3	46
18	5.04	0.94	41	5	0.234	46
19	5.32	0.96	44	44	0.273	46
19	5.32	0.96	44	35.2	0.257	46
19	5.32	0.96	44	26.4	0.222	46
19	5.32	0.96	44	17.6	0.199	46
19	5.32	0.96	44	8.8	0.141	46
19	5.32	0.96	44	5	0.113	46
20	5.6	0.94	42	42	0.27	44
20	5.6	0.94	42	33.6	0.232	44
20	5.6	0.94	42	25.2	0.16	44
20	5.6	0.94	42	16.8	0.141	44
20	5.6	0.94	42	8.4	0.106	44
20	5.6	0.94	42	5	0.08	44

Figura 7.11: Aforos en la sección S2 - día 3

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Ronny Heredia - Paola Pérez
Fecha	25-Nov-22
Hora de Inicio	2:30 PM
ID Sección	S1
Coordenadas UTM	N 9694441.682 - E 739362.438
Ancho de sección (m)	7.6
Separación entre verticales (cm)	0.38
Hora de finalización	5:00 PM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	1.07	21	21	0.127	23
0	0	1.07	21	16.8	0.108	23
0	0	1.07	21	12.6	0.081	23
0	0	1.07	21	8.4	0	23
0	0	1.07	21	4.2	0	23
0	0	1.07	21	4	0	23
1	0.38	1.12	25	25	0.331	27
1	0.38	1.12	25	20	0.366	27
1	0.38	1.12	25	15	0.274	27
1	0.38	1.12	25	10	0.239	27
1	0.38	1.12	25	5	0.187	27
1	0.38	1.12	25	4	0.124	27
2	0.76	1.15	28	28	0.377	30
2	0.76	1.15	28	22.4	0.413	30
2	0.76	1.15	28	16.8	0.318	30
2	0.76	1.15	28	11.2	0.254	30
2	0.76	1.15	28	5.6	0.216	30
2	0.76	1.15	28	4	0.174	30
3	1.14	1.15	28	28	0.368	30
3	1.14	1.15	28	22.4	0.396	30
3	1.14	1.15	28	16.8	0.341	30
3	1.14	1.15	28	11.2	0.254	30
3	1.14	1.15	28	5.6	0.239	30
3	1.14	1.15	28	4	0.162	30
4	1.52	1.16	29	29	0.406	31
4	1.52	1.16	29	23.2	0.417	31
4	1.52	1.16	29	17.4	0.371	31
4	1.52	1.16	29	11.6	0.283	31
4	1.52	1.16	29	5.8	0.226	31
4	1.52	1.16	29	4	0.174	31
5	1.9	1.15	29	29	0.443	32
5	1.9	1.15	29	23.2	0.458	32
5	1.9	1.15	29	17.4	0.413	32
5	1.9	1.15	29	11.6	0.388	32
5	1.9	1.15	29	5.8	0.371	32
5	1.9	1.15	29	3	0.283	32
6	2.28	1.16	29	29	0.483	32
6	2.28	1.16	29	23.2	0.502	32
6	2.28	1.16	29	17.4	0.472	32
6	2.28	1.16	29	11.6	0.388	32
6	2.28	1.16	29	5.8	0.333	32
6	2.28	1.16	29	4	0.281	32
7	2.66	1.17	30	30	0.508	33
7	2.66	1.17	30	24	0.524	33
7	2.66	1.17	30	18	0.442	33
7	2.66	1.17	30	12	0.406	33
7	2.66	1.17	30	6	0.347	33
7	2.66	1.17	30	4	0.311	33
8	3.04	1.18	31	31	0.533	34
8	3.04	1.18	31	24.8	0.557	34
8	3.04	1.18	31	18.6	0.514	34
8	3.04	1.18	31	12.4	0.452	34
8	3.04	1.18	31	6.2	0.386	34
8	3.04	1.18	31	5	0.291	34

9	3.42	1.22	36	36	0.601	38
9	3.42	1.22	36	28.8	0.623	38
9	3.42	1.22	36	21.6	0.583	38
9	3.42	1.22	36	14.4	0.493	38
9	3.42	1.22	36	7.2	0.416	38
9	3.42	1.22	36	5	0.273	38
10	3.8	1.25	40	40	0.701	43
10	3.8	1.25	40	32	0.692	43
10	3.8	1.25	40	24	0.623	43
10	3.8	1.25	40	16	0.579	43
10	3.8	1.25	40	8	0.493	43
10	3.8	1.25	40	5	0.391	43
11	4.18	1.29	44	44	0.652	47
11	4.18	1.29	44	35.2	0.682	47
11	4.18	1.29	44	26.4	0.547	47
11	4.18	1.29	44	17.6	0.399	47
11	4.18	1.29	44	8.8	0.335	47
11	4.18	1.29	44	6	0.274	47
12	4.56	1.25	41	41	0.632	44
12	4.56	1.25	41	32.8	0.674	44
12	4.56	1.25	41	24.6	0.601	44
12	4.56	1.25	41	16.4	0.433	44
12	4.56	1.25	41	8.2	0.327	44
12	4.56	1.25	41	6	0.268	44
13	4.94	1.24	38	38	0.648	41
13	4.94	1.24	38	30.4	0.672	41
13	4.94	1.24	38	22.8	0.573	41
13	4.94	1.24	38	15.2	0.443	41
13	4.94	1.24	38	7.6	0.413	41
13	4.94	1.24	38	6	0.317	41
14	5.32	1.24	37	37	0.675	40
14	5.32	1.24	37	29.6	0.656	40
14	5.32	1.24	37	22.2	0.572	40
14	5.32	1.24	37	14.8	0.493	40
14	5.32	1.24	37	7.4	0.368	40
14	5.32	1.24	37	5	0.284	40
15	5.7	1.23	35	35	0.484	38
15	5.7	1.23	35	28	0.538	38
15	5.7	1.23	35	21	0.413	38
15	5.7	1.23	35	14	0.366	38
15	5.7	1.23	35	7	0.284	38
15	5.7	1.23	35	5	0.253	38
16	6.08	1.21	32	32	0.323	36
16	6.08	1.21	32	25.6	0.347	36
16	6.08	1.21	32	19.2	0.303	36
16	6.08	1.21	32	12.8	0.288	36
16	6.08	1.21	32	6.4	0.243	36
16	6.08	1.21	32	4	0.206	36
17	6.46	1.2	29	29	0.247	33
17	6.46	1.2	29	23.2	0.261	33
17	6.46	1.2	29	17.4	0.223	33
17	6.46	1.2	29	11.6	0.194	33
17	6.46	1.2	29	5.8	0.186	33
17	6.46	1.2	29	4	0.161	33
18	6.84	1.19	29	29	0.254	32
18	6.84	1.19	29	23.2	0.296	32
18	6.84	1.19	29	17.4	0.241	32
18	6.84	1.19	29	11.6	0.234	32
18	6.84	1.19	29	5.8	0.193	32
18	6.84	1.19	29	4	0.174	32
19	7.22	1.17	28	28	0.184	31
19	7.22	1.17	28	22.4	0.211	31
19	7.22	1.17	28	16.8	0.172	31
19	7.22	1.17	28	11.2	0.143	31
19	7.22	1.17	28	5.6	0.141	31
19	7.22	1.17	28	4	0.102	31
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0

