

CARACTERIZACIÓN HIDRO-GEOMÉTRICA EXPERIMENTAL UTILIZANDO
TRAZADORES SALINOS ASOCIADO CON FOTOGRAMETRÍA EN UN CANAL A
ESCALA Y DE PENDIENTE VARIABLE COMO MODELO FÍSICO DE CANALES
ABIERTOS NO PRISMÁTICOS.



LUIS FELIPE GUARIN RUIZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

CARACTERIZACIÓN HIDRO-GEOMÉTRICA EXPERIMENTAL UTILIZANDO
TRAZADORES SALINOS ASOCIADO CON FOTOGRAMETRÍA EN UN CANAL A
ESCALA Y DE PENDIENTE VARIABLE COMO MODELO FÍSICO DE CANALES
ABIERTOS NO PRISMÁTICOS.

LUIS FELIPE GUARIN RUIZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

Asesor

HENRY CONTRERAS LEÓN

Ingeniero Ambiental y de Saneamiento, Msc

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2019

Autoridades Académicas

P. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCÍA JARA O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

YESICA NATALIA MOSQUERA BELTRÁN

Decana de Facultad de Psicología

Contenido

1. Resumen	10
Palabras clave.....	10
2. Introducción.....	11
3. Planteamiento del problema	12
4. Objetivos.....	15
5. Justificación	16
6. Antecedentes.....	17
7. Marco teórico.....	20
7.1. Marco legal.....	26
8. Metodología.....	27
8.1. Etapa 1. Diseño del canal experimental:	27
8.2. Etapa 2. Operacional	27
8.2.1.1. Medición de Caudal.....	31
8.3. Etapa 3. Análisis de datos	34
9. Resultados y análisis.....	35
9.1. Diseño del canal no prismático	35
9.2. Elaboración del canal.	39
9.3. Medición de características hidro-geométricas independientes del canal.....	40
9.3.1.1. Geometría del canal.....	40
9.4. Cálculo de las características hidro-geométricas del modelo hidráulico calculadas por el método de vadeo y por el método de trazadores y fotogrametría.....	41
9.4.1.1. Medición de Caudal.	41
9.4.1.2. Medición de profundidad de la lámina de agua	44
9.4.2. Profundidad hidráulica.....	45
9.4.3. Área mojada	48
9.4.3.1. Ancho superficial	52
9.4.4. Perímetro mojado.....	55
9.4.4.1. <i>Radio hidráulico</i>	58
9.4.5. Número de Froude	60
9.4.6. Rugosidad.	62

9.4.7.	Cálculo de velocidad por trazadores.	66
9.4.8.	Energía.	67
10.	Conclusiones	69
11.	Recomendaciones	72
12.	Bibliografía	74

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Ecuación de Área Parcial	23
Ecuación 3 Ecuación de concentración a partir de conductividad.....	31
Ecuación 4 Regresión para cálculo de perímetro mojado.....	33
Ecuación 2 Calculo de borde libre.	37
Ecuación 5 Calculo de caudal por vertedero triangular Fuente: (Marbello, 2005).....	42
Ecuación 6 Ecuación de área transversal	48
Ecuación 7 Ancho superficial	52
Ecuación 8 Perímetro mojado por video.....	56
Ecuación 9 Ecuación para cálculo de perímetro hidráulico.....	57

Lista de Ilustraciones

Figura 2 Descripción aproximada características del canal no prismático fuente: Vente Chow (Chow, 1985), modificado para añadir convenciones.	29
Figura 3 Relación conductividad frente a concentración.....	30
Figura 4 Experimento 11: caudal 1.5 l/s, pendiente 0 curva típica de un ensayo de inyección de la solución salina para el cálculo de caudal.	31
Figura 5 Curva típica de un ensayo de inyección de la solución salina para el cálculo de Velocidad.	33
Figura 1: Vista transversal canal no prismático Fuente: Elaboración propia a partir de software de diseño AutoCAD.....	35
Figura 6 Canal en etapa final de construcción	38
Figura 7 Corte transversal de una sección del canal no prismático, elaborado mediante el Software Hec-Ras. Fuente: Autor.	39
Figura 8 Sección transversal #206 del canal con profundidad de 13 cm y ancho superficial de 22,7cm.....	40
Figura 9 Relación entre profundidad hidráulica y profundidad de lámina.	47
Figura 10 Relación de área transversal-profundidad por el método de vadeo.....	48
Figura 11 Grafica de relación Área mojada-Caudal-Pendiente	51
Figura 12 Relación profundidad-ancho superficial por el método de vadeo	52
Figura 13 Medición de ancho superficial por medio de fotogrametría.....	53
Figura 14 Relación entre perímetro mojado y profundidad.....	56
Figura 15 Gráfica de radio hidráulico vs pendiente y caudal.	59
Figura 16 Relación entre caudal y rugosidad.....	65
Figura 17 Porcentaje de aproximación de la rugosidad calculada por la metodología de trazadores y fotogrametría y rugosidad establecida por bibliografía.....	66
Figura 18 Grafica de relación pendiente-caudal-velocidad	67
Figura 19 Curva de energía específica del flujo.	68
Figura 20 Energía específica de acuerdo a la profundidad y régimen de flujo.(Jaime & Garcés, 2008)	68

Lista de Tablas

Tabla 1 Variables a manejar en la investigación	27
Tabla 2 Variables a manejar en la investigación.	28
Tabla 3 Relación concentración NaCl – Conductividad de multiparámetro.	30
Tabla 4 Ecuaciones para cálculo de características hidro-geométricas	32
Tabla 5 Materiales de revestimiento evaluados para la construcción del canal.	36
Tabla 6 Resumen numérico de los promedios de área, perímetro y ancho superficial resultante de las medidas en las 244 secciones transversales.....	41
Tabla 7 resultados de cálculo de caudal por método volumétrico, vertedero y medidor automático	42
Tabla 8 Resultados cálculo de caudal a través de trazadores, validada por duplicado.	43
Tabla 9 Porcentaje de aproximación entre los caudales calculados.	43
Tabla 10 Resultados de profundidad hidráulica por vadeo.....	44
Tabla 11 Resultados cálculo de profundidad hidráulica.....	45
Tabla 12 Porcentaje de semejanza entre las profundidades hidráulicas calculadas por los métodos de vadeo y trazadores.....	46
Tabla 13 Tabla de valores de aproximación entre valores de profundidad hidráulica y profundidad de lámina.	47
Tabla 14 Resultados cálculo de área transversal calculada por los métodos de vadeo y trazadores.	50
Tabla 15 Porcentaje de proximidad entre el área mojada calculada por los métodos de vadeo y trazadores.	50
Tabla 16 Resultados cálculo de perímetro mojado calculada por los métodos de vadeo y trazadores.	54
Tabla 17 Porcentaje de semejanza entre el ancho superficial calculado por los métodos de vadeo y trazadores	55
Tabla 18 Resultados cálculo de perímetro mojado calculada por los métodos de vadeo y trazadores.	57

Tabla 19 Porcentaje de semejanza entre el perímetro mojado calculado por los dos métodos	57
Tabla 20 Resultados cálculo de Radio Hidráulico calculado por los métodos de vadeo y trazadores.	58
Tabla 21 Porcentaje de semejanza entre el radio hidráulico calculado por los métodos de vadeo y trazadores	60
Tabla 22 Resultados cálculo de número de Froude a través del método de vadeo y método de trazadores -fotogrametría	60
Tabla 23 Porcentaje de semejanza entre el número de Froude calculado por los métodos de vadeo y trazadores	61
Tabla 24 Resultados cálculo de rugosidad por los métodos de vadeo y trazadores.	63
Tabla 25 Porcentaje de semejanza entre la rugosidadl calculado por los métodos de vadeo y trazadores	63
Tabla 26 Resultados cálculo de velocidad a través de trazadores, validación por duplicado.....	66
Tabla 27 Resultados cálculo de energía a través de trazadores	67

1. Resumen

Esta investigación busca plantear una técnica para la recolección y el procesamiento de las características hidráulicas de un canal abierto no prismático artificial experimental de dimensiones conocidas, usando como componente principal para el estudio el uso de trazadores salinos y un componente fotogramétrico y evaluar su precisión contrastando las características hidráulicas con una caracterización hidro-geométrica realizada a través de la metodología de Vadeo, método área-velocidad. Para la experimentación se diseñó y fabricó un modelo de canal no prismático en pvc de diámetro 10" y 4.5 metros de largo, revestido con fibra de vidrio reforzada con poliéster, el cual logró operar con caudales entre 0.5 l/s y 2.5 l/s, unas pendientes entre 0% y 1%, una altura máxima de lámina de agua de 14 centímetros., instalándose en el banco hidráulico FC-300TQ-7m, ubicado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Santo Tomás, sede Villavicencio.

Se evaluaron las dos metodologías, estudiando la aplicación y las implicaciones de cada una, estudiando los tiempos de aplicación y la magnitud del trabajo que implica cada una, hallando una relación promedio del 86.84% de todas las características hidráulicas halladas por el método de Vadeo y el método de trazadores y fotogrametría. Asimismo, se realiza un análisis geométrico y matemático que permitió hallar los valores de perímetro mojado, como aporte de nuevo conocimiento se desarrolló la relación matemática que establece un rango de aproximación del 93.69% al perímetro en función de la profundidad hidráulica y el Área mojada ($P = \pi D_h + \sqrt{A_m}$).

Se hallaron a su vez correlaciones hidráulicas de gran relevancia, como la relación entre la profundidad hidráulica y la profundidad de lámina, esta última representa una proporción del 80% de la profundidad de lámina, teniendo en cuenta esto, se encontró una relación del 96% entre los valores de profundidad de lámina hallados por la relación presentada y los valores de profundidad de lámina medidos en laboratorio. También se encontró una relación importante entre los valores de rugosidad hallados metodológicamente y los valores de rugosidad establecidos bibliográficamente, lo que valida en gran medida el método para la obtención de este valor y a su vez sustenta la variación que existe en la rugosidad de un canal de acuerdo a sus características.

Palabras clave: Canales abiertos, trazadores, comportamiento hidráulico, Modelo experimental.

2. Introducción

El estudio de las características hidráulicas de canales abiertos es una herramienta de gran importancia para el desarrollo de diferentes estudios puede afrontar un ingeniero ambiental en el desarrollo de su ejercicio como profesional, el conocer el comportamiento hidráulico de un cuerpo hídrico es fundamental para el desarrollo de diferentes proyectos, ya sean estudios del ecosistema, para el aprovechamiento del recurso, estudios de riesgo, etc.

La caracterización hidráulica de canales prismáticos es relativamente sencilla, puesto que los valores geométricos permiten el análisis de su comportamiento a través de ecuaciones establecidas, sin embargo, en canales irregulares, la caracterización del comportamiento hidráulico se hace más compleja, ya que su comportamiento geométrico es impredecible y las características hidráulicas no pueden calcularse de manera directa.

Es muy común que, para el desarrollo de estos estudios en cuerpos hídricos de magnitud media y pequeña, se realice la caracterización hidráulica a través del método de Vadeo y modelo Área-velocidad. Sin embargo, es una metodología que generalmente tiene un fuerte componente de medición manual y a su vez, el estudio de un tramo del cuerpo hídrico se realiza a través de una serie determinada de secciones asumiendo información del tramo estudiado, lo que puede significar un sesgo en los cálculos obtenidos. A demás, este método es intrusivo al flujo, lo que puede llegar a significar posibles riesgos para el operario, siendo a su vez, un método que representa un arduo trabajo tanto en campo, como en el procesamiento de la información.

Esta investigación propone un método para la caracterización hidro-geométrica de canales no prismáticos mediante el uso de trazadores salinos en conjunto con captura de información fotogramétrica, que logre recopilar una mayor información recolectada y así alcanzar un mayor grado de aproximación a las condiciones reales de los tramos de estudio, evitando asumir valores del canal y a su vez, agilizando el procesamiento de la información.

3. Planteamiento del problema

Una de las características que hacen más relevante la riqueza en recursos naturales de Colombia a nivel mundial es la abundancia en la oferta hídrica superficial disponible, que se define como volumen de agua que escurre por la superficie e integra los sistemas de drenaje superficial. Es el agua que fluye por la superficie del suelo que no se infiltra o se evapora y se concentra en los cauces de los ríos o en los cuerpos de agua lenticos (IDEAM, 2014).

Actualmente en riqueza de recursos hídricos, Colombia ocupa en el sexto lugar a nivel mundial con un caudal total de 2132 km³/año, del cual un aproximado de 2112 km³/año consta de fuentes superficiales. (IDEAM, 2014), y entre los departamentos que mayor oferta hídrica tienen a nivel nacional está el Meta, con una oferta superficial año medio de 125,86km³/año, dado por la alta confluencia de precipitaciones y la densidad de drenajes que se contempla en la región del piedemonte (FAO, 2003). A pesar de la alta disponibilidad hídrica, hay un incremento gradual en la demanda, esta crece a un ritmo anual entre 4% y 8%, dos veces más que el crecimiento demográfico de la región. (Carvajal, 2011)

Tradicionalmente se han estudiado las dinámicas hidráulicas que tienen los drenajes superficiales en los casos en que se precisa para la planificación del terreno. El reconocimiento de la cantidad de agua disponible ofrecida por las fuentes de agua se realiza de acuerdo a métodos tradicionales dependiendo de la vocación del estudio, los niveles de demanda y las condiciones de interacción hidráulica necesarias para mantener la salud de la fuente abastecedora de agua.(Costa Posada, Rivera, & Romero Pinzón, 2007)

Una muestra de esto se observa en Ecuador, en el proyecto Plan de aprovechamiento y control del Agua en la Provincia en Los Ríos, donde de acuerdo a la variación en los caudales que generan inundaciones o sequías, se da paso a un estudio para regular el potencial hídrico a través de la implementación de grandes obras de infraestructura hidráulica que permiten almacenar el agua en épocas de lluvia y usarlas durante la época seca.(Muy & Tandazo, 2012)

Para evaluar procesos de amenaza en el área de inundaciones, se ha estudiado además de la topografía de la región en cuestión, el conjunto de características intrínsecas del canal. Entre éstas

está la geometría del mismo, así como la pendiente y el caudal que presenta.(Iosub, Minea, Hapciuc, & Romanescu, 2015)

Para el estudio del comportamiento hidráulico se han aplicado numerosas metodologías de aforo, dependiendo de las características visibles del canal y evaluando la seguridad del operario, entre estas, más frecuentemente se encuentran: El método de vadeo, por estructuras hidráulicas, por Área-Pendiente, así como las metodologías apoyadas en sondas ecográficas, que tienen el mayor nivel de exactitud y precisión, entre otras metodologías de monitoreo y control de cauces. Estas metodologías, a pesar de su amplio uso, pueden tener sus limitaciones, la metodología más exacta como la sonda ecográfica, solamente en equipos tiene un alto coste económico; el levantamiento de datos por Vadeo, tiene un elevado nivel de incertidumbre, puesto que se asumen espacios entre las secciones evaluadas.

Para ampliar lo anterior, se adopta un trayecto de un cauce de 100 metros y a través del método de vadeo se podría desarrollar un número de 10 mediciones, lo cual equivale a distancias de 10 metros entre mediciones, representando 10 distintos valores de área transversal del cauce, 10 velocidades, 10 distintos valores del ancho de cauce, para luego ser procesados y obtener valores promedios de las características hidráulicas y geométricas del tramo estudiado. Todo lo anterior conlleva una alta variabilidad de datos, dado que, si se quiere encontrar un mayor grado de precisión se requeriría realizar una mayor cantidad de mediciones en el tramo, lo cual sería impráctico y difícil de desarrollar, por lo que se asume este nivel de incertidumbre y de acuerdo a la vocación del estudio, el nivel de incertidumbre y los análisis realizados, podrían reflejarse en posibles problemáticas del entendimiento hidráulico a futuro.

Otro método también conocido de evaluar algunas características hidro-geométricas del flujo de un cuerpo hídrico es a través de trazadores, mediante los cuales se puede determinar: Caudal, Velocidad de flujo, Área transversal y coeficiente de dispersión con valores de aproximación aceptable, aunque también se establecen otras variables hidráulicas por medio de mediciones manuales y adoptando grandes distancias entre mediciones (Caso del ancho superficial del cauce) o asumiendo otras características hidráulicas de referentes (Como lo es el coeficiente de rugosidad del cauce) para así llegar a obtener matemáticamente otras características hidro-geométricas del canal , como lo son; el Perímetro hidráulico, Radio Hidráulico, Número de Froude, Energía, entre

otras variables que resultan de correlacionar las originalmente medidas, y que son características clave en el desarrollo de dichos estudios.

Para cubrir los vacíos de precisión en las técnicas de medición de las características hidráulicas de canales no prismáticos (Cauces naturales), se pueden asociar nuevas técnicas de captura de información. En este caso, el uso de las técnicas fotogramétricas o de sensoreamiento remoto han sido ampliamente empleadas en el sector ambiental, ordenamiento de cuencas, sin embargo, el uso de estas herramientas para la caracterización hidro-geométrica de canales naturales no se ha sumado a las técnicas anteriormente expuestas, se han estudiado técnicas de estudios hidrológicos, como la técnica LSIPV, sin embargo, a menor escala, para fuentes hídricas de menor tamaño no se ha considerado su aplicación. (Marcheli & Contreras, 2012)

La fotogrametría y su ramificación llamada fotogrametría de corta distancia tiene una gran cantidad de ventajas en su aplicación, como la precisión de sus mediciones, la eficiencia del proceso y la disminución en la aberración cromática o artificios de las imágenes, así como la accesibilidad de los equipos para la captura de información, ya que, puede hacerse incluso con la cámara de un teléfono móvil, teniendo resultados muy acertados. (Iunes et al., 2005; Tommaselli, Silva, Hasegawa, Galo, & Poz, 1999), es por ello que su uso podría apoyar las técnicas de medición a través de la captura de la imagen del ancho superficial del cauce y lograr mediciones del ancho centímetro a centímetro y así reducir el sesgo de información.

De acuerdo a esto, se llega al cuestionamiento. **¿Es viable definir las características hidro-geométricas de un canal no prismático mediante el uso de trazadores salinos y fotogrametría?**

Se plantean dos hipótesis para responder esta pregunta:

- H1: Los trazadores en conjunto con componentes fotogramétricos y analíticos permiten la caracterización hidro-geométrica de canales no prismáticos con un nivel de precisión aceptable.
- H0: Los trazadores en conjunto con componentes fotogramétricos y analíticos no permiten la caracterización hidro-geométrica, puesto la naturaleza variable de los canales no prismáticos alejan los resultados de la realidad.

4. Objetivos

4.1.Objetivo general:

Analizar el uso de trazadores salinos para la definición de las características hidro-geométricas de canales no prismáticos a través del diseño de un canal experimental no prismático de dimensiones conocidas como modelo físico.

4.2.Específicos:

1. Determinar las características hidro-geométricas para el diseño y construcción de un canal no prismático de dimensiones conocidas.
2. Identificar las características hidro-geométricas del canal experimental a través de los métodos por Vadeo - modelo Área-Velocidad y la metodología planteada.
3. Evaluar la precisión en la determinación de las características hidráulicas a través de trazadores frente otros métodos para la obtención de éstas (Vadeo, volumétrico y vertedero).

5. Justificación

El estudio de canales naturales es de gran importancia para toda la población de Colombia, desde las grandes urbes hasta los poblados en zonas rurales o periféricas, ya sea para el aprovechamiento del recurso o para el vertimiento de sus aguas residuales, en donde también es necesario entender la dinámica hidráulica del canal para evaluar los fenómenos de transporte y la dinámica hídrica de los mismos. Así mismo, el entendimiento del comportamiento hidráulico es necesario para el entendimiento de los procesos de avenidas torrenciales e inundaciones que pueden ser resultado de un episodio de alta precipitación.

Sin embargo, es importante no solo instrumentar y controlar las corrientes que se proyectan para aprovechamiento hidroeléctrico o de infraestructura, es menester también estudiar las corrientes que puedan ser significantes en torno al ordenamiento territorial en términos de amenazas por inundaciones que puedan poner en riesgo a determinada población.(Cardona, 1993)

Para un ingeniero ambiental, el conocer el comportamiento hidráulico de un cuerpo hídrico es una herramienta fundamental para una gran gama de estudios técnicos o académicos a implementar que se relacionen directamente con canales abiertos, ya sean estudios de cuencas, riesgo, calidad de agua, conservación o restauración de ecosistemas, entre otros muchos estudios en los que es necesario conocer el comportamiento hidráulico de un cuerpo hídrico.

Asimismo, la metodología que se evaluará en el presente proyecto busca ser no intrusiva, es decir, que el operario o la persona encargada de hacer el levantamiento de datos evite la intrusión al cuerpo hídrico, y que la mayor parte de las características puedan evaluarse fuera del canal en cuestión, evitando exponer la salud del operario y para el procesamiento de la información solo habría que tomar en el valor de concentración del compuesto utilizado como trazador y el ancho superficial por medio de sensores (Vehículos aéreos no tripulados) y así establecer, los demás elementos se obtienen a partir de análisis matemáticos y modelos planteados.

La finalidad de esta investigación es generar un método no convencional para la caracterización de canales naturales, que tenga una alta proximidad a la realidad, y que logre resultados con un margen de error mínimo en los parámetros de caudal, velocidad, ancho superficial y perímetro mojado etc. Necesarios para el entendimiento del comportamiento hidráulico de los cauces naturales.

6. Antecedentes

El uso de trazadores salinos para estudios hídricos tiene una gran gama de aplicaciones, frecuentemente se requiere el uso de éstos para entender el comportamiento y los fenómenos de transporte de cuerpos hídricos superficiales, como para la definición de características de flujo de agua subterránea e infiltración.

En Estados Unidos, se ha estudiado el uso de trazadores para la obtención de características hidráulicas y su comportamiento de transporte en la implementación de humedales superficiales para el tratamiento de aguas residuales.

En 1997, Mitchell y Howes generan un estudio llamado “Hydraulic tracer studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland”, En este estudio, evalúan el uso de trazadores para entender el comportamiento hidráulico del flujo en humedales artificiales subterráneos.

En la anterior investigación se apoya el estudio realizado en el 2007 por Headley, Thomas R. y Kadlec, Robert H. Llamado Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide, en donde ejemplifican y expanden el uso de diferentes trazadores para la definición el entendimiento de importantes características hidráulicas en un humedal artificial, que son decisivas para la eficiencia en el diseño y la operación de éste. Entre estas características se encuentran la velocidad del flujo, el caudal, tiempo de residencia, difusión y micro-ciclos. (Headley & Kadlec, 2007)

En este estudio se discuten los tipos de trazadores a usarse para la definición de las características, y se evalúan los procedimientos a efectuarse para la efectividad en el estudio de las características hidráulicas, además de la cantidad adecuada de compuesto químico.

En el artículo A comparison between model and experimental hydraulic performances in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland, de Ranieri Ezio, Gorgoglione Angela, Solimeno Alessandro, elaborado en Italia, se evalúa el uso de trazadores salinos para la determinación de un modelo experimental a escala piloto para el tratamiento de agua, en este se evalúan también tiempos de concentración y variables hidráulicas para la construcción de un modelo eficiente.(Ranieri, Gorgoglione, & Solimeno, 2013)

Por otra parte, en Chile, los trazadores se han empleado para caracterizaciones hidrogeológicas, en donde se evalúan los trazadores salinos para la definición de características hidráulicas, en este caso para la cuenca hidrográfica del río Mañihuales, en este estudio se genera una caracterización hidrológica, hidráulica y geológica de la cuenca. (González, L.1, González, A.1, Saavedra & (1), 2009)

Una parte importante del estudio a realizarse, es la definición de la característica de ancho superficial apoyada en técnicas de fotogrametría y sensoreamiento remoto, y a partir de definiciones geométricas y matemáticas obtener características subyacentes como el radio hidráulico y la rugosidad.

Por otra parte, el uso satelital, fotográfico y de video se ha usado para la determinación de características hidráulicas e hidro-topográfica de los cuerpos hídricos, en el caso del estudio llamado “O sensoriamiento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na baía das laranjeiras, Paranaguá – PR” se llevó a cabo un análisis batimétrico por medio de un índice normalizado de agua, que se basa en el color y el espectro electromagnético de reflexión que percibe el sensor satelital, genera una aproximación de la forma del fondo del cuerpo hídrico, sin embargo se limita a cuerpos de gran escala, ya que la resolución espacial de estos sensores remotos hiperespectrales es limitada para escalas menores. (Krug & Noemberg, 2007)

Así mismo, en México, se evaluó el uso de trazadores y el uso de sensores remotos a través de la velocimetría por Imágenes de Partículas, esta es una técnica de medición óptica no intrusiva que, a través del procesamiento de imágenes, logra obtener de manera indirecta campos bidimensionales de velocidad de flujo, con base en la medición de la velocidad de partículas o diversos elementos conocidos como trazadores del flujo.(Marcheli & Contreras, 2012)

Por último, a nivel local, se ha evaluado el uso de trazadores para la definición de características hidro-geométricas de canales no prismáticos en Colombia, más precisamente en la Quebrada Lejía, en Arbelaez donde por medio del uso de éstos, se definen características como caudal, área transversal, velocidad de flujo, tiempo de concentración y dispersión de los trazadores. Sin embargo, para la evaluación de las demás características hidro-geométricas como perímetro hidráulico, ancho superficial, radio hidráulico y rugosidad, es necesario hacer el levantamiento hidrotopográfico y de aforo por vadeo.(Zambrano, 2004)

Posteriormente el mismo autor, hace un enfoque de ésta caracterización a un modelo de calidad de agua, donde por medio de las características hidráulicas y el comportamiento de los trazadores, se evalúa la calidad del recurso hídrico por medio del modelo ADZ y Qual2k, cuyos modelos se apoyan en el uso de trazadores y características hidro-geométricas de un canal para el estudio de movimiento de contaminantes en el cauce, teniendo en cuenta la dinámica fluvial. (Zambrano, 2016)

7. Marco teórico.

El uso de modelos físicos a escala reducida implica una serie de semejanzas o igualdades en las leyes geométricas, cinemática, y dinámicas que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo y el modelo.(SILVA, 2009)

Los canales abiertos son canales que cuentan con una superficie libre, es decir que está en contacto con la atmósfera. dentro de las clases de canales abiertos se encuentran “canales naturales” o artificiales. Los artificiales o prismáticos son los construidos por el hombre, como, por ejemplo: de irrigación, navegación, vertederos, cunetas y también los construidos en los laboratorios, vistos como modelos físicos. Para el caso de los “canales naturales o no prismáticos”, son canales con características geométricas no definidas o difusas, con una variación alta en su longitud. (SILVA, 2009)

Los canales prismáticos, a su vez, son canales con características geométricas definidas cuya forma se mantiene a lo largo del cauce; los canales no prismáticos no tienen esa propiedad, tienen un carácter geométrico con un patrón aleatorio que varía a lo largo del cauce. Los canales de naturaleza no prismática pueden ser tanto canales que en un inicio fueron canales prismáticos, pero con el paso del tiempo pierden su forma geométrica (López Alonso, 2005), como canales naturales, estos, a su vez, tienden a cambiar su forma a través del tiempo, ya sea por fenómenos de sedimentación, como de arrastre de material o cambio en la vegetación del lecho así como geológicas, morfológicas, hidrológicas, transporte de sedimentos, erosión, socavación etc. (López Alonso, 2005; SILVA, 2009)

La acción erosiva de los ríos es producto de la velocidad, del relieve y de la pendiente longitudinal, generando una serie de procesos mecánicos que en su primera etapa de transporte el material es particulado, gravas de mayor tamaño son golpeadas por otras provocando su ruptura. En la segunda y tercera etapa el material fracturado en trozos, es sedimentado en el río, teniendo influencia solamente en el proceso de sedimentación. La energía del agua en parte causa un efecto de martilleo en el fondo del río generando una mayor degradación de las gravas transformando el material en arenas, para estos casos la influencia de cauces irregulares dañan la estructura de fondo creando socavación.(SILVA, 2009)

Para secciones regulares y simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y de otras dimensiones de la sección, pero para secciones complicadas y secciones de corrientes naturales, no se pueden escribir una ecuación simple para expresar estos elementos, pero pueden prepararse curvas que representen la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para uso en cálculos hidráulicos. (MARIN, 2012)

El uso de modelos físicos de canales hidráulicos a escala es de gran relevancia para el entendimiento del comportamiento del flujo bajo parámetros controlados, el uso de estos implica una serie de semejanzas o igualdades en las leyes geométricas, cinemática, y dinámicas que en conjunto relacionan las magnitudes físicas homólogas definidas entre ambos sistemas, el prototipo y el modelo. Se emplean ampliamente en laboratorios de hidráulica para observar el comportamiento del flujo en diferentes escenarios, se usa tanto para observar los tipos y régimen de flujo, fenómenos locales, energía, rugosidad, etc. (SILVA, 2009)

Una de estas mediciones básicas en canales hidráulicos a escala es el aforo, el cual es un procedimiento que consiste en realizar en campo, una serie de mediciones de factores de área en la sección transversal y de velocidad del agua y permite posteriormente calcular el caudal de una corriente, el cual está referenciado a un nivel de agua. En otros casos, la medición entrega resultados inmediatos para ser aplicados en actividades que así lo requieren. El caudal se puede medir en un tiempo dado por diferentes métodos y la elección del método depende de las condiciones halladas en un emplazamiento en particular, observando que el de mayor aplicación práctica está basado en la medición de la velocidad y el área de la sección transversal de aforo. (Costa Posada et al., 2007)

Para obtener mediciones confiables que faciliten la calibración total de la sección de aforos y que a su vez se tengan facilidades logísticas para el desplazamiento de las comisiones con los equipos de hidrometría, la sección transversal debe cumplir los siguientes requerimientos técnicos y logísticos (Costa Posada et al., 2007)

- La sección debe estar situada a un tramo recto de la corriente. En lo posible, la longitud del tramo tendrá un mínimo equivalente a cinco (5) veces el ancho de la sección
- La corriente debe mostrar líneas de flujo uniformes y paralelas a las márgenes de la corriente e igualmente que sean normales a la sección transversal de aforos, de tal manera

que la medición de la velocidad sea precisa para la obtención del caudal. Cualquier desviación en las líneas de flujo produce alteración en la magnitud, por cuanto vectorialmente no corresponde al 100% de la velocidad, sino a una componente de la misma.

- La sección debe ser profunda y tener márgenes naturales altas, para evitar desbordamientos en aguas máximas, con lo cual se garantiza la calibración de caudales máximos.