Figura 7.12: Aforos en la sección S1 - día 4

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Valentin Vélez - Yurena León
Fecha	25-Nov-22
Hora de Inicio	9:00 AM
ID Sección	S2
Coordenadas UTM	E 739244.55, N 9694283.63
Ancho de sección (m)	5.6
Separación entre verticales (m)	0.28
Hora de finalización	11:30 AM

Observaciones:

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	0.28	0.89	23	23	0.112	25
1	0.28	0.89	23	18.4	0.132	25
1	0.28	0.89	23	13.8	0.102	25
1	0.28	0.89	23	9.2	0.085	25
1	0.28	0.89	23	4.6	0	25
1	0.28	0.89	23	2	0	25
2	0.56	0.93	27	27	0.164	29
2	0.56	0.93	27	21.6	0.114	29
2	0.56	0.93	27	16.2	0.142	29
2	0.56	0.93	27	10.8	0.107	29
2	0.56	0.93	27	5.4	0.083	29
2	0.56	0.93	27	4	0	29
3	0.84	0.94	28	28	0.173	29
3	0.84	0.94	28	22.4	0.163	29
3	0.84	0.94	28	16.8	0.157	29
3	0.84	0.94	28	11.2	0.112	29
3	0.84	0.94	28	5.6	0.097	29
3	0.84	0.94	28	4	0.086	29
4	1.12	0.95	33	33	0.214	35
4	1.12	0.95	33	26.4	0.336	35
4	1.12	0.95	33	19.8	0.388	35
4	1.12	0.95	33	13.2	0.297	35
4	1.12	0.95	33	6.6	0.253	35
4	1.12	0.95	33	3	0.173	35
5	1.4	0.95	34	34	0.336	33
5	1.4	0.95	34	27.2	0.457	33
5	1.4	0.95	34	20.4	0.437	33
5	1.4	0.95	34	13.6	0.381	33
5	1.4	0.95	34	6.8	0.332	33
5	1.4	0.95	34	3	0	33
6	1.68	0.94	34	34	0.421	36
6	1.68	0.94	34	27.2	0.576	36
6	1.68	0.94	34	20.4	0.518	36
6	1.68	0.94	34	13.6	0.426	36
6	1.68	0.94	34	6.8	0.341	36
6	1.68	0.94	34	4	0.211	36
7	1.96	0.96	38	38	0.376	39
7	1.96	0.96	38	30.4	0.443	39
7	1.96	0.96	38	22.8	0.613	39
7	1.96	0.96	38	15.2	0.412	39
7	1.96	0.96	38	7.6	0.354	39
7	1.96	0.96	38	4	0.241	39
8	2.24	0.95	38	38	0.461	40
8	2.24	0.95	38	30.4	0.574	40
8	2.24	0.95	38	22.8	0.632	40
8	2.24	0.95	38	15.2	0.557	40
8	2.24	0.95	38	7.6	0.419	40
8	2.24	0.95	38	5	0.274	40

9	2.52	0.96	40	40	0.437	42
9	2.52	0.96	40	32	0.518	42
9	2.52	0.96	40	24	0.622	42
9	2.52	0.96	40	16	0.527	42
9	2.52	0.96	40	8	0.386	42
9	2.52	0.96	40	4	0.266	42
10	2.8	1.04	45	45	0.671	47
10	2.8	1.04	45	36	0.701	47
10	2.8	1.04	45	27	0.821	47
10	2.8	1.04	45	18	0.668	47
10	2.8	1.04	45	9	0.428	47
10	2.8	1.04	45	6	0.351	47
11	3.08	1.03	48	48	0.512	50
11	3.08	1.03	48	38.4	0.679	50
11	3.08	1.03	48	28.8	0.743	50
11	3.08	1.03	48	19.2	0.642	50
11	3.08	1.03	48	9.6	0.433	50
11	3.08	1.03	48	5	0.321	50
12	3.36	1.04	49	49	0.685	50
12	3.36	1.04	49	39.2	0.734	50
12	3.36	1.04	49	29.4	0.785	50
12	3.36	1.04	49	19.6	0.614	50
12	3.36	1.04	49	9.8	0.442	50
12	3.36	1.04	49	6	0.374	50
13	3.64	1.06	51	51	0.623	52
13	3.64	1.06	51	40.8	0.692	52
13	3.64	1.06	51	30.6	0.804	52
13	3.64	1.06	51	20.4	0.641	52
13	3.64	1.06	51	10.2	0.462	52
13	3.64	1.06	51	6	0.356	52
14	3.92	1.07	52	52	0.643	53
14	3.92	1.07	52	41.6	0.712	53
14	3.92	1.07	52	31.2	0.793	53
14	3.92	1.07	52	20.8	0.613	53
14	3.92	1.07	52	10.4	0.451	53
14	3.92	1.07	52	6	0.375	53
15	4.2	1.03	50	50	0.52	52
15	4.2	1.03	50	40	0.673	52
15	4.2	1.03	50	30	0.612	52
15	4.2	1.03	50	20	0.483	52
15	4.2	1.03	50	10	0.384	52
15	4.2	1.03	50	5	0.283	52
16	4.48	1.01	47	47	0.47	49
16	4.48	1.01	47	37.6	0.554	49
16	4.48	1.01	47	28.2	0.572	49
16	4.48	1.01	47	18.8	0.473	49
16	4.48	1.01	47	9.4	0.385	49
16	4.48	1.01	47	5	0.301	49
17	4.76	1	47	47	0.354	49
17	4.76	1	47	37.6	0.401	49
17	4.76	1	47	28.2	0.423	49
17	4.76	1	47	18.8	0.327	49
17	4.76	1	47	9.4	0.264	49
17	4.76	1	47	5	0.227	49
18	5.04	0.95	45	45	0.332	47
18	5.04	0.95	45	36	0.364	47
18	5.04	0.95	45	27	0.384	47
18	5.04	0.95	45	18	0.427	47
18	5.04	0.95	45	9	0.313	47
18	5.04	0.95	45	5	0.256	47
19	5.32	0.96	46	46	0.332	48
19	5.32	0.96	46	36.8	0.354	48
19	5.32	0.96	46	27.6	0.318	48
19	5.32	0.96	46	18.4	0.264	48
19	5.32	0.96	46	9.2	0.225	48
19	5.32	0.96	46	5	0.193	48
20	5.6	0.95	45	45	0.281	46
20	5.6	0.95	45	36	0.304	46
20	5.6	0.95	45	27	0.251	46
20	5.6	0.95	45	18	0.238	46
20	5.6	0.95	45	9	0.195	46
20	5.6	0.95	45	5	0.134	46