Uno de los métodos de aforo más conocidos es el método de aforo por Vadeo, el cual se utiliza cuando la profundidad es menor de un metro (< 1 m) y la velocidad de la corriente menor de un metro por segundo (< 1 m/s). Estas condiciones permiten que los operarios y los equipos se metan al cauce con seguridad, garantizando de esta manera que la medición se realice con comodidad y sin riesgo. (Costa Posada et al., 2007) Para realizar el procedimiento de aforo por vadeo se requieren ciertos elementos, estos son:

- Cinta métrica
- Varillas de vadeo
- Contador de revoluciones
- Molinete o micro molinete
- Cartera de aforos y planillero
- Personal: dos técnicos (Inspector y aforador)

Dado que el caudal es función del área de la sección y la velocidad media del flujo, este procedimiento se basa en la determinación de estas variables. Este sistema de aforo es el de mayor uso y requiere que el flujo tenga un comportamiento laminar y que las líneas de flujo sean normales a la sección transversal de aforo. La precisión de las mediciones del caudal depende en gran parte del número de verticales que se tomen para la ejecución de las mediciones para el aforo, profundidad, velocidad, toma de muestras de agua, etc. (Costa Posada et al., 2007)

Las abscisas de observación se deben definir de modo que se pueda precisar la variación de la configuración del lecho de la corriente y la variación vertical y horizontal de la velocidad. En general, la distancia entre verticales debe ser aquella que defina secciones parciales, por las cuales no pase más del 10% del caudal total. Para cumplir tal requerimiento técnico, se recomienda tomar entre doce y quince verticales, dependiendo de la uniformidad del fondo del cauce. Posteriormente,

se puede reducir o aumentar el número de estas, de tal forma que se cumpla con las recomendaciones pertinentes. (Costa Posada et al., 2007)

El ancho de cada sección parcial se denomina ancho parcial y corresponde a la distancia existente entre dos verticales de medición consecutivas. Normalmente, la posición horizontal de los puntos de observación se determina con el auxilio de una cinta métrica que se tiende provisionalmente a través del río. La profundidad total es la distancia en metros que existe en cada una de las verticales de medición entre la superficie del agua y el lecho de la corriente. (Costa Posada et al., 2007)

Cuando se realizan aforos por vadeo, las profundidades de medición de velocidades se toman desde la superficie hacia el fondo usando una varilla graduada que se apoya en el lecho de la corriente. El área de una sección parcial corresponde a la superficie de cada tramo en que se ha dividido el cauce y se encuentra multiplicando la profundidad media por el ancho parcial. (Costa Posada et al., 2007)

$$Ap = P_{media} * ap$$

Ecuación 1 Ecuación de Área Parcial

El área total de la sección de aforos se obtiene sumando las áreas de las secciones parciales. Tradicionalmente, el dispositivo de velocidad lo constituye una hélice que gira al recibir el empuje horizontal de las líneas de flujo, midiendo el número de revoluciones en un tiempo determinado; la relación entre las revoluciones y el tiempo se denomina frecuencia, factor que se lleva a la ecuación de calibración del equipo para obtener la velocidad en un punto de la sección de aforos. (Costa Posada et al., 2007)

Para determinar la velocidad media de la sección de aforos, se toman secciones parciales a las cuales se les van calculando sus velocidades de la siguiente manera: se toma una sección entre verticales con velocidades conocidas, se promedian estas velocidades y el resultado es la velocidad media de la subsección, así: El producto del área parcial multiplicada por la velocidad media de la sección parcial nos define el caudal parcial, que corresponde al caudal que pasa por cada tramo del cauce. (Costa Posada et al., 2007)

Para suplir estos inconvenientes presentados por los aforos convencionales como el vadeo se han utilizado los aforos con trazadores o también llamados aforos químicos, los cuales permiten

conocer el caudal a partir de la variación de concentración de una sustancia que es inyectada en el cauce. El principio de esta técnica consiste en inyectar un trazador en una sección de la corriente y realizar aguas abajo, a una distancia lo suficientemente lejana, y tras una dilución total, mediciones de conductividad eléctrica para detectar el paso de la solución saturada y así calcular el caudal. En todo este desarrollo no se requiere conocer el área de la sección de medición. Puede definirse como trazador a toda sustancia que incorporada a un proceso físico o químico permita estudiar su comportamiento y evolución. (Costa Posada et al., 2007)

Entre los trazadores empleados pueden citarse los sólidos en suspensión, los trazadores químicos solubles en el medio bajo estudio, los colorantes y los elementos radioactivos. Este aforo se aplica especialmente en corrientes con flujo turbulento y sección irregular, donde no es viable utilizar el molinete. La turbulencia permite la dilución total de una sustancia química usada como trazador, en un tramo de la corriente con una longitud determinada que se verifica antes de iniciar la inyección del trazador. (Costa Posada et al., 2007)

La medición del caudal mediante este método está basada en la determinación del grado de dilución en el agua del río de una solución trazadora. El empleo de este sistema se recomienda en los lugares, en los que no pueda recurrirse por las razones expuestas a emplear los métodos convencionales sin embargo, los últimos desarrollos tecnológicos, soportados con experimentación en campo, permiten ampliar la aplicación de este tipo de aforo, ya que los equipos automáticos que se han implementado y utilizan en Colombia, permiten conocer adicionalmente la longitud de mezcla para detectar con precisión la evolución de la solución saturada (trazador) y precisar la distancia a la cual hay dilución total en la corriente. (Costa Posada et al., 2007)

Estos valores obtenidos en campo, requieren ser asociados con otras características medidas de los canales como son; la pendiente, longitud del canal, ancho superficial promedio, para que sea el punto de partida para que mediante análisis matemático de las ecuaciones de hidráulica de canales abiertos como es el caso de la ecuación de Manning, entre otras, se pueda obtener otras características hidráulicas como lo son; área mojada, perímetro mojado, energía, número de Froude, radio hidráulico, profundidad hidráulica y rugosidad, permitiendo estudiar el comportamiento hidráulico del canal.

En el caso de la pendiente, esta se define como la variación de la altura del canal con respecto a su longitud, ésta característica es determinante en la ecuación de Manning, donde para hallar la

velocidad del tramo se opera el radio hidráulico, la rugosidad y la pendiente del tramo, en este caso se usará la ecuación de Manning para evaluar la rugosidad del canal en lugar de la velocidad.

Caudal se refiere al volumen de un fluido que pasa por un tramo en un periodo de tiempo. La velocidad es la relación de la distancia de flujo recorrida y el tiempo en que efectúa ese movimiento, en un cuerpo hídrico normalmente se encuentran diferentes perfiles de velocidad, puesto que la velocidad del flujo varía en capas de acuerdo a la rugosidad del fondo, la presión atmosférica y la profundidad del mismo, en esta investigación se evaluará una velocidad media del canal.

La profundidad de flujo es la distancia vertical entre el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre. El ancho superficial es el ancho de la sección de un canal en la superficie libre. El área mojada es el área de la sección transversal de un flujo perpendicular a la dirección de flujo. El perímetro mojado es la longitud de la línea de intersección de la superficie del canal mojado y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo. El radio hidráulico es la relación entre la relación del área mojada respecto a su perímetro mojado y la profundidad hidráulica es la relación entre el área mojada y el ancho en superficie.(Chow, 1985)

El régimen de flujo en un canal abierto se mide en una combinación de viscosidad y gravedad, por lo general se relaciona con el estado de flujo o número de Reynolds; los regímenes de flujo se dividen en régimen sub-crítico, que aborda las regiones entre 0 y 1, régimen crítico, cuando el número de Froude es igual a 1 y supercrítico cuando éste es mayor de 1.

Finalmente, la fotogrametría como técnica de captura de información expresada en mosaicos de imágenes, permite posteriormente a través de software especializados agrupar los componentes cromáticos de similares características para obtener información numérica de áreas y distancias, por lo que se representa un gran potencial de apoyo a la técnica de trazadores para la captura de información superficial del cauce.

7.1.Marco legal

Ley 29 De 1990, expedida en por la Presidencia de la república, que expresa qué: Corresponde al Estado promover y orientar el adelanto científico y tecnológico y, por lo mismo, está obligado a incorporar la ciencia y la tecnología a los planes y programas de desarrollo económico y social del país y a formular planes de ciencia y tecnología tanto para el mediano como para el largo plazo

Decreto Número 1807, expedida por el ministerio de vivienda ciudad y territorio, que establece que, para la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de nuevos planes, se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa.

Guía Técnica Para La Formulación De Los Planes De Ordenación Y Manejo De Cuencas Hidrográficas POMCAS, Anexo B. Gestión del riesgo, expedida por el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. En este documento se establecen los protocolos para la determinación de amenaza y riesgo en sus componentes. El componente de interés radica en la determinación de amenazas y riesgos por inundación: “La delimitación de áreas susceptibles a inundarse por desbordamiento de ríos se realiza mediante el análisis de la dinámica fluvial, para ello se identificarán y clasificarán las diferentes geo-formas de acuerdo con su relevancia en la dinámica actual. Con el inventario o registro de eventos se caracterizan el tipo de flujo y la altura de la lámina de agua.”

Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua, Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM, En este documento se definen los protocolos y procedimientos para la caracterización del flujo en ríos para el monitoreo del recurso hídrico.

8. Metodología

Para el desarrollo de la investigación se dividió la metodología en tres fases, estas son:

8.1.Etapa 1. Diseño del canal experimental:

En esta etapa se pretende diseñar el canal experimental de acuerdo a los parámetros de diseño óptimos para la realización del estudio.

8.2.Etapa 2. Operacional:

Luego del diseño del canal experimental, se evalúa la metodología para la toma de datos, tanto de la metodología por vadeo Área-Velocidad, como la propuesta metodológica por trazadores.

Inicialmente se observa el comportamiento del flujo de acuerdo a la al estudio de las dimensiones reales del canal, para ello se manipulan las variables independientes y con ello se estudia el comportamiento de las variables dependientes.

Las variables definidas se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 1 Variables a manejar en la investigación

<i>Variables independientes</i>	<i>Variables dependientes</i>
Pendiente.	Área mojada.
Caudal.	Perímetro mojado.
	Profundidad hidráulica.
	Radio hidráulico.
	Número de Froude.
	Energía.
	Ancho superficial.
	Rugosidad.

Nota: Variables dependientes e independientes, por Felipe Guarín, 2019

La pendiente y el caudal se toman como variables independientes puesto que, tomando como referencia un canal natural, las pendientes son fijas por lo general, ya que depende estrictamente de las condiciones geográficas del terreno y los cambios en esta son muy poco frecuentes. El caudal, por otra parte, en cuerpos hídricos depende mayormente de condiciones meteorológicas e hidrográficas de la región de estudio.

Las características hidráulicas contempladas como dependientes, varían en concordancia a la pendiente y el caudal, al modificar cualquiera de las dos características independientes, las dependientes tendrán una variación sensible.

Como la rugosidad del canal se define de acuerdo al material de revestimiento del mismo, se hace innecesario manipular ésta, por lo tanto, para el estudio de las variables dependientes se modifican el caudal y la pendiente del canal.

Para el manejo de datos se define un Diseño experimental por bloques 2x5, con ello, se evalúa el comportamiento de las variables dependientes de acuerdo al manejo de 5 caudales y 5 pendientes, con un total de 25 tipos de flujo evaluados, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 2 Variables a manejar en la investigación.

Pendiente	Caudal				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0-0.5	0-1	0-1.5	0-2	0-2.5
0.25	0.25-0.5	0.25-1	0.25-1.5	0.25-2	0.25-2.5
0.5	0.5-0.5	0.5-1	0.5-1.5	0.5-2	0.5-2.5
0.75	0.75-0.5	0.75-1	0.75-1.5	0.75-2	0.75-2.5
1	1-0.5	1-1	1-1.5	1-2	1-2.5

Nota: Matriz de variables por bloques 2x5, por Felipe Guarín 2019

Se realizó validación por duplicado para incrementar la confiabilidad de los datos recolectados, es decir, se tomarán dos veces los datos y se registra el ponderado de éstos.

Para realizar las mediciones de la metodología Área-Velocidad se evalúan las secciones transversales del canal, se mide el ancho superficial y se asignan intervalos cada dos centímetros para tomar la profundidad de la sección, por aproximaciones geométricas se calcula el área de la sección evaluada. Una vez obtenida ésta, de acuerdo a las secciones evaluadas se calcula el caudal del flujo, el perímetro mojado y por relaciones matemáticas se obtiene la rugosidad del canal y se compara con las tablas de valores de rugosidad halladas bibliográficamente.

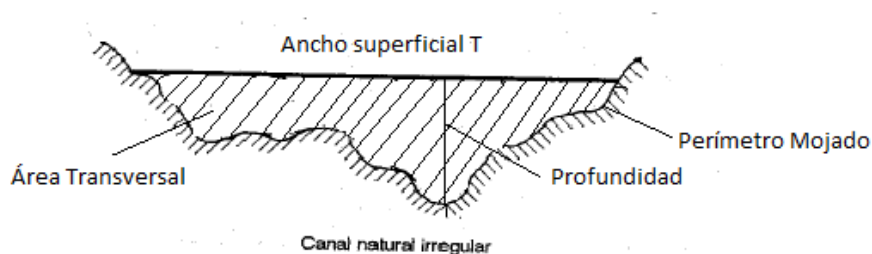


Figura 1 Descripción aproximada características del canal no prismático fuente: Vente Chow (Chow, 1985), modificado para añadir convenciones.

Las mediciones para caracterizar el flujo por medio de trazadores se categorizan en tres diferentes métodos, para la conductividad hidráulica se mide con un conductímetro, a partir de estos datos se hallan caudal y velocidad directamente, por medio de fotogrametría en todo el trayecto se mide el ancho superficial, manteniendo una equidistancia entre el sensor y el fondo del canal por medio de una plataforma deslizante en la superficie del mismo, posteriormente se hacen mediciones cada centímetro y se calcula el promedio.

Se toman por cada experimento 12 fotogramas y cada una de ellos es posteriormente procesado en AutoCAD. El proceso que lleva la imagen consiste en escalar la misma usando como referencia la cinta métrica incorporada en el canal, una vez escaladas las imágenes se ubican en orden y se dibujan líneas transversales al canal midiendo el ancho del flujo. Estas medidas se toman aproximadamente cada uno o dos centímetros, dependiendo de la variación del ancho superficial, y finalmente se exportan los datos obtenidos de ancho superficial a un archivo de cálculo. Teniendo estos datos se desarrollan los cálculos hidráulicos correspondientes y se hallan las demás variables a partir de correlaciones matemáticas de la siguiente manera:

Previo a las mediciones por medio de trazadores debe realizarse la mezcla de la solución salina y realizar las mediciones iniciales de conductividad en relación a la concentración, obteniendo la

correlación de la misma. Teniendo la concentración de saturación y una mezcla homogénea de solución salina, se midió la conductividad inicial del flujo objeto de estudio y teniendo estos datos registrados se procede a realizar la inyección del trazador en el flujo.

Para el uso de trazadores como método de cálculo, se realizó previo a los experimentos una prueba de concentración frente a salinidad, usando 0.5 l de agua y agregando 0.5 g de sal por medición, siendo en total 20 mediciones, hasta conseguir una recta con porcentaje de correlación mayor al 90%.

Tabla 3 Relación concentración NaCl – Conductividad de multiparámetro.

Concentración (g/l)	gNaCl	mS/cm
0	0	0.039
1	0.5	2.1
2	1	4.06
3	1.5	5.97
4	2	8.3
5	2.5	9.65
6	3	11.44
7	3.5	13.21
8	4	14.95
9	4.5	16.66
10	5	18.36

Nota: Concentración de NaCl y conductividad para calibración de equipo, por Felipe Guarín 2019

Una vez tomadas las lecturas mostradas anteriormente, se procede a realizar una regresión lineal para obtener la curva de calibración y la ecuación de concentración.

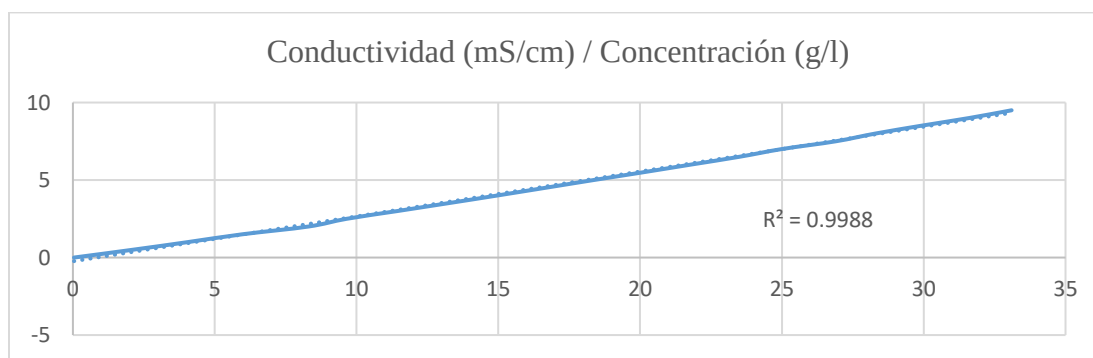


Figura 2 Relación conductividad frente a concentración

La regresión lineal obtenida es la base para el cálculo de concentración de sal mediante la medición de conductividad a través de la ecuación de la recta que se expresa en la ecuación:

$$\text{Concentración en } \frac{mg}{l} = 0,5789 * \left(\text{conductividad en } \frac{\mu S}{cm} \right) - 0.484$$

Ecuación 2 Ecuación de concentración a partir de conductividad

Con el equipo calibrado para estas mediciones se midió la conductividad del flujo, que por medio de la ecuación obtenida en el experimento de laboratorio establece la concentración de sal segundo a segundo por medio de almacenamiento compartido entre el multiparámetro y computador.

8.2.1.1. Medición de Caudal.

El método para medir caudal que se utilizará se conoce como Inyección a Caudal Constante, donde se inyecta un trazador en una sección dada a un caudal constante q_0 con una concentración de trazador C_0 (Rodríguez & Ayala, 2016): La inyección de solución salina se hace durante un periodo entre 90 y 150 segundos en donde el multiparámetro registra cada uno de los datos. Al hacerse el experimento con inyección constante se obtiene una curva de concentraciones como la que se ve en la Figura 4. Se toma como concentración dos el promedio de la concentración una vez la inyección se estabilice y como concentración uno la concentración inicial. Se realizó una validación por duplicado de los experimentos de caudal y velocidad. Se realiza entonces una inyección constante de solución salina con caudal de 0.00818 l/s a una concentración de 60g/l utilizando un recipiente de 10 litros ubicado arriba del canal. La inyección se realiza por medio de gravedad, utilizando una manguera flexible en cuyo extremo se adapta un flotador para que la altura piezométrica sea constante y mantenga un flujo de inyección constante.

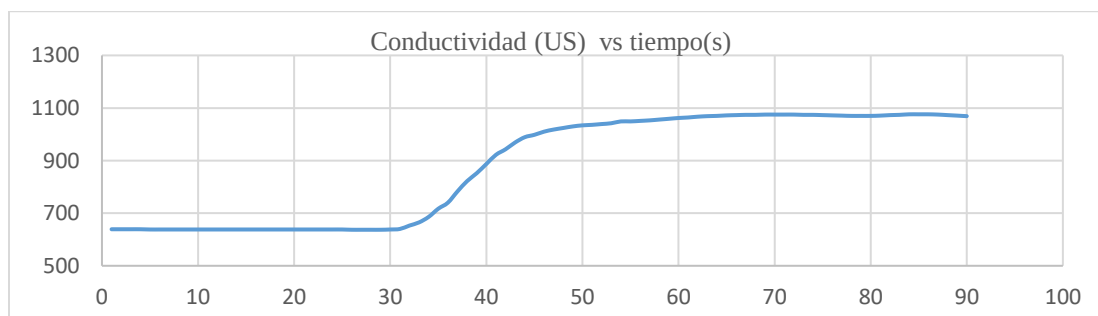


Figura 3 Experimento 11: caudal 1.5 l/s, pendiente 0 curva típica de un ensayo de inyección de la solución salina para el cálculo de caudal.

Una vez obtenidos los datos de caudal, velocidad y ancho superficial se realizan los cálculos para la determinación de las demás características hidráulicas referenciadas en la tabla 4.

Tabla 4 Ecuaciones para cálculo de características hidro-geométricas

Parámetro	Ecuación	Variables
Caudal	$Q = \frac{q(C_2 - C_0)}{(C_1 - C_2)}$	Q = Caudal Total C₀ =Concentración de inyección. C₁ = Concentración Inicial de flujo. C₂ = Concentración final.
Velocidad	$v = d/t$	v = Velocidad media. d = Distancia. t = Tiempo.
Área Mojada	$A = \frac{Q}{v}$	v = Velocidad media de la sección. Q = Caudal ($\frac{m^3}{s}$). A =Área transversal
Profundidad Hidráulica	$D_H = \frac{A}{T}$	A = Área Transversal. T = Ancho de lámina libre. Para establecer la energía del flujo contemplamos la ecuación.
Perímetro Mojado	-	Con la obtención de los datos medidos y las correlaciones matemáticas se explorará un ajuste matemático para este valor, el cual comúnmente no se puede obtener para cauces naturales
Energía Del Flujo	$E = D_H + \frac{v^2}{2g}$	E = Energía del flujo. D_H = Profundidad Hidráulica v = Velocidad media. g = Gravedad ($\frac{m}{s^2}$).
Número De Froude	$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD_H}}$	v = Velocidad media de la sección (m/s), D_H = Profundidad hidráulica. ($\frac{A}{T}$), g = Aceleración de la gravedad ($\frac{m}{s^2}$).
Radio Hidráulico.	$R_h = \frac{A}{P}$	R_h = Radio hidráulico. (m), A = Área. (m ²), P = Perímetro mojado. (m).
Rugosidad	$n = \frac{\sqrt[3]{R_h^2}}{v} \sqrt[2]{S}$	n = Rugosidad, R_h =Radio hidráulico. (m), v =Velocidad. ($\frac{m}{s}$), S =Pendiente.

Nota: Ecuaciones por variable a manejar en la investigación, por Felipe Guarín 2019

El cálculo de velocidades se realizó a través de la diferencia de tiempo entre la concentración máxima y la concentración inicial. La inyección de trazadores en este caso es puntual, se hace durante 10 segundos, sin embargo, se registran segundo a segundo entre 90 y 120 datos para dar el tiempo de estabilización suficiente al flujo y poder identificar el pico de concentración con mayor facilidad.

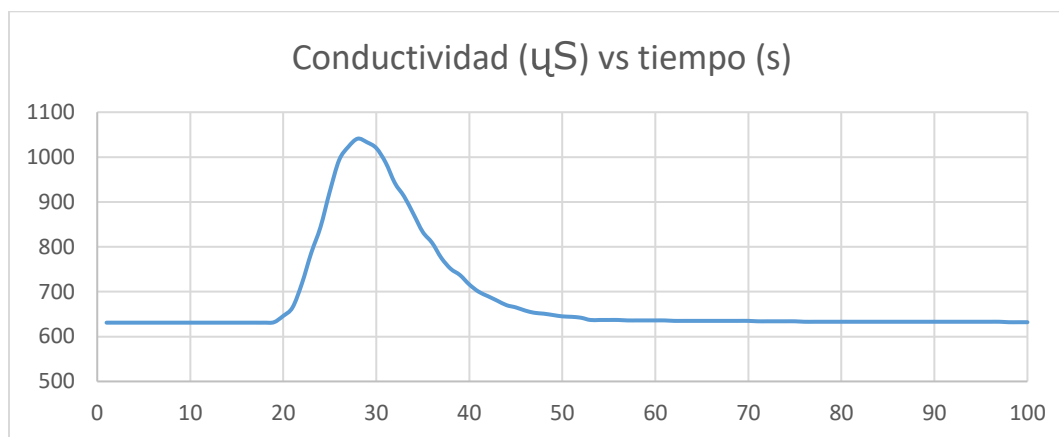


Figura 4 Curva típica de un ensayo de inyección de la solución salina para el cálculo de Velocidad.

En este caso, la velocidad se calcula desde el segundo 0 hasta el valor medio entre que comienza a ascender la curva y alcanza el pico máximo (el segundo 25), el tramo evaluado es de 4.5m, por tanto, la velocidad resultante en este caso es de 0.18m/s.

Determinar el perímetro hidráulico es el parámetro hidráulico más complejo en esta investigación, ya que matemática y geométricamente no se comprende una forma de obtener éste parámetro si se desconoce la forma de la sección a analizar. Para esto inicialmente se realizará una comparación entre las variables previamente obtenidas y el dato conocido, con ello se realiza una regresión por covarianzas para determinar los parámetros que influyen significativamente en la determinación de éste. La regresión se evalúa con la forma:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

Ecuación 3 Regresión para cálculo de perímetro mojado.

Tal qué: $\hat{y}$ = Perímetro hidráulico. β =Constante obtenida por covarianzas. x = Parámetro evaluado.

Inicialmente se evaluará por éste método, sin embargo, esta sección está sujeta a cambios, puesto que de acuerdo a los datos obtenidos se llevarán a cabo experimentos con aproximaciones

geométricas y matemáticas por paralelepípedos y con esto establecer que método ofrece mayor precisión.

Basados en estos parámetros se puede obtener el valor de rugosidad de la sección evaluada., puesto que normalmente para el análisis de la rugosidad del lecho del canal se realizan muestreos del suelo y se aproxima el valor de ésta de acuerdo al material observado. En éste caso, la rugosidad que se obtiene es un valor único para el tramo evaluado, teniendo así un valor más aproximado a la realidad.

8.3.Etapa 3. Análisis de datos

Una vez obtenidas las características hidro-geométricas del canal en cuestión, se realizará un análisis de precisión por nivel de precisión y con esto determinar la aproximación con los datos reales, así se determina la efectividad de la metodología planteada.

Inicialmente se compararán los datos que ya están previamente comprobados, como lo son datos de velocidad, caudal, área transversal y ancho superficial. Con ello se verifica la precisión en aplicación del conjunto de trazadores y fotogrametría para determinar éstas características.

Posteriormente se observará la relación en las características obtenidas a través de las aproximaciones matemáticas generadas con el ancho superficial obtenido por la fotografía, entre estas se encuentra energía, número de Froude, profundidad hidráulica y en especial el perímetro mojado y la rugosidad, los cuales son los valores comúnmente asumidos en la mayoría de estudios hidráulicos de canales no prismáticos.

9. Resultados y análisis

9.1. Diseño del canal no prismático

El proyecto se basó en el uso del canal hidráulico Flow Channel FC300-7m, como modelo principal de canal, puesto que las condiciones de los tanques y la presión que ejercen la bomba hidráulica sobre el flujo generan las condiciones ideales para evaluar diferentes caudales a distintas pendientes.

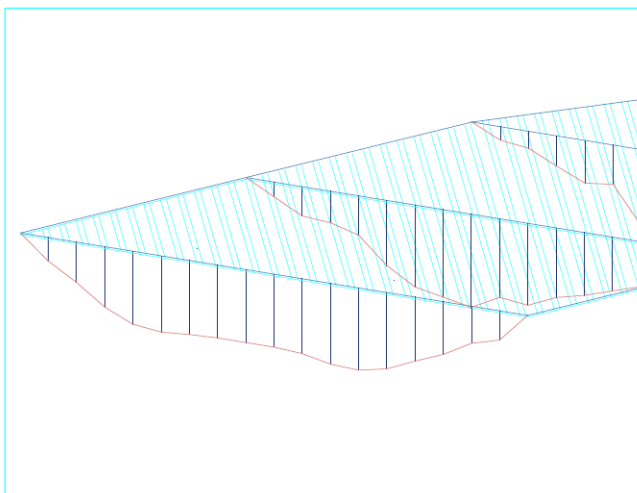


Figura 5: Vista transversal canal no prismático Fuente: Elaboración propia a partir de software de diseño AutoCAD

Se adaptó en éste un canal de menor tamaño en el que se le aplicaron las modificaciones pertinentes para conseguir un canal de características no prismáticas donde se evaluaron los siguientes parámetros:

1. Selección de materiales de revestimiento no erosionables: Para esto, se evaluaron los principales materiales usados para la construcción de canales experimentales, teniendo en cuenta la rugosidad y maleabilidad de éstos para la definición de las características geométricas no prismáticas, se encuentran frecuentemente concreto, mampostería, acero, hierro fundido, madera, vidrio, plástico, entre otros.

Para la selección del material de revestimiento óptimo en el desarrollo del proyecto se evaluaron características como la maleabilidad, rugosidad, dureza, peso y costo de implementación. Como materiales de revestimiento se contemplaron materiales como concreto,

gravilla, plastilina, rocas naturales polipropileno y fibra de vidrio reforzada con resina poliéster. Sin embargo, cada material mencionado ofrece ventajas y desventajas para su implementación en el proyecto que se interpretaron para seleccionar el material de preferencia.

Tabla 5 Materiales de revestimiento evaluados para la construcción del canal.

Material	Maleabilidad	Peso	Rugosidad	Dureza	Costo de implementación
Concreto	Baja	Alto	Alta	Alta	Medio
Plastilina	Alta	Alta	Baja	Baja	Alto
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	Alta	Bajo	Media	Alta	Medio

Nota: Parámetros de selección de materiales de revestimiento, por Felipe Guarín 2019

2. Luego de revisar los anteriores materiales, se llegó a la determinación que el material de revestimiento ideal para esta investigación es la fibra de vidrio reforzada con resina poliéster. Dado que se adapta a la forma deseada y puede moldearse sobre formas definidas en otros materiales como polipropileno o cartón, así como una alta resistencia química y mecánica. Una vez que la resina se endurece toma una rigidez que no permite el cambio en la geometría establecida. Esto se suma a que es un material liviano, lo que facilita la manipulación del canal. En la Figura 6 se puede observar el canal en sus etapas finales de construcción. Caudal: Como parámetro de diseño se tomó un caudal mínimo de 0.5 l/s y un máximo de 2.5 l/s ya que se asumió el valor del radio de la tubería y de acuerdo a las pendientes que entrega el banco hidráulico, se calculó el caudal máximo y cuatro veces el valor de éste para realizar cada corrida; dada el área podía entregar velocidades entre 0.076 y 0.25m/s. Las velocidades manejadas fueron relativamente bajas dadas las dimensiones del canal empleado; con esto, además, permitía la operación del canal y la toma de datos por un único operador.
3. Velocidad mínima permisible. De acuerdo a las características del agua evaluada, este parámetro puede ser descartado, (MARIN, 2012).
4. Pendiente del canal. Para este estudio utilizaron las pendientes 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75% y 1%. Se observó el comportamiento hidráulico bajo estas condiciones diferenciales, en éste caso, el diseño de las pendientes obedece al banco hidráulico, que se encuentran entre - 0.5% y 2.5%.

5. Borde libre. El borde libre del canal de diseño con revestimiento es el borde máximo para evitar el desbordamiento del flujo en el canal, este varía de acuerdo a la velocidad del flujo, la rugosidad del material de revestimiento y el ángulo convexo de las curvas presentes en el mismo. Para la definición de esta característica, de acuerdo al Bureau of Reclamation se usó la ecuación

$$F = \sqrt{Cy}$$

Ecuación 4 Cálculo de borde libre.

Tal que: F es el borde libre en metros, y es la profundidad en metros del agua en el canal, y C es un coeficiente que varía desde 1.5 para canales con capacidad de 0.566 m³/s hasta 2.5 para canales con capacidades de 85 m³/s o más. (Chow, 2004)

6. Sección hidráulica óptima: Para la definición de ésta característica normalmente se asume una geometría específica de acuerdo a la vocación del canal, sin embargo, como el canal a diseñar tiene unas características geométricas no regulares, se definió en función del caudal máximo, que fue 2.5 l/s.
7. Largo: Se manejó una sección de seis metros para desarrollar la metodología, esto teniendo en cuenta que la longitud del banco hidráulico es de 7 metros, así, se tuvo un rango de un metro para operar la estabilización del caudal y los elementos necesarios para encausar el flujo deseado en el canal experimental.
8. Dimensiones estimadas: El canal base, es de siete metros de largo, 0.3m de ancho y 0.4m de alto, para el canal experimental que se maneja al interior del mismo es de 6 metros de largo, 0.23m de ancho y 0.127m de alto, esto, como medida máxima, puesto que el canal modificado es de forma circular, usando como base la mitad del diámetro de una tubería de PVC de 10”.