Figura 7.13: Aforos en la sección S2 - día 4

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Efrén González - Yurena León
Fecha	30-Nov-22
Hora de Inicio	2:00 PM
ID Sección	S1
Coordenadas UTM	N 9694441.682 - E 739362.438
Ancho de sección (m)	7.6
Separación entre verticales (cm)	0.38
Hora de finalización	5:00 PM

Observaciones

DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	1.08	21	21	0.187	23
0	0	1.08	21	16.8	0.239	23
0	0	1.08	21	12.6	0.143	23
0	0	1.08	21	8.4	0.112	23
0	0	1.08	21	4.2	0.082	23
0	0	1.08	21	4	0	23
1	0.38	1.1	23	23	0.274	25
1	0.38	1.1	23	18.4	0.314	25
1	0.38	1.1	23	13.8	0.266	25
1	0.38	1.1	23	9.2	0.245	25
1	0.38	1.1	23	4.6	0.228	25
1	0.38	1.1	23	4	0.175	25
2	0.76	1.13	26	26	0.263	27
2	0.76	1.13	26	20.8	0.287	27
2	0.76	1.13	26	15.6	0.238	27
2	0.76	1.13	26	10.4	0.213	27
2	0.76	1.13	26	5.2	0.194	27
2	0.76	1.13	26	4	0.124	27
3	1.14	1.13	28	28	0.287	30
3	1.14	1.13	28	22.4	0.306	30
3	1.14	1.13	28	16.8	0.263	30
3	1.14	1.13	28	11.2	0.227	30
3	1.14	1.13	28	5.6	0.187	30
3	1.14	1.13	28	4	0.162	30
4	1.52	1.14	29	29	0.341	31
4	1.52	1.14	29	23.2	0.323	31
4	1.52	1.14	29	17.4	0.277	31
4	1.52	1.14	29	11.6	0.245	31
4	1.52	1.14	29	5.8	0.226	31
4	1.52	1.14	29	4	0.188	31
5	1.9	1.15	29	29	0.386	32
5	1.9	1.15	29	23.2	0.437	32
5	1.9	1.15	29	17.4	0.403	32
5	1.9	1.15	29	11.6	0.347	32
5	1.9	1.15	29	5.8	0.283	32
5	1.9	1.15	29	3	0.22	32
6	2.28	1.16	31	31	0.466	34
6	2.28	1.16	31	24.8	0.484	34
6	2.28	1.16	31	18.6	0.451	34
6	2.28	1.16	31	12.4	0.318	34
6	2.28	1.16	31	6.2	0.29	34
6	2.28	1.16	31	4	0.244	34
7	2.66	1.18	32	32	0.463	35
7	2.66	1.18	32	25.6	0.482	35
7	2.66	1.18	32	19.2	0.41	35
7	2.66	1.18	32	12.8	0.366	35
7	2.66	1.18	32	6.4	0.308	35
7	2.66	1.18	32	4	0.243	35
8	3.04	1.18	34	34	0.566	36
8	3.04	1.18	34	27.2	0.572	36
8	3.04	1.18	34	20.4	0.516	36
8	3.04	1.18	34	13.6	0.433	36
8	3.04	1.18	34	6.8	0.347	36
8	3.04	1.18	34	5	0.283	36