Figura 6 Canal en etapa final de construcción

El borde libre se tomó de dos centímetros dado el material base del canal, sin embargo, como medida de seguridad para evitar desbordes se tenía el banco hidráulico, que tiene un alto de 0.4m y de acuerdo al cálculo del borde libre recomendado en Bureau of Reclamation es de 0.38m (para canales con capacidad de 0.57m³/s). Aunque la capacidad del modelo no superaba los 3 l/s.

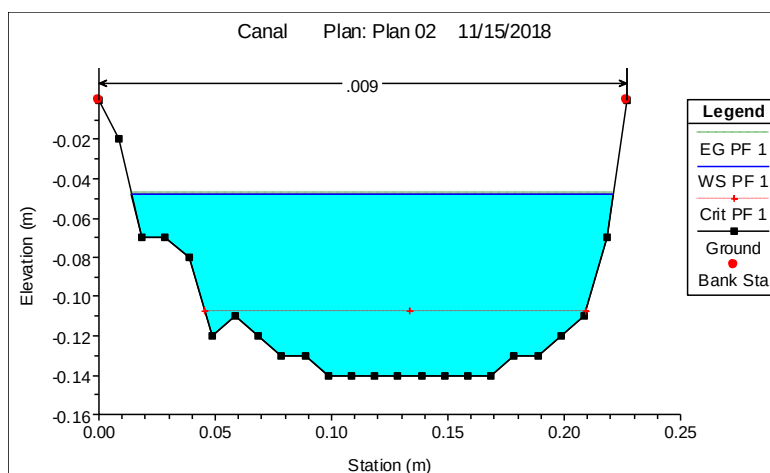


Figura 7 Corte transversal de una sección del canal no prismático, elaborado mediante el Software Hec-Ras. Fuente: Autor.

Las dimensiones finales del canal son 22.7 cm de ancho, 14 cm de profundidad máxima y 5.5 metros de largo.

9.2.Elaboración del canal.

El proceso de elaboración del canal presentó varias fases; inicialmente el tubo de PVC se cortó a lo largo y sobre la mitad del diámetro, y una vez cortado el canal se ubicaron las formas irregulares tanto el polipropileno como en otros materiales reciclados (Cartón, plástico, entre otros) y que le permitieron dar las características no prismáticas. Posteriormente estas figuras se cubrieron con la mezcla de resina poliéster pre-acelerada con el respectivo catalizador (metil-etil-cetona), se impregnó la superficie, se cubrió con la fibra de vidrio y se aplicó más resina sobre la misma hasta que la fibra quedó totalmente impregnada de 10kg de resina y 1kg de fibra de vidrio.

9.3. Medición de características hidro-geométricas independientes del canal.

9.3.1.1. Geometría del canal.

Luego de construir el canal se realizó una medición detallada del mismo para obtener las características geométricas del canal. El propósito de estas mediciones es que la aproximación a la realidad más cercana posible, por tanto, se manejaron 244 secciones transversales a lo largo de la sección de 4.5 metros, divididas a su vez en 22 medidas de profundidad en cada sección, para un total de 5.386 datos de todo el tramo.

Una vez tomadas las medidas de profundidad se esquematizaron las secciones en el software de diseño AutoCAD (Ver Figura 8) y se obtuvo una matriz de datos de las profundidades cada dos centímetros (2, 4, 6, 8, 10, 12, 13 y 14 cm) que ofrecen la información real de la geometría de cada sección, perímetro y ancho superficial, en función de la profundidad.

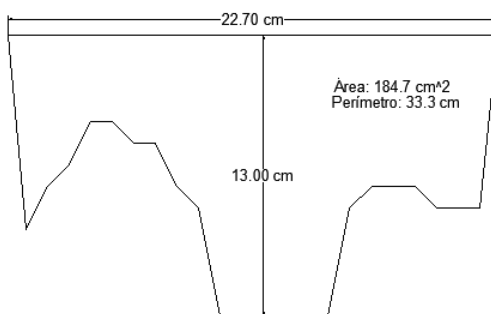


Figura 8 Sección transversal #206 del canal con profundidad de 13 cm y ancho superficial de 22,7cm.

Una vez realizada la medición detallada de cada sección, se calculan los valores medios del canal para realizar los cálculos hidro-geométricos. Cada medición manual tomó aproximadamente diez minutos, luego, cada digitalización tomó entre 15 y 20 minutos para el cálculo de las características hidro-geométricas, y teniendo en cuenta que fueron 244 secciones medidas, para un total de tiempo requerido para la caracterización geométrica del canal por el método de vadeo de 90 horas.

Es importante resaltar que a pesar del nivel de detalle de la medición y de las variaciones en los datos se trabajó con el valor medio, dada la naturaleza de un canal no prismático, en donde,

por lo general existen resultados atípicos, sin embargo, los valores de desviación podrían ser aceptables (no mayores al 20% de la media) y no representan un sesgo estadístico relevante que implique un tratamiento adicional.

Tabla 6 Resumen numérico de los promedios de área, perímetro y ancho superficial resultante de las medidas en las 244 secciones transversales

Profundidad cm	Valores promedio $\bar{X}$		
	Área (cm ²)	Perímetro (cm)	Ancho Superficial (cm)
2	19.13	14.63	11.92
4	47.29	22.45	16.19
6	84.83	27.87	19.02
8	124.09	34.73	20.81
10	165.37	39.12	21.70
12	209.51	41.65	22.34
13	235.40	44.93	22.70
14	251.32	44.39	22.70

Nota: Promedios de cálculo de geometría de canal, por Felipe Guarín 2019

9.4. Cálculo de las características hidro-geométricas del modelo hidráulico calculadas por el método de vadeo y por el método de trazadores y fotogrametría.

9.4.1.1. Medición de Caudal.

El *método vadeo área-velocidad* requiere para el cálculo de caudal la medición de la velocidad, por lo general, en cuerpos hídricos se toma esta información por medio de un molinete, sin embargo, en el caso específico del modelo establecido, el uso de un molinete se dificultaba debido a las dimensiones mismas del canal, ya que para que funcione de manera eficiente el mismo, el canal debe tener una lámina mayor a los 10cm como mínimo y en los experimentos, con el caudal máximo que permite el canal, la lámina obtenida no superaba los 9cm. Por tanto, para el cálculo del caudal inicialmente se pensó basarse en el medidor automático que tiene instalado el canal Flow Channel FC300-7m, sin embargo, este medidor tiene una limitante: Es sensible para caudales mayores a los 2.0 l/s y tiene un sesgo en la medición entre 0 y 0.5 l/s. Por esto, al utilizarse como

método de validación del caudal presento sesgos en la medición y variaciones perceptibles en los cálculos.

Teniendo en cuenta esto, para caudales menores se utilizó el método volumétrico, que consiste usar un recipiente y cronometrar el tiempo que tarda en llenarse. Para el cálculo de los caudales entre 0,5l/s y 2l/s se usó vertedero del banco hidráulico, el cual es un vertedero triangular equilátero y que se realiza por medio de la ecuación:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \left(\tan \frac{\beta}{2} \right) H^{5/2}$$

Ecuación 5 Calculo de caudal por vertedero triangular Fuente: (Marbello, 2005)

Dónde: **Q** = Caudal. **C_d**= Coeficiente de descarga. **g**= gravedad, **H**= Altura de la cresta.(Marbello, 2005). **β**=Ángulo de apertura.

Cabe aclarar que en el experimento con pendiente 0 y caudal aproximado de 0.5 hubo un error de ejecución y los datos tomados fueron descartados después del procesamiento. Asimismo, los caudales en los experimentos de 0.5 l/s se midieron a partir del método volumétrico, entre los caudales de 1 l/s y 2 l/s se calcularon mediante el método de vertedero triangular y finalmente los caudales de 2.5 l/s se calcularon con el medidor automático del banco hidráulico.

Estas técnicas de medición permitieron hallar los siguientes resultados a distintas pendientes y un caudal esperado:

Tabla 7 resultados de cálculo de caudal por método volumétrico, vertedero y medidor automático

Pendiente	Caudales				
	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.463	0.981	1.522	1.896	
0.25	0.417	0.916	1.522	1.703	2.400
0.5	0.442	0.998	1.522	1.847	2.400
0.75	0.462	0.948	1.436	1.997	2.400
1	0.441	0.981	1.415	1.798	2.500

Nota: Calculo de caudal por método volumétrico, vertedero y medidor automático, por Felipe Guarín 2019

Para el cálculo de caudal con trazadores, teniendo las curvas de calibración del equipo calculadas, se procedió a obtener las concentraciones en unidades de [mg/L] en cada punto de

medición. Entonces, el procedimiento a seguir fue utilizar la ecuación de la curva de calibración para realizar la conversión de datos de concentración salina y con estos datos operar la ecuación para encontrar los valores de caudal, de los cuales se realizaron las respectivas réplicas de la corrida para validar los resultados (Ver tabla 15).

Tabla 8 Resultados cálculo de caudal a través de trazadores, validada por duplicado.

Pendiente Corrida	Caudal (l/s)									
	0.5		1		1.5		2		2.5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	0.486	0.520	1.047	0.996	1.950	2.080	2.020	2.070		
0.25	0.549	0.597	1.020	1.030	1.890	1.900	1.739	1.874	2.039	2.197
0.5	0.452	0.456	1.060	1.190	1.910	1.970	2.006	1.986	2.272	2.325
0.75	0.571	0.552	1.240	1.270	1.530	1.580	2.070	2.164	2.402	2.565
1	0.434	0.465	1.380	1.340	1.740	1.820	2.054	2.106	2.286	2.410

Nota: Cálculo de caudal a través de trazadores, por Felipe Guarín 2019

El cálculo de caudales a través de trazadores puede, a diferencia de los métodos anteriores, ser más exacto en la medida que los datos recogidos son completamente automatizados y las variaciones que se pueden presentar, cambian dependiendo del cuerpo hídrico y su capacidad de mezcla, distribución, zonas muertas, etc.(Zambrano, 2004) y su mayor limitante es el trazador en sí, ya que los salinos solo pueden ser usados en cauces muy pequeños, mientras que en cauces mayores se requieren trazadores más especializados como los ionizantes.

Las mediciones de caudal por lo regular tienen una variación significativa entre los métodos, esto se debe a diferentes factores, entre los que se encuentran los sesgos de medición o errores de calibración en los equipos, sin embargo, las relaciones entre los caudales calculados por las metodologías utilizadas en el trabajo ofrecen una aproximación bastante aceptable.

Tabla 9 Porcentaje de aproximación entre los caudales calculados.

Pendiente	Porcentajes de aproximación				
	Caudal				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	92.0	96.1	75.5	92.7	
0.25	72.7	89.3	80.3	94.3	86.7
0.5	97.4	88.7	78.4	92.5	95.6
0.75	82.2	75.5	92.3	94.3	96.6
1	98.0	72.2	79.5	86.4	93.5

Porcentaje de aproximación media	87.62%
-------------------------------------	--------

Nota: Porcentaje de aproximación entre caudales, por Felipe Guarín 2019

Los niveles de aproximación en los caudales tienen un porcentaje de similitud del 87.62%, es decir, el porcentaje de error medio es de 12.48%. Es una variación relativamente aceptable, ya que se pueden presentar múltiples condiciones que pueden llevar a presentar una desviación en su lectura.

Asimismo, el uso de trazadores para el cálculo de caudal es usado ampliamente para caracterizaciones de flujo, esto puede reflejarse en su empleo para el desarrollo de diferentes trabajos, diferentes autores lo validan como un método confiable, como los trabajos de “Caracterización hidrogeológica de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Mañihuales, Región Aysén , mediante trazadores isotópicos y hidroquímicos” o en el trabajo de grado titulado “determinación de las características hidro-geométricas de un río de montaña y su posterior implementación en un modelo de calidad del agua realizando trazadores de largo alcance. caso de estudio: Río Teusacá” (González, L.1, González, A.1, Saavedra & (1), 2009; Zambrano, 2016)

Sin embargo, al hablar de la exactitud del método o cual refleja más la realidad es un poco más complejo, puesto que los métodos utilizados para validar tienen un gran componente de medición manual, como lo es la medición por vertedero o volumétrica en canales pequeños, donde una variación pequeña en la medición puede alterar de manera significativa el resultado, a diferencia de la medición por trazadores, donde los datos recolectados son completamente automatizados y los posibles sesgos puedan atribuirse a la calibración de los equipos.

9.4.1.2. Medición de profundidad de la lámina de agua

Por cada corrida se midieron 4 profundidades a lo largo del canal, estas se promediaron para obtener la profundidad media del flujo y con esta medida calcular los parámetros hidro-geométricos consiguientes (Área, perímetro, ancho superficial y los dependientes de éstos).

Tabla 10 Resultados de profundidad hidráulica por vadeo.

Pendiente	Profundidad (cm)				
	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.048	0.071	0.089	0.083	

Nota: Cálculo de profundidad hidráulica método de vadeo, por Felipe Guarín 2019

0.25	0.048	0.072	0.083	0.079	0.090
0.5	0.046	0.073	0.078	0.078	0.088
0.75	0.044	0.069	0.075	0.081	0.080
1	0.041	0.064	0.073	0.075	0.080

Para una misma pendiente (Igual que en los canales naturales) la profundidad se incrementa conforme al caudal, presentándose en algunos casos en donde los caudales son distintos pero el valor de la profundidad es el mismo. Esto sucede como consecuencia de la disparidad de la forma del canal, siendo más angosto en la parte baja con respecto al alta, lo que lleva a que cualquier incorporación en los primeros caudales conlleva a un cambio elevado de la altura de lámina de agua con respecto a niveles superiores del área transversal.

Ya en la parte superior de la sección transversal se presentan secciones más anchas que limitan el cambio en la altura a variaciones mínimas, las cuales son acotas por las aproximaciones matemáticas, y por tanto aportando valores similares en escenarios distintos de los caudales más grandes evaluados.

9.4.2. Profundidad hidráulica.

La relación entre área transversal y ancho superficial, que da como resultado la profundidad hidráulica, muestra una aproximación a la profundidad media de flujo. Los valores de profundidad son, en su mayoría, coherentes al comportamiento de flujo, en el sentido que, a mayor caudal, mayor debe ser la profundidad de este; sin embargo, hay cierta variación en los valores de profundidad con respecto a la pendiente. Esta variación puede deberse a varios factores, entre los que pueden tomar un papel importante la forma del canal y el que no es un canal prismático, lo que lo hace único y se debe analizar conforme a su comportamiento en diferentes profundidades y caudales. (Ruiz, 2008)

Tabla 11 Resultados cálculo de profundidad hidráulica

Profundidad hidráulica.(m) trazadores						Profundidad hidráulica.(m) por Vadeo.					
Caudal (l/s)						Caudal (l/s)					
Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5	Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.046	0.053	0.083	0.068		0	0.040	0.058	0.069	0.066	
0.25	0.050	0.053	0.079	0.058	0.068	0.25	0.040	0.059	0.065	0.063	0.069
0.5	0.040	0.051	0.069	0.062	0.059	0.5	0.038	0.059	0.062	0.062	0.068
0.75	0.044	0.068	0.056	0.060	0.070	0.75	0.036	0.057	0.060	0.064	0.063
1	0.043	0.072	0.065	0.067	0.067	1	0.033	0.053	0.059	0.060	0.064

Nota: Resultados cálculo de profundidad hidráulica ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

El porcentaje de aproximación refleja un alto nivel de confiabilidad en los datos, con un porcentaje de error del 11.64% se observa una buena confiabilidad, por tanto, es factible calcularse la profundidad hidráulica de un flujo por medio de trazadores y fotogrametría, establece la posibilidad de tener la profundidad aproximada del canal sin necesidad de entrar directamente en el flujo, facilitando el estudio hidráulico de canales naturales de gran tamaño, puesto que, al manejar una metodología no intrusiva al flujo se descartan posibles riesgos al operario, obteniendo información con muy alto nivel de precisión y descartando a su vez, posibles sesgos de medición.