9	3.42	1.23	38	38	0.618	40
9	3.42	1.23	38	30.4	0.642	40
9	3.42	1.23	38	22.8	0.596	40
9	3.42	1.23	38	15.2	0.44	40
9	3.42	1.23	38	7.6	0.363	40
9	3.42	1.23	38	5	0.302	40
10	3.8	1.27	42	42	0.733	44
10	3.8	1.27	42	33.6	0.751	44
10	3.8	1.27	42	25.2	0.675	44
10	3.8	1.27	42	16.8	0.547	44
10	3.8	1.27	42	8.4	0.421	44
10	3.8	1.27	42	5	0.293	44
11	4.18	1.29	45	45	0.842	47
11	4.18	1.29	45	36	0.812	47
11	4.18	1.29	45	27	0.798	47
11	4.18	1.29	45	18	0.643	47
11	4.18	1.29	45	9	0.427	47
11	4.18	1.29	45	6	0.301	47
12	4.56	1.26	43	43	0.813	45
12	4.56	1.26	43	34.4	0.806	45
12	4.56	1.26	43	25.8	0.753	45
12	4.56	1.26	43	17.2	0.657	45
12	4.56	1.26	43	8.6	0.483	45
12	4.56	1.26	43	6	0.336	45
13	4.94	1.25	41	41	0.701	44
13	4.94	1.25	41	32.8	0.735	44
13	4.94	1.25	41	24.6	0.684	44
13	4.94	1.25	41	16.4	0.613	44
13	4.94	1.25	41	8.2	0.482	44
13	4.94	1.25	41	6	0.324	44
14	5.32	1.24	38	38	0.68	41
14	5.32	1.24	38	30.4	0.653	41
14	5.32	1.24	38	22.8	0.584	41
14	5.32	1.24	38	15.2	0.506	41
14	5.32	1.24	38	7.6	0.387	41
14	5.32	1.24	38	5	0.281	41
15	5.7	1.24	36	36	0.493	39
15	5.7	1.24	36	28.8	0.527	39
15	5.7	1.24	36	21.6	0.468	39
15	5.7	1.24	36	14.4	0.396	39
15	5.7	1.24	36	7.2	0.274	39
15	5.7	1.24	36	5	0.201	39
16	6.08	1.23	34	34	0.418	36
16	6.08	1.23	34	27.2	0.431	36
16	6.08	1.23	34	20.4	0.386	36
16	6.08	1.23	34	13.6	0.311	36
16	6.08	1.23	34	6.8	0.268	36
16	6.08	1.23	34	4	0.194	36
17	6.46	1.22	32	32	0.337	34
17	6.46	1.22	32	25.6	0.364	34
17	6.46	1.22	32	19.2	0.326	34
17	6.46	1.22	32	12.8	0.274	34
17	6.46	1.22	32	6.4	0.213	34
17	6.46	1.22	32	4	0.186	34
18	6.84	1.2	32	32	0.283	33
18	6.84	1.2	32	25.6	0.317	33
18	6.84	1.2	32	19.2	0.302	33
18	6.84	1.2	32	12.8	0.243	33
18	6.84	1.2	32	6.4	0.218	33
18	6.84	1.2	32	4	0.177	33
19	7.22	1.18	31	31	0.221	32
19	7.22	1.18	31	24.8	0.247	32
19	7.22	1.18	31	18.6	0.219	32
19	7.22	1.18	31	12.4	0.176	32
19	7.22	1.18	31	6.2	0.143	32
19	7.22	1.18	31	4	0	32
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0
20	7.6	0	0	0	0	0

Figura 7.14: Aforos en la sección S1 - día 5

RECOLECCIÓN DE DATOS	
DATOS GENERALES	
Nombre de aforador	Efren González - Boris Cabrera
Fecha	30-Nov-22
Hora de Inicio	8:00 AM
ID Sección	S2
Coordenadas UTM	E 739244.55, N 9694283.63
Ancho de sección (m)	5.6
Separación entre verticales (m)	0.28
Hora de finalización	11:00 AM

Observaciones:

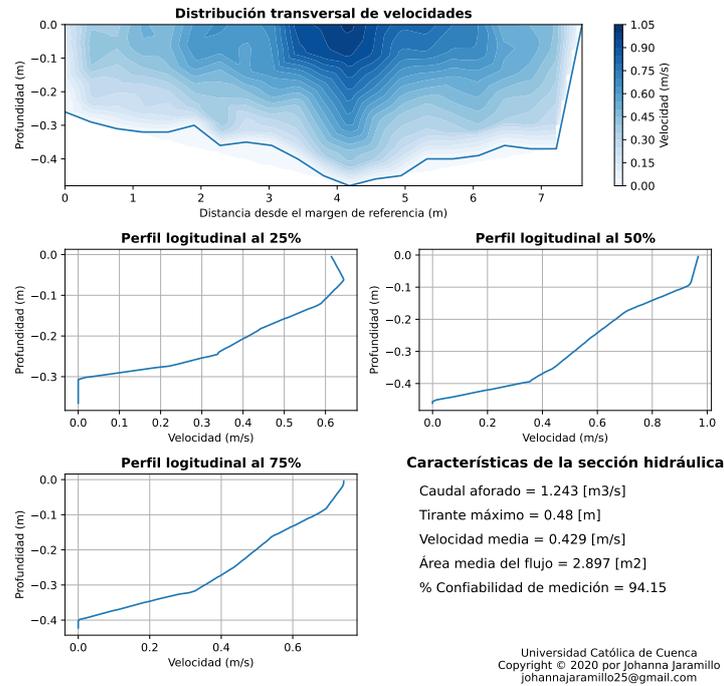
DATOS DE AFORO						
No. Vertical	Distancia horizontal del margen derecho (m)	Profundidad total del cauce (m)	Nivel de agua inicio (cm)	Profundidad de observación de velocidad desde el fondo del cauce (cm)	Velocidad (m/s)	Nivel de agua final (cm)
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
1	0.28	0.94	24	24	0.134	25
1	0.28	0.94	24	19.2	0.161	25
1	0.28	0.94	24	14.4	0.134	25
1	0.28	0.94	24	9.6	0.112	25
1	0.28	0.94	24	4.8	0.094	25
1	0.28	0.94	24	2	0	25
2	0.56	0.97	27	27	0.185	29
2	0.56	0.97	27	21.6	0.173	29
2	0.56	0.97	27	16.2	0.152	29
2	0.56	0.97	27	10.8	0.142	29
2	0.56	0.97	27	5.4	0.13	29
2	0.56	0.97	27	4	0.101	29
3	0.84	0.98	30	30	0.243	28
3	0.84	0.98	30	24	0.264	28
3	0.84	0.98	30	18	0.229	28
3	0.84	0.98	30	12	0.186	28
3	0.84	0.98	30	6	0.166	28
3	0.84	0.98	30	4	0.136	28
4	1.12	0.99	34	34	0.318	30
4	1.12	0.99	34	27.2	0.362	30
4	1.12	0.99	34	20.4	0.347	30
4	1.12	0.99	34	13.6	0.293	30
4	1.12	0.99	34	6.8	0.284	30
4	1.12	0.99	34	3	0.211	30
5	1.4	0.99	35	35	0.351	33
5	1.4	0.99	35	28	0.461	33
5	1.4	0.99	35	21	0.437	33
5	1.4	0.99	35	14	0.381	33
5	1.4	0.99	35	7	0.332	33
5	1.4	0.99	35	3	0.241	33
6	1.68	0.98	35	35	0.445	35
6	1.68	0.98	35	28	0.612	35
6	1.68	0.98	35	21	0.543	35
6	1.68	0.98	35	14	0.457	35
6	1.68	0.98	35	7	0.363	35
6	1.68	0.98	35	4	0.251	35
7	1.96	0.99	36	36	0.412	37
7	1.96	0.99	36	28.8	0.483	37
7	1.96	0.99	36	21.6	0.597	37
7	1.96	0.99	36	14.4	0.467	37
7	1.96	0.99	36	7.2	0.393	37
7	1.96	0.99	36	4	0.273	37
8	2.24	0.99	36	36	0.493	38
8	2.24	0.99	36	28.8	0.552	38
8	2.24	0.99	36	21.6	0.663	38
8	2.24	0.99	36	14.4	0.545	38
8	2.24	0.99	36	7.2	0.436	38
8	2.24	0.99	36	5	0.299	38