Tabla 12 Porcentaje de semejanza entre las profundidades hidráulicas calculadas por los métodos de vadeo y trazadores

Porcentaje de aproximación					
Pendiente	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	86.198	90.449	82.646	95.658	
0.25	80.291	89.945	82.806	91.837	97.897
0.5	96.953	83.334	90.436	99.698	85.488
0.75	82.254	83.045	92.942	92.569	90.694
1	77.031	74.254	91.124	90.044	95.450
Porcentaje de aproximación media			88.46%		

Nota: Porcentaje de aproximación entre profundidad hidraulica, por Felipe Guarín 2019

Este valor posee un grado de aproximación con respecto a la profundidad medida en el cauce del canal no prismático superior al 75%. (Figura 9)

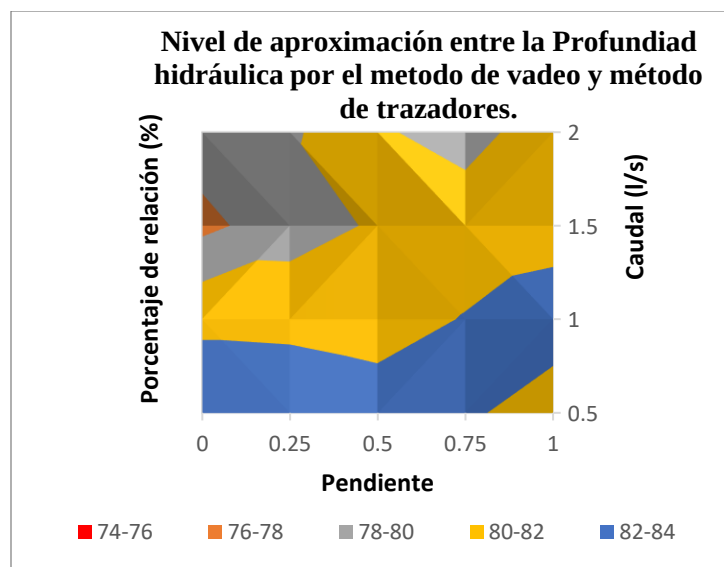


Figura 9 Relación entre profundidad hidráulica y profundidad de lámina.

En la gráfica se observa un comportamiento fuertemente relacionado en todas las pendientes a caudales bajos, entre menor es el valor de pendiente mayor proximidad hay entre los valores; sin embargo, en pendientes bajas con caudales mayores hay una desviación mayor entre los valores de las dos metodologías, en el resto de las pendientes a caudales medios, el porcentaje de relación se mantiene estable entre el 80 y 82%. Los valores de relación entre la profundidad hidráulica y profundidad de lámina tienen una fuerte relación y en varios puntos es muy semejante. El que la profundidad hidráulica tenga un porcentaje de aproximación ponderado total del 80.63%

Asimismo, La profundidad hidráulica hallada a través del método de trazadores posee una correlación con los valores de la profundidad de la lámina de agua del cauce de estudio. Es así como de las 24 mediciones 15 tienen una aproximación promedio entre 80 y 90% y las otras 9 mediciones restantes tienen una aproximación promedio entre el 70 y el 80%, dejando como máximo porcentaje de error un 22.83 y como mínimo porcentaje de error un 16.76%, la profundidad hidráulica se haya a un 80.3% de la profundidad de lámina de agua medida desde la superficie, de manera que a partir del dato de la profundidad hidráulica se puede hallar la altura de lámina de agua a mediante la adición del 20% de su valor. Esto da un porcentaje de aproximación medio del 96.75% a la altura de lámina, lo que establece un porcentaje de confiabilidad muy alta.

Tabla 13 Tabla de valores de aproximación entre valores de profundidad hidráulica y profundidad de lámina.

Porcentaje de aproximación entre el valor medido de la profundidad de la lámina de agua con respecto a la calculada por la profundidad hidráulica.

Pendiente	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	99.893	97.978	93.011	94.700	
0.25	99.893	97.853	94.850	95.954	92.636
0.5	99.455	97.469	96.311	96.240	93.322
0.75	98.768	98.516	97.138	95.223	95.737
1	97.293	99.499	97.534	97.138	95.591
Porcentaje de aproximación media		96.75%			

Nota: Tabla de aproximación de valores de profundidad de lámina y profundidad hidráulica, por Felipe Guarín 2019

De acuerdo a esta condición expuesta, es posible y confiable el cálculo de profundidad de lámina a través del cálculo de la profundidad hidráulica calculada a través de trazadores y fotogrametría.

9.4.3. Área mojada

El cálculo de área mojada a través del **método de vadeo** se realiza mediante los vértices y puntos de intersección de cada polígono, siendo el límite que define estos la profundidad evaluada, esta profundidad establece, a su vez, una relación directamente proporcional al área, lo que permite interpolar los valores medios.

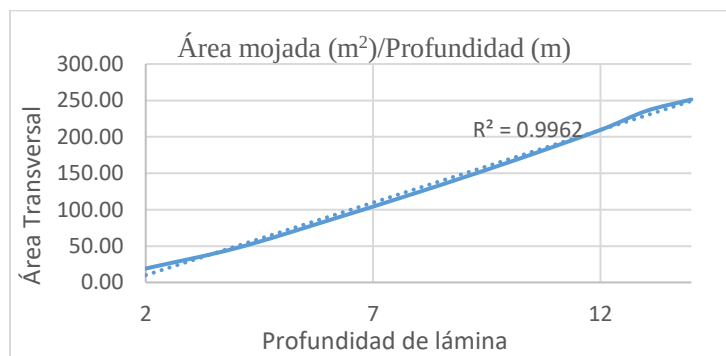


Figura 10 Relación de área transversal-profundidad por el método de vadeo

$$Area\ transversal(cm^2) = 19.94 * (profundidad\ (cm)) - 29.869$$

Ecuación 6 Ecuación de área transversal

Esta relación lineal establece una ecuación de la recta a través de la línea de tendencia que permite calcular los valores de área con respecto a la profundidad. A través de esta relación se generan los valores de área transversal.

El área mojada medida a través del método por trazadores se calcula relacionando el caudal y la velocidad media ($Q=V*A$), estos factores se calculan directamente con la información recolectada con los cálculos por trazadores.

Asimismo, el tiempo involucrado para el levantamiento de esta información en laboratorio por medio de la técnica de trazadores fue de 10 minutos por corrida, para un total de corridas de 25, involucró un total de 250 minutos (4 horas), con la cual se logró obtener los valores de caudal, velocidad, área mojada y perímetro mojado, por lo que se convierte en una reducción en tiempos de alrededor del 95,5% si se desarrollara el levantamiento de las características geométricas por vadeo.

Tabla 14 Resultados cálculo de área transversal calculada por los métodos de vadeo y trazadores.

Área mojada (m ²) por trazadores						Área mojada (m ²) por Vadeo.					
Caudal (l/s)						Caudal (l/s)					
Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5	Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.006	0.009	0.012	0.013		0	0.007	0.011	0.015	0.014	
0.25	0.007	0.009	0.012	0.010	0.013	0.25	0.007	0.011	0.013	0.013	0.015
0.5	0.005	0.008	0.012	0.011	0.011	0.5	0.006	0.012	0.012	0.013	0.014
0.75	0.006	0.009	0.010	0.011	0.013	0.75	0.006	0.011	0.012	0.013	0.013
1	0.006	0.012	0.011	0.012	0.012	1	0.005	0.010	0.012	0.012	0.013

Nota: Cálculo de área transversal, por Felipe Guarín 2019

Tabla 15 Porcentaje de proximidad entre el área mojada calculada por los métodos de vadeo y trazadores.

Porcentaje de aproximación					
Caudal (l/s)					
Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5
0	93.137	73.139	79.713	92.568	
0.25	96.303	66.823	86.022	78.101	83.074
0.5	80.712	57.501	95.568	87.669	69.829
0.75	97.790	78.384	75.332	80.326	99.562
1	93.555	85.431	93.616	100.000	93.652
Porcentaje de aproximación media					
			84.91%		

Nota: Porcentaje de aproximación entre el área mojada por los dos métodos, por Felipe Guarín 2019

El porcentaje de variación del área mojada es mayor que el porcentaje de variación del caudal, en este caso disminuye al 84.91%. Este nivel de porcentaje se puede deber a diversos factores, entre ellos entra la variación misma generada por la diferencia en los caudales, al porcentaje de desviación que arroja la correlación de profundidad-área del modelo por vadeo y a la toma de las profundidades.

A su vez, los valores de área varían de acuerdo a la pendiente, sin embargo, esta variación no es tan notoria como es la variación con respecto al caudal, como se observa en la figura 11.

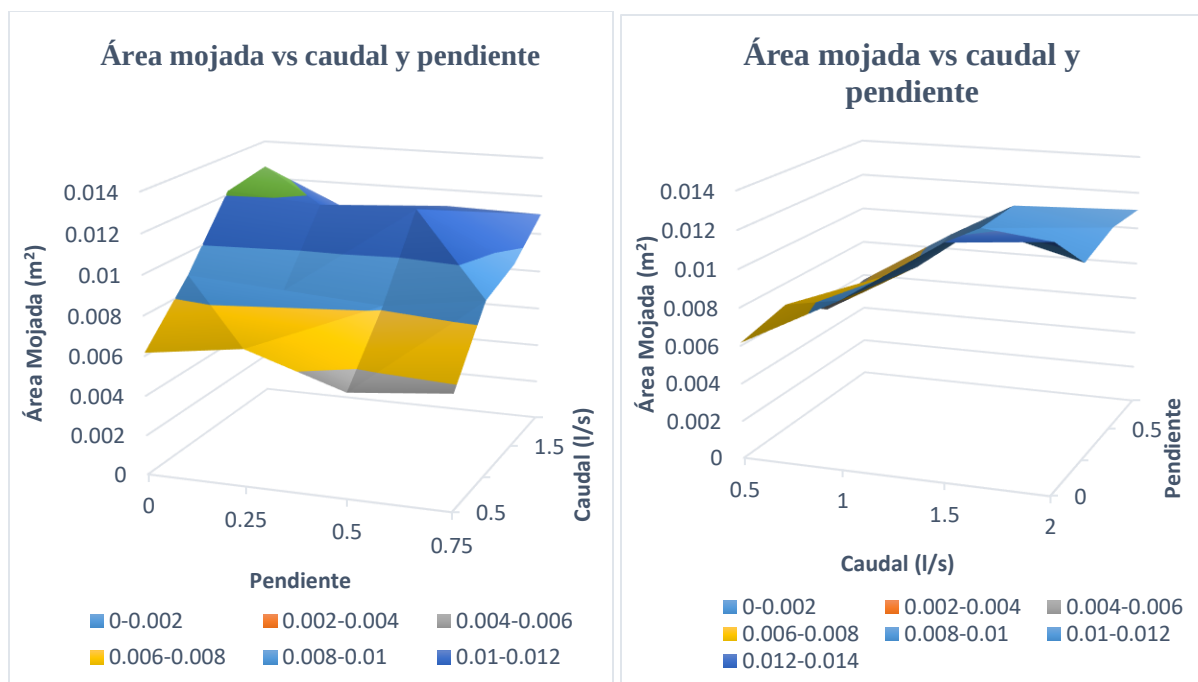


Figura 11 Grafica de relación Área mojada-Caudal-Pendiente

El comportamiento del área mojada con trazadores presenta las mismas consideraciones que por método de vadeo, representado en un comportamiento ascendente conforme se incrementa el caudal en la pendiente de estudio, pero que en ocasiones el patrón en los resultados se ve alterado por valores similares a diferentes caudales, lo cual se puede atribuir a la disparidad de la forma del cauce, en donde, se presenta características angostas en el fondo y más amplias en la parte superior de la sección transversal, que conllevan variaciones grandes del área a caudales bajos y pequeñas variaciones entre caudales mayores, que originan que la diferencia de las áreas sea muy pequeña y por aproximaciones decimales se interprete que es el mismo valor.

En la gráfica 11 se puede observar un comportamiento de crecimiento estable del área mojada en relación al caudal, sin embargo, en relación a la pendiente tiende a mantenerse estable o disminuir paulatinamente. Es un comportamiento esperado, puesto que, a mayor caudal, mayor profundidad de flujo y por tanto mayor área, a su vez, al incrementarse la velocidad dado el incremento de la pendiente (mas no el caudal) el área transversal disminuye o se mantiene estable. (Bos, Replogle, & Clemmens, 1986)

El cálculo de área mojada por medio de trazadores es usado en menor medida para caracterizaciones hidro-geométricas de canales naturales o no prismáticos, ya que, en lugar de ser una medición directa de la geometría del canal, se realiza por medio de la ecuación de continuidad, como es el caso del trabajo de Zambrano, 2004, que a través de esta metodología basa los cálculos hidro-geométricos dependientes para el desarrollo de un modelo de calidad de agua.

9.4.3.1. Ancho superficial

El cálculo de ancho superficial por **el método de vadeo** se realiza de manera semejante al cálculo de área transversal y perímetro mojado (medición directa centímetro a centímetro). Este ancho superficial se relaciona por medio de una regresión lineal asociada con la profundidad de lámina de agua del cauce y de acuerdo a las secciones transversales medidas, esta información a su vez se genera con los datos de la esquematización realizada, proyectando los valores de ancho en relación a la profundidad.

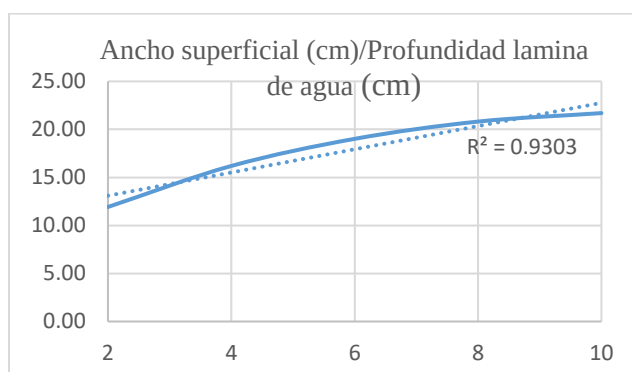


Figura 12 Relación profundidad-ancho superficial por el método de vadeo

$$\text{Ancho Superficial (cm)} = 1.2082 * (\text{profundidad (cm)}) + 0.9303$$

Ecuación 7 Ancho superficial

A través de la ecuación planteada, por medio de las profundidades de lámina de agua medidas en los experimentos se interpolan los valores de ancho superficial, estas mediciones tienen un comportamiento particular, puesto que a diferencia del área transversal su crecimiento no es estrictamente proporcional a la profundidad.

El ancho superficial tiene un comportamiento creciente frente a los caudales analizando su comportamiento en cada pendiente (Tabla 9), sin embargo, en el canal observado, al llegar a

valores altos de caudal tiende a estabilizarse y presentar un crecimiento menor que en los valores medios de caudal, debido a la estabilidad de la altura y la forma del canal en la parte superior, la cual es relativamente constante y poco asimétrica.

En el caso de la medición de ancho superficial por métodos fotogramétricos se realizó a través de fotografías capturadas desde una distancia 43 cm por encima del canal, utilizando una base deslizable sobre el mismo, que permite que las fotografías se tomen siempre a la misma distancia focal. Así mismo, a un costado del canal se incorpora una escala métrica, con el fin de escalar las imágenes en el programa de diseño AutoCAD y por medio del mismo realizar las mediciones correspondientes a un nivel de precisión centímetro a centímetro, estas mediciones por fotografía duraban entre uno y dos minutos, en total para una corrida tomaba alrededor de 15 minutos.