9	2.52	0.98	37	37	0.473	40
9	2.52	0.98	37	29.6	0.544	40
9	2.52	0.98	37	22.2	0.672	40
9	2.52	0.98	37	14.8	0.538	40
9	2.52	0.98	37	7.4	0.421	40
9	2.52	0.98	37	4	0.288	40
10	2.8	1.04	42	42	0.642	46
10	2.8	1.04	42	33.6	0.783	46
10	2.8	1.04	42	25.2	0.824	46
10	2.8	1.04	42	16.8	0.736	46
10	2.8	1.04	42	8.4	0.544	46
10	2.8	1.04	42	6	0.334	46
11	3.08	1.05	45	45	0.562	47
11	3.08	1.05	45	36	0.702	47
11	3.08	1.05	45	27	0.784	47
11	3.08	1.05	45	18	0.664	47
11	3.08	1.05	45	9	0.466	47
11	3.08	1.05	45	5	0.342	47
12	3.36	1.05	47	47	0.723	50
12	3.36	1.05	47	37.6	0.793	50
12	3.36	1.05	47	28.2	0.862	50
12	3.36	1.05	47	18.8	0.66	50
12	3.36	1.05	47	9.4	0.523	50
12	3.36	1.05	47	6	0.412	50
13	3.64	1.07	49	49	0.685	51
13	3.64	1.07	49	39.2	0.743	51
13	3.64	1.07	49	29.4	0.855	51
13	3.64	1.07	49	19.6	0.693	51
13	3.64	1.07	49	9.8	0.521	51
13	3.64	1.07	49	6	0.34	51
14	3.92	1.11	53	53	0.692	52
14	3.92	1.11	53	42.4	0.752	52
14	3.92	1.11	53	31.8	0.844	52
14	3.92	1.11	53	21.2	0.672	52
14	3.92	1.11	53	10.6	0.561	52
14	3.92	1.11	53	6	0.423	52
15	4.2	1.09	51	51	0.547	50
15	4.2	1.09	51	40.8	0.653	50
15	4.2	1.09	51	30.6	0.683	50
15	4.2	1.09	51	20.4	0.511	50
15	4.2	1.09	51	10.2	0.439	50
15	4.2	1.09	51	5	0.303	50
16	4.48	1.07	49	49	0.522	49
16	4.48	1.07	49	39.2	0.573	49
16	4.48	1.07	49	29.4	0.618	49
16	4.48	1.07	49	19.6	0.518	49
16	4.48	1.07	49	9.8	0.466	49
16	4.48	1.07	49	5	0.311	49
17	4.76	1.06	48	48	0.363	49
17	4.76	1.06	48	38.4	0.412	49
17	4.76	1.06	48	28.8	0.458	49
17	4.76	1.06	48	19.2	0.356	49
17	4.76	1.06	48	9.6	0.303	49
17	4.76	1.06	48	5	0.244	49
18	5.04	1.05	47	47	0.368	46
18	5.04	1.05	47	37.6	0.401	46
18	5.04	1.05	47	28.2	0.411	46
18	5.04	1.05	47	18.8	0.447	46
18	5.04	1.05	47	9.4	0.349	46
18	5.04	1.05	47	5	0.251	46
19	5.32	1.04	47	47	0.324	46
19	5.32	1.04	47	37.6	0.358	46
19	5.32	1.04	47	28.2	0.325	46
19	5.32	1.04	47	18.8	0.254	46
19	5.32	1.04	47	9.4	0.244	46
19	5.32	1.04	47	5	0.21	46
20	5.6	1.02	47	47	0.274	44
20	5.6	1.02	47	37.6	0.318	44
20	5.6	1.02	47	28.2	0.266	44
20	5.6	1.02	47	18.8	0.241	44
20	5.6	1.02	47	9.4	0.224	44
20	5.6	1.02	47	5	0.182	44

Figura 7.15: Aforos en la sección S2 - día 5

7.11. Informes de resultados de estimación de caudal en el río Burgay - sector La Concordia

Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
 Sección: S1
 Fecha: 12/11/2022
 Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez



Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
 Sección: S2
 Fecha: 12/11/2022
 Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez

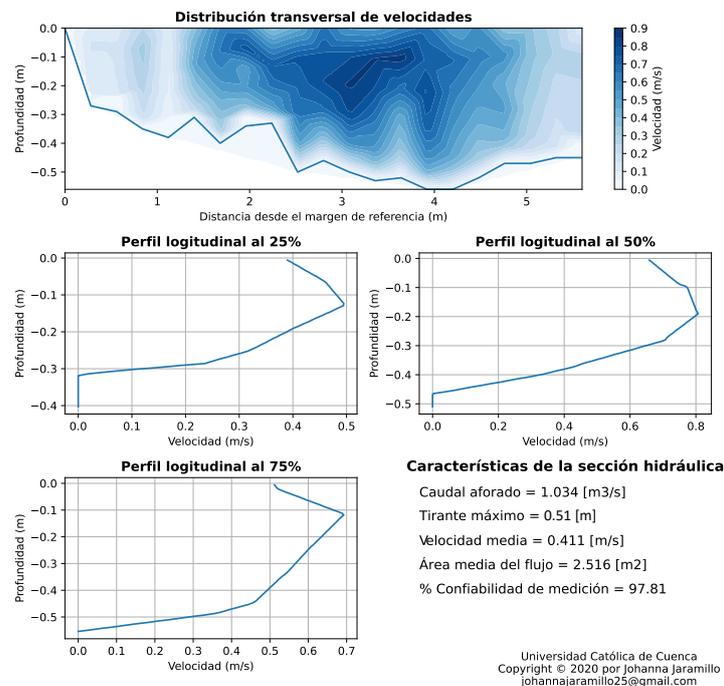
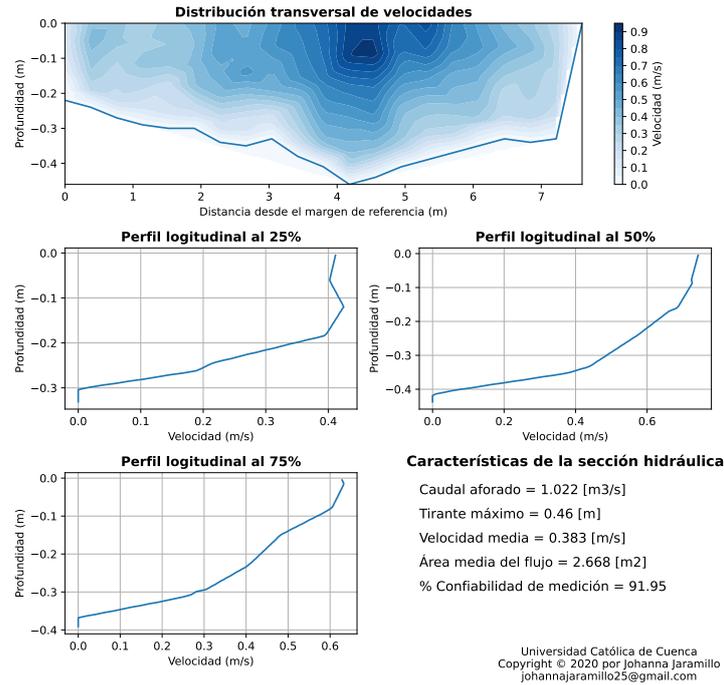


Figura 7.16: Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 12/11/2022

Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S1
Fecha: 18/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez



Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S2
Fecha: 18/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez

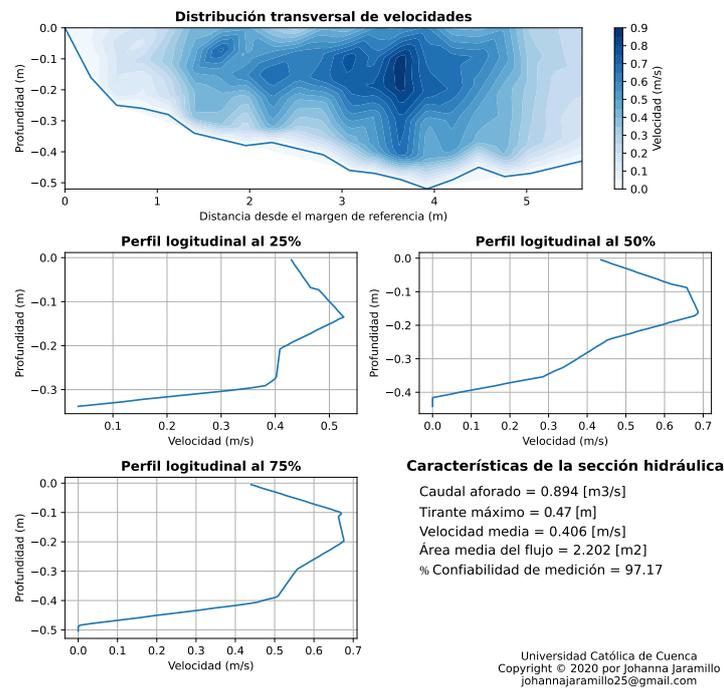
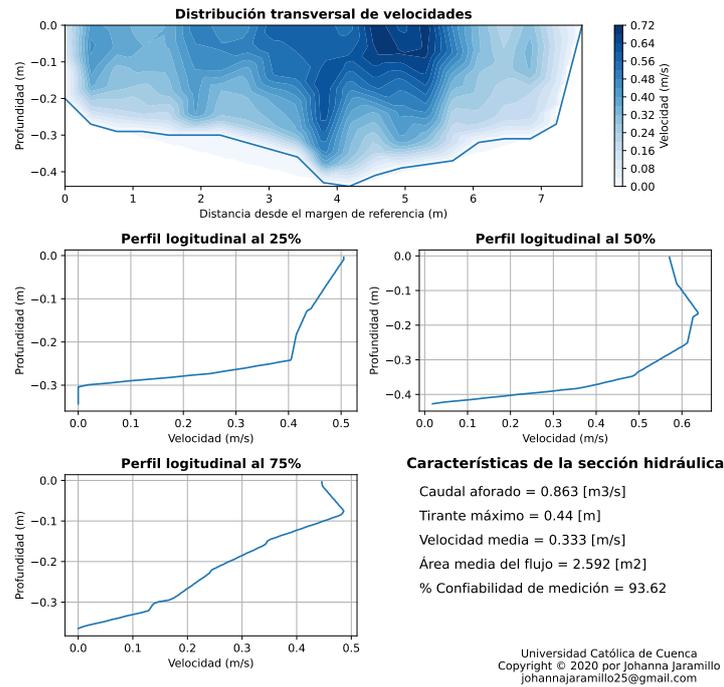


Figura 7.17: Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 18/11/2022

Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S1
Fecha: 19/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez



Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S2
Fecha: 19/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez

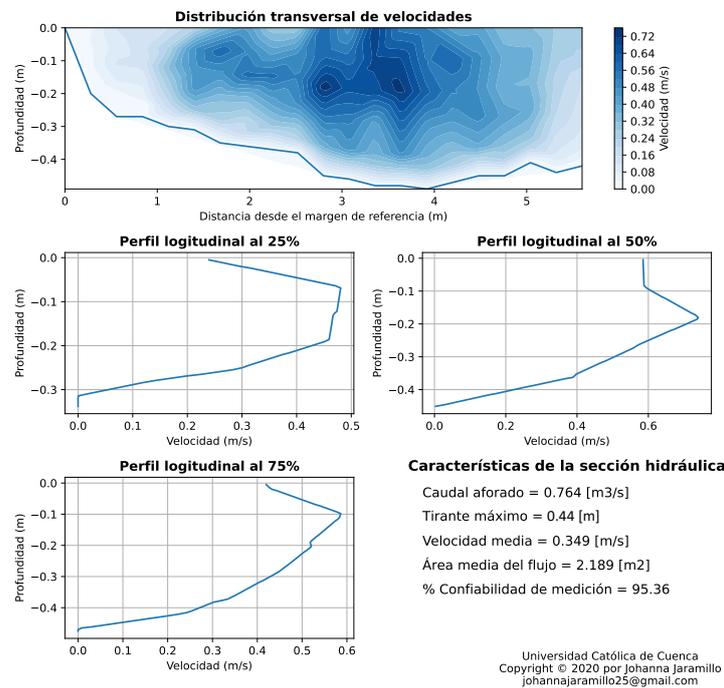
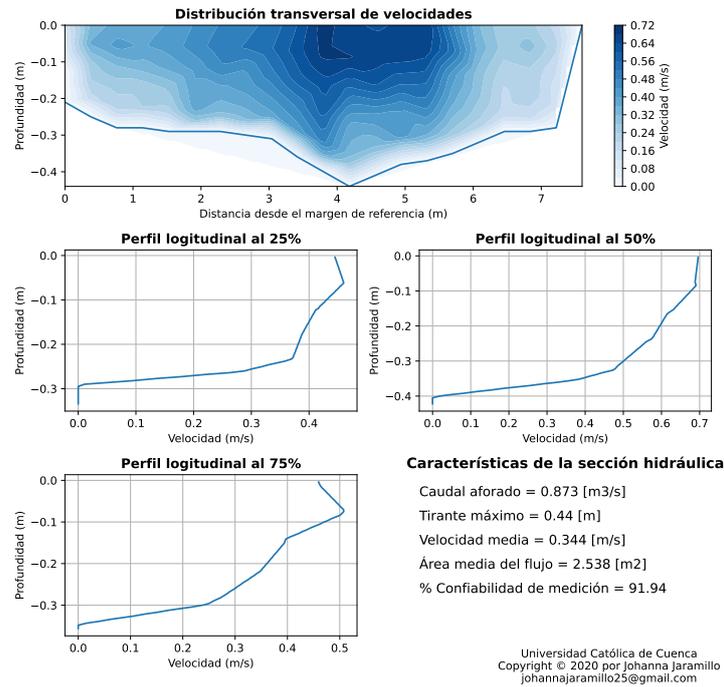


Figura 7.18: Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 19/11/2022

Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S1
Fecha: 25/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez



Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S2
Fecha: 25/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez

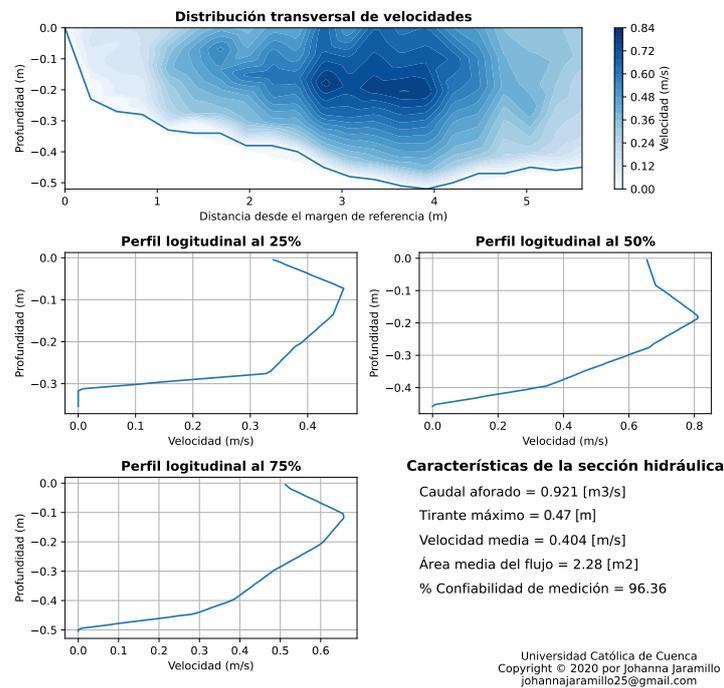
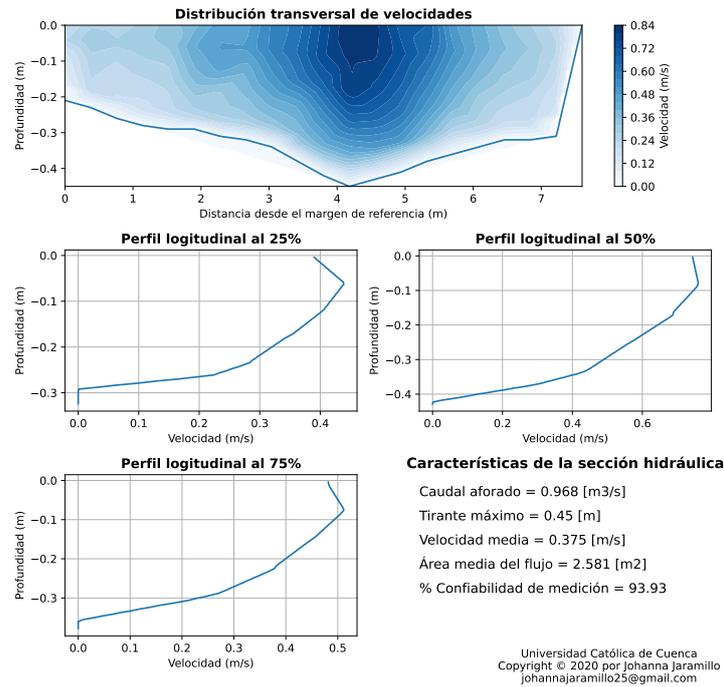


Figura 7.19: Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 25/11/2022

Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S1
Fecha: 30/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez



Proyecto: Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay - sector La Concordia
Sección: S2
Fecha: 30/11/2022
Técnico: Boris Cabrera - Valentín Vélez