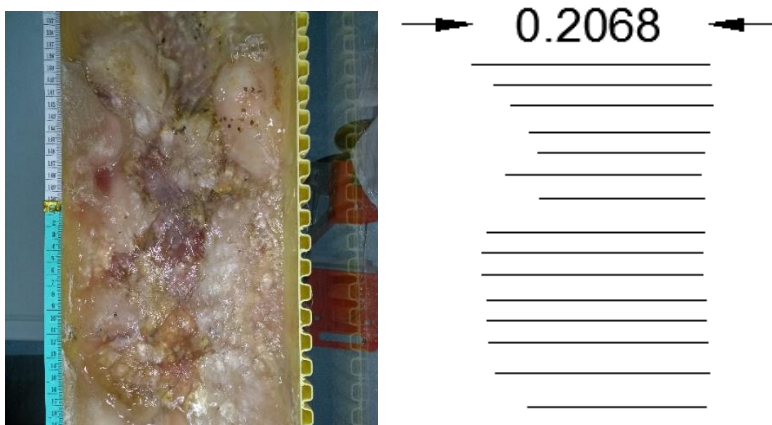


Figura 13 Medición de ancho superficial por medio de fotogrametría.

Por cada corrida se evaluaron 460 mediciones de ancho superficial y posteriormente se promediaron estas para obtener el valor de ancho superficial medio expuesto en la tabla 17, lo cual no sería posible este nivel de precisión con los métodos convencionales.

Tabla 16 Resultados cálculo de perímetro mojado calculada por los métodos de vadeo y trazadores.

Ancho superficial (m) trazadores						Ancho superficial (m) por Vadeo.					
Caudal (l/s)						Caudal (l/s)					
Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5	Pendiente	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.133	0.167	0.182	0.184		0	0.165	0.193	0.214	0.207	
0.25	0.137	0.160	0.185	0.179	0.188	0.25	0.165	0.193	0.206	0.202	0.215
0.5	0.132	0.160	0.174	0.179	0.187	0.5	0.160	0.195	0.200	0.201	0.213
0.75	0.129	0.130	0.169	0.184	0.183	0.75	0.160	0.190	0.197	0.205	0.203
1	0.129	0.160	0.167	0.177	0.183	1	0.157	0.184	0.195	0.197	0.203

Nota: Calculo de perímetro mojado por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

El cálculo del ancho superficial a través de técnicas de fotogrametría es un avance significativo en el estudio de canales hidráulicos, puesto que, al calcular este método de manera remota al canal, facilita el entendimiento de elementos cuyo estudio sin hacer mediciones directas en el flujo no es viable.

La lámina de agua, por lo general debe comportarse de manera contraria a la pendiente, mientras se mantenga el caudal y la pendiente incremente y mayor sea la velocidad de flujo, menor debe ser el ancho superficial, debido a que disminuye también la profundidad de lámina. Sin embargo, este comportamiento es frecuente en canales de características prismáticas, pero al tratarse de un canal de características geométricas no prismáticas y bajo condiciones de flujo variables, el comportamiento del ancho superficial es poco predecible (Ruiz, 2008).

Lo anterior se ve reflejado en los resultados obtenidos, en donde, en la medida que crece el caudal a una misma pendiente, no todas las veces se presentan correlaciones directamente proporcionales, ya que en cauces naturales los cauces se encojen y ensanchan a voluntad. Y sin duda alguna, este comportamiento afectara los parámetros que por relaciones matemáticas se deriven de esta.

El ancho superficial es un parámetro que por lo general es dispendioso para medirse in situ; es un parámetro, que tal como el perímetro hidráulico, se presenta en un canal no prismático en características geométricas indefinidas y varía de manera impredecible a lo largo del cauce. Por tanto, el uso de la fotogrametría logró medir dicho valor con una precisión centímetro a centímetro,

así como obtener los valores en un menor tiempo al procesarlas por softwares especializado que en el caso de la medición in situ.

Tabla 17 Porcentaje de semejanza entre el ancho superficial calculado por los métodos de vadeo y trazadores

Porcentaje de Aproximación					
Pendiente	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	76.026	84.200	82.419	87.692	
0.25	80.058	78.991	88.238	87.301	85.482
0.5	78.790	77.857	84.524	88.007	86.325
0.75	75.738	53.554	83.551	88.605	89.257
1	78.548	84.948	83.253	88.942	88.582
Porcentaje de aproximación media		82.54%			

Nota: Porcentaje de aproximación entre anchos superficiales, por Felipe Guarín 2019

El porcentaje de aproximación en este caso es relativamente bueno, sin embargo, de acuerdo a los métodos de medición, el error o desfase puede atribuirse a la precisión de la medición en los bajos caudales, como es el caso en el método por vadeo, apreciando en la tabla de resultados que en la medida que el caudal se incrementa el valor del porcentaje de aproximación pasa de valores cercanos al 76% al 88% independientemente de la pendiente.

Lo anterior se debe a que el comportamiento del ancho superficial no es completamente proporcional a la profundidad, ya que el ancho superficial varía en gran medida dependiendo de más características del flujo que exclusivamente de la profundidad. Así mismo, para que el valor de ancho superficial se ajuste más al valor real medio de ancho superficial, ya que el ancho superficial puede variar de acuerdo a factores como la pendiente, la velocidad media, la rugosidad del canal, entre otros. (López Alonso, 2005)

9.4.4. Perímetro mojado.

Uno de los mayores retos de este proyecto es la definición del perímetro hidráulico, puesto que para canales no prismáticos no existe un método establecido y definitivo que establezca los valores del perímetro de manera acertada. En el caso del método por vadeo, el perímetro se halla mediante la representación de la longitud del límite que encierra el área mojada que generan los contornos de la forma de las secciones hidráulicas medidas por paralelepípedos.

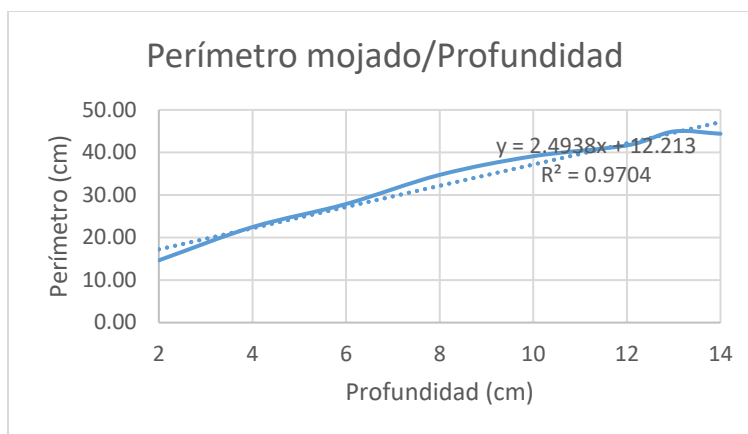


Figura 14 Relación entre perímetro mojado y profundidad.

$$\text{Perímetro mojado (cm)} = 2.4938 * (\text{profundidad (cm)}) + 12.213$$

Ecuación 8 *Perímetro mojado por video.*

La forma del canal al tener un comportamiento no geométrico, presenta ciertas variaciones en la forma del perímetro en cada sección con respecto a la profundidad, el perímetro mojado es un parámetro que, aunque varía en conjunto con el caudal y la profundidad, no es estrictamente proporcional a los mismos, es un parámetro que depende estrictamente de la forma del lecho del canal y varía a lo largo del tramo estudiado (López Alonso, 2005; Zambrano, 2016).

En el caso del perímetro por parte del uso de los trazadores y fotogrametría, una opción para el cálculo del perímetro está en la ecuación de Manning para velocidad media, donde puede despejarse radio hidráulico y a través de éste despejarlo; sin embargo, para esto hay que asumir un valor fijo de rugosidad, lo que aleja el modelo del resultado al que se quiere llegar.

Así pues, Una vez obtenidos los datos por trazadores, se procede a hacer un análisis geométrico del canal y a plantear una expresión matemática que represente el perímetro hidráulico promedio medido en las diferentes secciones a distintas pendientes y diferentes caudales, y correlacionando los parámetros de área mojada y ancho superficial, que se calculan a través de trazadores y fotogrametría respectivamente.

Luego de desarrollar distintas asociaciones matemáticas, se estableció que la expresión del círculo sumada a la raíz del área mojada es la que más se aproxima para hallar el perímetro del cauce:

$$P = \pi D_h + \sqrt{A}$$

Ecuación 9 Ecuación para cálculo de perímetro hidráulico.

Dónde: **P**: Perímetro mojado, **D_h**: Profundidad hidráulica y **A**: Área hidráulica.

La ecuación se establece teniendo en cuenta la variación que presenta el perímetro con respecto al área y la relación o similitud que tiene el canal con una función semicircular-elipsoidal.

Tabla 18 Resultados cálculo de perímetro mojado calculada por los métodos de vadeo y trazadores.

Perímetro mojado por trazadores						Perímetro mojado por Vadeo.					
Pendiente (%)	Caudal (l/s)					Pendiente (%)	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5		0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.224	0.261	0.32	0.327		0	0.216	0.276	0.310	0.300	
0.25	0.239	0.259	0.310	0.285	0.33	0.25	0.216	0.277	0.299	0.292	0.312
0.5	0.197	0.251	0.325	0.301	0.292	0.5	0.211	0.280	0.289	0.290	0.309
0.75	0.215	0.308	0.275	0.294	0.333	0.75	0.205	0.271	0.283	0.297	0.293
1	0.211	0.333	0.31	0.319	0.320	1	0.195	0.260	0.280	0.283	0.294

Nota: Cálculo de perímetro mojado por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

Los resultados de esto son muy promisorios, puesto que presentan un nivel de aproximación a la realidad bastante significativo (92.5%), además que el cálculo de este parámetro es requerido como dato de entrada en la ecuación de velocidad media de Manning para el cálculo de la rugosidad media de un canal sin intervenir directamente en el mismo, ni asumir valores que pueden ser sobre estimados o subestimados.

Tabla 19 Porcentaje de semejanza entre el perímetro mojado calculado por los dos métodos

Perímetro mojado.					
Pendiente (%)	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	96.476	94.173	96.655	91.653	
0.25	90.460	93.072	96.647	97.616	95.858
0.5	92.682	88.063	88.924	96.326	94.377
0.75	95.312	87.888	96.890	98.928	88.117
1	92.238	78.156	90.623	88.642	91.927
Porcentaje de aproximación media					92.57%

Nota: Porcentaje de aproximación entre perímetro mojado por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

De todos los cálculos realizados, el que arroja un mayor porcentaje de semejanza es el cálculo de perímetro mojado, esto es bastante promisorio para la metodología planteada, puesto que al haber una relación tan alta y un nivel de error tan bajo (7.43%), denota un alto nivel de confianza en los datos.

El conocer los valores de perímetro mojado, de manera conjunta con los parámetros hidrogeométricos establecidos anteriormente, es una herramienta indispensable para un gran número de procesos, entre estos, un proceso importante en el que es necesario contar con el perímetro hidráulico entre los cálculos, es la definición de caudales ecológicos para el ordenamiento territorial. (Agualimpia & Castro, 2006; Díez, 2005)

Esto significaría que el cálculo del perímetro también podría estar sujeto a un porcentaje de error que es pertinente considerar para su posible aplicación; así mismo, esta ecuación aporta una aproximación bastante confiable para el canal en cuestión, pero es necesario llevar ésta a una aplicación real en campo, donde se evalúe la precisión de la misma y se analice la posible relación con otros factores.

9.4.4.1. Radio hidráulico.

El radio hidráulico, por su parte, es la relación entre área hidráulica y perímetro mojado, esta relación es necesaria para conocer pérdidas de carga hidráulica y velocidad. Esta relación, permite a su vez conocer el tamaño del flujo y el comportamiento del canal con respecto a su forma.

El conocer la forma del radio hidráulico también permite realizar interpretaciones del comportamiento hidráulico del canal, así mismo, es una base para el cálculo de una serie de características hidro-geométricas, como la pérdida de carga hidráulica o la rugosidad.

Tabla 20 Resultados cálculo de cálculo de Radio Hidráulico calculado por los métodos de vadeo y trazadores.

Radio hidráulico.(m) trazadores						Radio hidráulico.(m) por Vadeo.					
Caudal (l/s)						Caudal (l/s)					
Pendiente (%)	0.5	1	1.5	2	2.5	Pendiente (%)	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.027	0.034	0.038	0.039		0	0.030	0.041	0.047	0.045	
0.25	0.029	0.033	0.038	0.037	0.039	0.25	0.030	0.041	0.045	0.044	0.048
0.5	0.027	0.033	0.037	0.037	0.038	0.5	0.030	0.041	0.043	0.043	0.047
0.75	0.027	0.029	0.035	0.038	0.038	0.75	0.029	0.040	0.042	0.045	0.044
1	0.027	0.035	0.035	0.037	0.038	1	0.027	0.038	0.041	0.042	0.044

Nota: Calculo de radio hidráulico calculado por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

Los valores expresados en la tabla 23 presentan una tendencia creciente en la medida que para una pendiente determinada se incrementan los valores de caudal. Sin embargo, las variaciones no son de gran magnitud entre un caudal y otro y obedece a la función matemática del área con respecto al perímetro, las cuales siempre guardan una relación estrecha

Los valores de radio hidráulico tienen un comportamiento muy estable en cada una de las pendientes evaluadas, no presenta una variación alta asociado al cambio de dichas pendientes, sin embargo, al aumentar los valores de caudal aumenta de manera uniforme, la variación en el radio hidráulico se relaciona principalmente al incremento en la profundidad de flujo, que se da por el incremento de caudal.

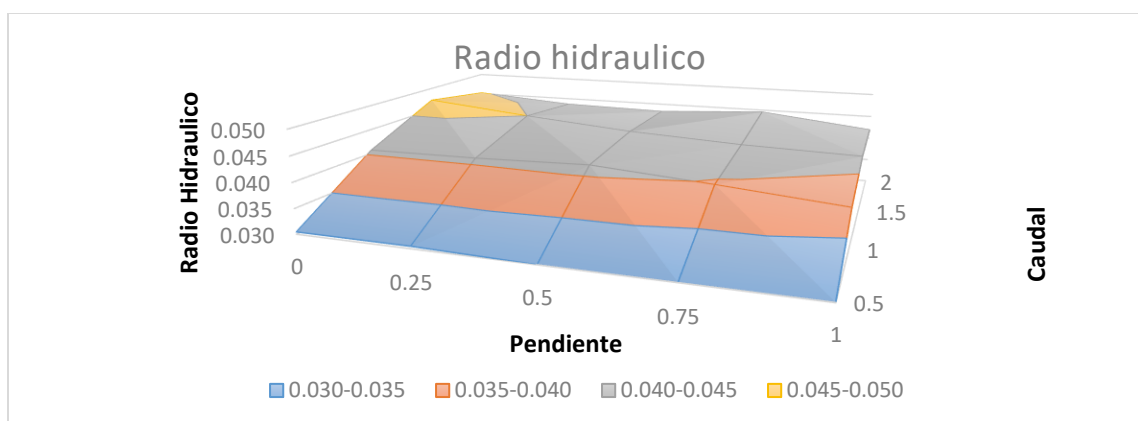


Figura 15 Gráfica de radio hidráulico vs pendiente y caudal.

El valor de radio hidráulico se ve representado si bien por la forma del canal, también por su tamaño, es decir, conforme aumenta el tamaño del cauce, aumenta su radio hidráulico; el valor de radio hidráulico varía entonces, conforme varían los valores de profundidad, perímetro y ancho superficial.

El radio hidráulico permite dimensionar el canal de manera más acertada, esto, es importante a la hora de establecer, por ejemplo, una noción de equilibrio geomorfológico fluvial, así como para estudios de escorrentía y estudios de resistencia hidráulica, donde tanto el radio hidráulico como la rugosidad juegan un papel fundamental. (Christofolletti, 1982; Fuentes Ruiz et al., 2004)

Tabla 21 Porcentaje de semejanza entre el radio hidráulico calculado por los métodos de vadeo y trazadores

Radio hidráulico.					
Pendiente (%)	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	89.233	80.125	75.550	82.783	
0.25	93.541	75.452	82.068	80.940	78.022
0.5	88.846	72.698	82.560	83.384	76.759
0.75	92.762	61.625	79.093	81.596	86.018
1	98.572	90.693	82.607	87.186	84.312
Porcentaje de aproximación					
media			82.77%		

Nota: Porcentaje de aproximación de radio hidráulico calculado por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

El porcentaje de aproximación que se logra en este parámetro, por su parte no es tan alto como parámetros anteriores, sin embargo, sigue siendo un porcentaje de aproximación aceptable, teniendo en cuenta que este parámetro surge de múltiples correlaciones matemáticas previas para poder establecer su valor, los cuales ya poseen una desviación propia considerable, en especial el área transversal, cuya variación es mayor al 17%.