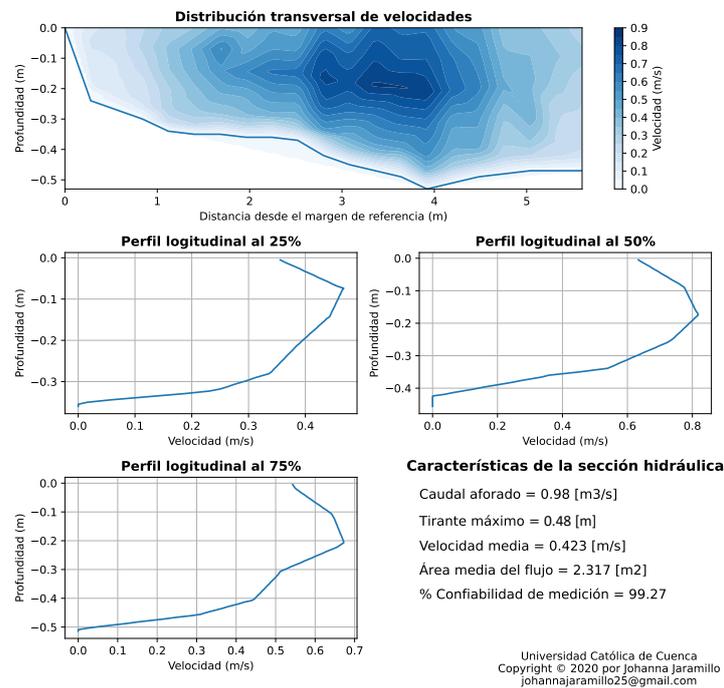
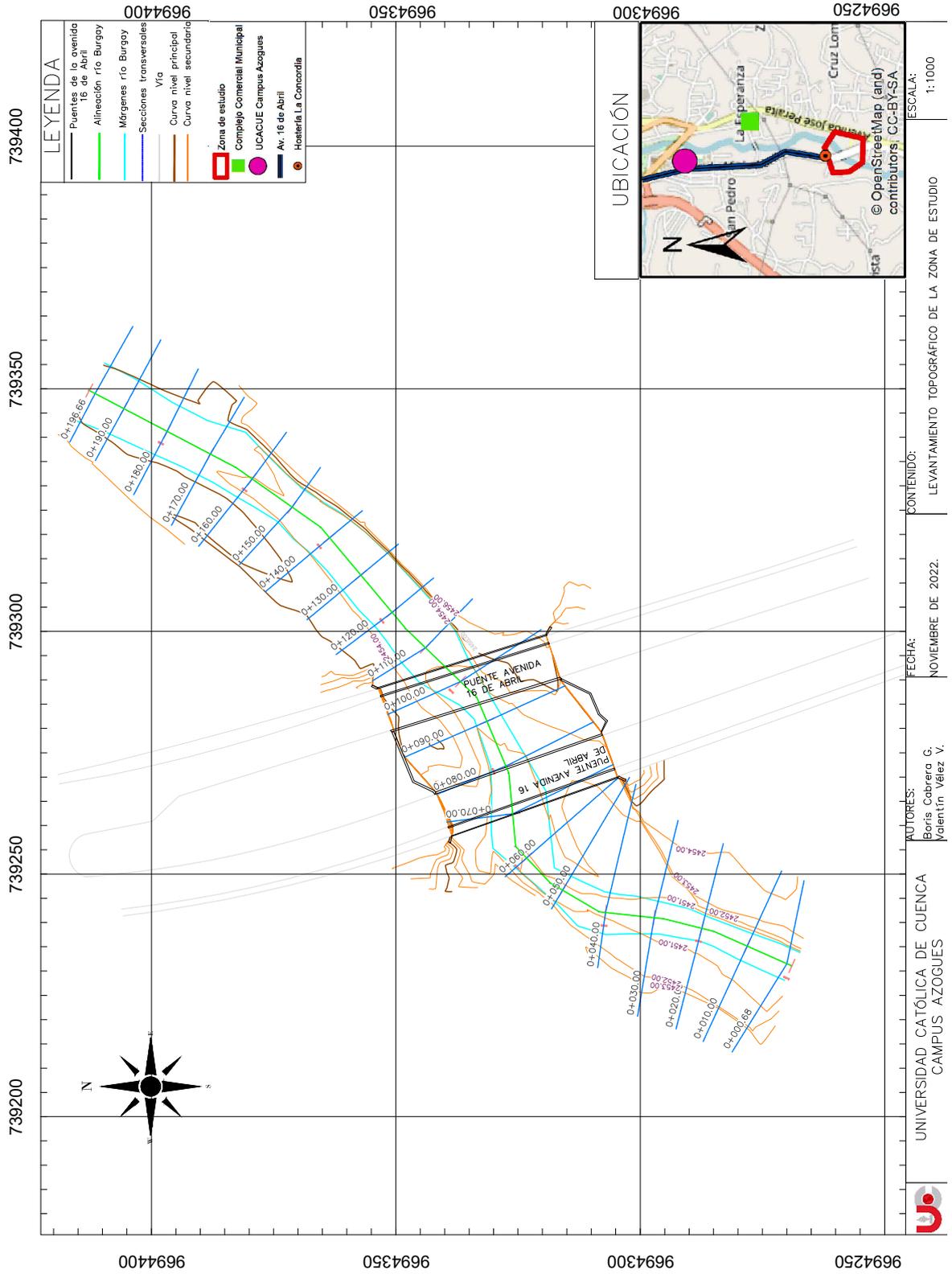


Figura 7.20: Aforos en el río Burgay - sector "La Concordia" del día 30/11/2022



7.12. Levantamiento topográfico y aforos en el río Burgay









Figura 7.21: Trabajos de topografía y aforos realizados en campo.



Boris Fabricio Cabrera Guillén portador(a) de la cédula de ciudadanía N° **0302633615**. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay sector la Concordia**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 24 de febrero de 2023

Boris Fabricio Cabrera Guillén

C.I. 0302633615

Vinicio Valentín Vélez Vázquez portador(a) de la cédula de ciudadanía N° 0350018388. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “**Análisis hidráulico de los puentes sobre el río Burgay sector la Concordia**” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos y no comerciales. Autorizo además a la Universidad Católica de Cuenca, para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 24 de febrero de 2023

F: 

Vinicio Valentín Vélez Vázquez

C.I. 0350018388