9.4.5. Número de Froude

Dado que las velocidades manejadas y las pendientes en el canal son relativamente bajas, los regímenes de flujo son todos subcríticos. Por lo general, los flujos en los problemas de ingeniería son supercríticos y turbulentos, sin embargo, para el estudio de pruebas en modelos hidráulicos los estudios de flujos en láminas son significativos, así como en estudios de flujo superficial de terreno y control de erosión (Aguirre-Pe, Olivero, & Moncada, 2015).

Tabla 22 Resultados cálculo de número de Froude a través del método de vadeo y método de trazadores - fotogrametría

Número de Froude trazadores						Número de Froude por Vadeo.					
Pendiente	Caudal (l/s)					Pendiente	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5		0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.347	0.455	0.486	0.476		0	0.403	0.415	0.476	0.498	
0.25	0.329	0.460	0.510	0.584	0.481	0.25	0.410	0.418	0.500	0.540	0.510
0.5	0.446	0.520	0.474	0.590	0.702	0.5	0.460	0.445	0.524	0.589	0.613
0.75	0.460	0.418	0.582	0.637	0.547	0.75	0.560	0.504	0.543	0.593	0.603
1	0.364	0.341	0.501	0.527	0.573	1	0.473	0.459	0.550	0.585	0.600

Nota: Resultados cálculo de número de Froude, por Felipe Guarín 2019

Este comportamiento del Número de Froude se ve también en los canales prismaticos, en donde a una misma pendiente el cambio de caudal de manera ascendente conlleva a una elevación en el valor del número de Froude, aproximándolo en este caso al valor de 1 (Punto crítico). Sin embargo, con los valores de caudal y pendiente que se trabajaron no se alcanzó a manifestarse un flujo supercrítico.

El cálculo del régimen de flujo en estudio de canales abiertos de características no prismáticas, es de suma importancia para el entendimiento del comportamiento hidráulico del mismo, el régimen de flujo tiende a variar en cada sección del canal, puesto que hay diversos factores externos que influyen en éste.

Los valores del número de Froude por medio del uso de trazadores y fotogrametría presenta la misma tendencia de valores que con los métodos convencionales, en donde todos los valores tienen a presentarse en estados de flujo subcrítico para todas las corridas e inferiores al valor de 0.6. Resultado de operar con bajas pendientes que involucran bajas velocidades.

Siendo el parámetro encontrado tan cercano al medido por las metodologías de vadeo y área velocidad (88% de aproximación), es posible tener en cuenta el mismo para desarrollar estudios directamente en campo a través de trazadores y fotogrametría; es un gran avance obtener este parámetro de manera automatizada.

Tabla 23 Porcentaje de semejanza entre el número de Froude calculado por los métodos de vadeo y trazadores

Número de Froude.					
Pendiente (%)	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	83.988	91.281	97.750	95.461	
0.25	75.453	90.864	98.056	92.453	94.054
0.5	96.857	85.715	89.425	99.699	87.327
0.75	78.425	79.583	93.407	93.083	89.740
1	70.182	65.327	90.259	88.943	95.233
Porcentaje de aproximación					
media	88.44%				

Nota: Porcentaje de aproximación de Número de Froude por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

Otro posible uso del número de Froude calculado es para análisis de riesgo, por ejemplo, en estudios de riesgo de inundación, donde el régimen de flujo es un parámetro importante a tener en

cuenta para el establecimiento de zonas de inundación y la capacidad de arrastre que pueda tener el flujo. (JOHN DÍAZ TIBANTA, 2014)

Por ejemplo, al conocer el número de Froude de un canal natural, se pueden hacer estudios de sedimentación, transporte de sedimentos, análisis de riesgos, entre otros; ejemplos de ello son los estudios como “Efecto del número de Froude densimétrico en el transporte de sedimentos”; en este estudio se consideran las condiciones de movimiento de partículas sueltas en el lecho de canales o ríos con contorno de gran rugosidad y alta pendiente.(Aguirre-pe, Olivero, & Alix, 2001)

Por otra parte, en el artículo “Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente” de los mismos autores, se constata que ni el número de Reynolds del contorno ni el parámetro de Shields son variables adecuadas para predecir las condiciones críticas de iniciación del movimiento de partículas sueltas en el lecho de canales o ríos con contornos de gran rugosidad y alta pendiente; Se analiza el criterio de la velocidad media del flujo en la definición de las condiciones de iniciación del movimiento y se considera el número de Froude crítico como criterio alternativo para estimar las condiciones hidráulicas de iniciación del movimiento.(Aguirre-Pe et al., 2015)

9.4.6. Rugosidad.

El cálculo del coeficiente de rugosidad utilizando la Ecuación de Manning, que por lo general se utiliza para el cálculo de velocidad y pérdidas de energía en el flujo, es un factor totalmente único e inherente al tipo de cauce que se presente y que de acuerdo a Ven Te Chow, no existe un método exacto para el cálculo o la selección de un valor de rugosidad.

Generalmente, para el cálculo de rugosidad se emplean tablas definidas por materiales, sin embargo, y de acuerdo a los resultados obtenidos, la rugosidad siempre disminuyó en la medida que se incrementó el caudal en cada una de las pendientes evaluadas. Lo cual puede estar asociado a una mayor área mojada y por tanto un menor contacto del flujo de agua con respecto a las paredes del cauce. Es decir, pasa una mayor cantidad de agua y se reduce el porcentaje de esta que está en contacto con las paredes del cauce.

Uno de los puntos más importantes de esta investigación es aproximarse al valor de la rugosidad real para la sección estudiada. De acuerdo a Ven Te Chow, es común entre los profesionales asumir un valor de rugosidad único para una sección de estudio, aunque se trate de

un canal, como es el caso de la mayoría de canales no prismáticos, cuyo material de lecho varía constantemente. También es común encontrar, por ejemplo, en estudios de canales donde sea necesario calcular velocidades medias o pérdidas de carga hidráulica, como en los estudios de (Rodríguez & Ayala, 2016) y (Castro Huertas, 2015), donde se asumen valores de rugosidad para tramos incluso mayores a un kilómetro, de acuerdo a solo el factor de rugosidad superficial.

Sin embargo, asumir un valor de coeficiente de rugosidad único para un canal cuyo tramo es de una distancia considerable puede llevar a sub-dimensionar o sobredimensionar los cálculos realizados y generar sesgos significativos. Es por esto, que al obtener el valor de rugosidad medio más aproximado para el canal que se está estudiando se tiene un rango de variación menor en las proyecciones que tengan la rugosidad como base de cálculo.

Tabla 24 Resultados cálculo de rugosidad por los métodos de vadeo y trazadores.

Rugosidad trazadores						Rugosidad por Vadeo.					
Pendiente	Caudal (l/s)					Pendiente	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5		0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.0136	0.0116	0.0100	0.0163		0	0.015	0.015	0.013	0.015	
0.25	0.0134	0.0131	0.0100	0.0095	0.0088	0.25	0.015	0.016	0.013	0.012	0.012
0.5	0.0112	0.0093	0.0095	0.0093	0.0078	0.5	0.013	0.013	0.012	0.011	0.010
0.75	0.0093	0.0100	0.0088	0.0084	0.0090	0.75	0.011	0.014	0.011	0.011	0.011
1	0.0121	0.0128	0.0085	0.0086	0.0078	1	0.013	0.014	0.011	0.010	0.010

Nota: Cálculo de rugosidad por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

Tabla 25 Porcentaje de semejanza entre la rugosidad calculado por los métodos de vadeo y trazadores

Rugosidad					
Pendiente (%)	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	87.369	72.658	66.137	95.070	
0.25	90.317	78.179	75.402	76.105	64.458
0.5	83.740	56.921	76.096	81.974	67.868
0.75	86.450	64.306	71.194	74.737	83.365
1	95.385	92.297	72.409	80.257	73.274
Porcentaje de aproximación media					77.75%

Nota: Porcentaje de aproximación entre la rugosidad por ambos métodos, por Felipe Guarín 2019

Cuando se contrasta la precisión entre las mediciones por método área-velocidad y uso de trazadores-fotogrametría (tabla 12) se puede observar que tiene el porcentaje de aproximación media más bajo de todo el procedimiento, esto puede deberse a su vez por varios motivos, entre los cuales pueden encontrarse; que el cálculo de la rugosidad es muy sensible a cualquier cambio en los demás elementos hidro-geométricos, fácilmente puede ser alterado por cualquier variación en el área mojada, perímetro hidráulico, velocidad o pendiente, teniendo en cuenta la conjunción de variables que deben hacerse para llegar a este parámetro, sin embargo, a pesar de esto, el porcentaje de aproximación es bastante aceptable. El coeficiente de rugosidad para canales con material de revestimiento de resina poliéster reforzada con fibra de vidrio es de 0.009 (Pacheco, 2001), y con una tendencia inversamente proporcional de la rugosidad en la medida que se incrementa el valor del caudal en el cauce. De acuerdo a Vente Chow esta variación se presenta por diversos factores que se interrelacionan entre sí, como lo son:

- a. Rugosidad superficial: la rugosidad se representa principalmente por el tamaño y forma de los granos del material que forman el perímetro mojado y que producen un efecto retardador del flujo, por lo general este se considera como el factor único que modifica la rugosidad del canal, sin embargo, es uno de varios factores.
- b. Irregularidad del canal: Estas irregularidades se presentan en el perímetro mojado y las variaciones en las secciones transversales, tamaño y forma de estas a lo largo del canal; estas irregularidades producen rugosidad adicional a la causada por la rugosidad superficial y otros factores.
- c. Alineamiento del canal: Curvas suaves con radios grandes producen valores de rugosidad relativamente bajos, curvas bruscas con meandros severos incrementarán el valor de n .
- d. Tamaño y forma del canal: Un aumento en el radio hidráulico puede aumentar o disminuir el valor de rugosidad según la condición del canal.
- e. Nivel y caudal: En la mayor parte de las corrientes el valor de rugosidad disminuye con el aumento del caudal, cuando el agua es poco profunda, las irregularidades del fondo quedan expuestas y sus efectos se vuelven pronunciados.

Estos factores afectan visiblemente la rugosidad del canal en cuestión; sin embargo, hay más factores que pueden influir en la rugosidad de un canal natural, como lo son la vegetación,

sedimentación y socavación, cambio estacional, material en suspensión y carga de lecho.(Chow, 1985)

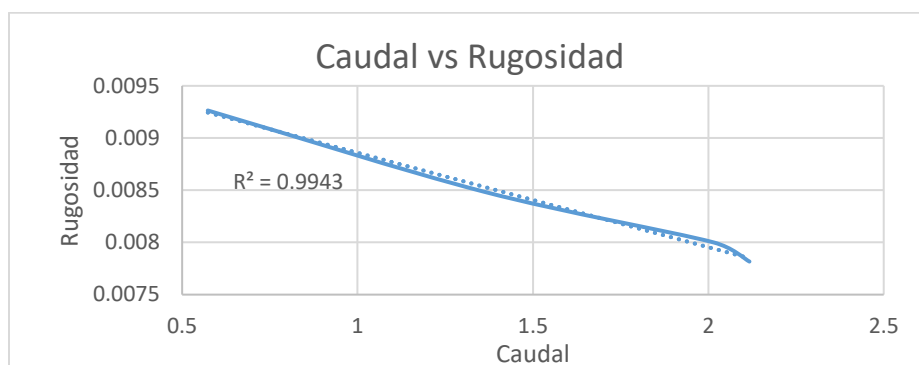


Figura 16 Relación entre caudal y rugosidad.

Estas consideraciones validan la importancia de establecer un valor de rugosidad específico para el tramo de estudio que se esté observando, al asumirse valores de rugosidad para la zona de estudio en general, se generan importantes sesgos en los cálculos que pueden significar errores críticos.

Hay varios estudios para el cálculo de coeficiente de rugosidad, incluso de manera analítica. Sin embargo, la mayoría de estos procedimientos, con excepción de algunos que se hacen a través de teledetección, son métodos que exigen entrar en el flujo ya sea a realizar mediciones o a tomar muestras del suelo.

Un ejemplo de estos es el estudio exploratorio de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad en un río de llanura, donde se utiliza un método bastante semejante para el cálculo del coeficiente de rugosidad a través de la ecuación de Manning y por medio de las características hidrogeométricas del canal.(Cayré, Castro, & Garro, 2002)

El coeficiente de rugosidad de la resina poliéster reforzada con fibra de vidrio de acuerdo a (Pacheco, 2001), tiene un valor de 0.009, de acuerdo a esto, los resultados de la rugosidad calculada para cada experimento tiene un nivel alto de aproximación, sobre todo en caudales de mayor magnitud y a mayor pendiente, esto confirma las afirmaciones previas, donde a mayor nivel de flujo, menos incidencia tienen las irregularidades propias del canal.

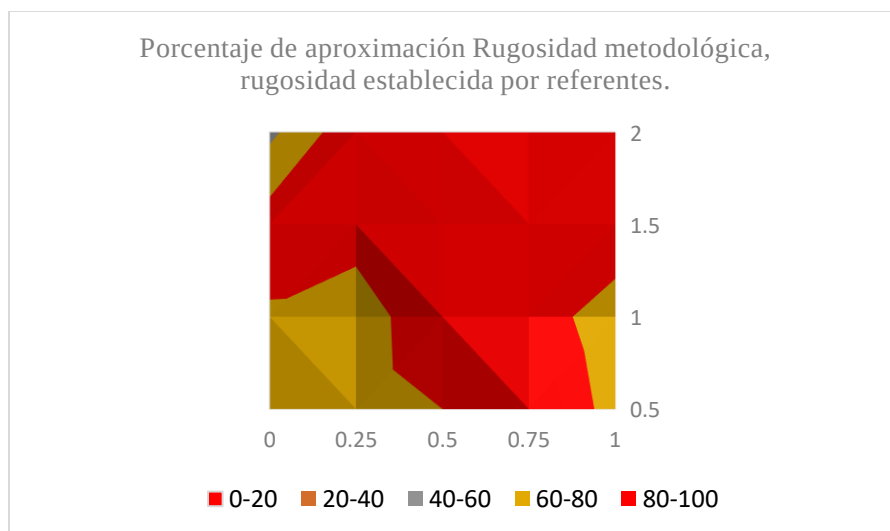


Figura 17 Porcentaje de aproximación de la rugosidad calculada por la metodología de trazadores y fotogrametría y rugosidad establecida por bibliografía.

A su vez, el coeficiente de rugosidad tiene una variación bastante aceptable teniendo en cuenta que, si se observan los valores analizados directamente, su variación es coherente con las características que implican la variabilidad del valor de rugosidad de acuerdo a Vente Chow, y el porcentaje de aproximación al coeficiente de rugosidad hallado por tablas en efecto es bastante semejante.

9.4.7. Cálculo de velocidad por trazadores.

Tabla 26 Resultados cálculo de velocidad a través de trazadores, validación por duplicado.

Caudal (l/s)/ Pendiente (%)	Velocidad (m/s)									
	0.5		1		1.5		2		2.5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
0	0.079	0.076	0.118	0.118	0.160	0.160	0.160	0.100		
0.25	0.080	0.082	0.120	0.100	0.160	0.160	0.167	0.161	0.173	0.188
0.5	0.087	0.088	0.130	0.140	0.160	0.160	0.180	0.167	0.205	0.205
0.75	0.100	0.107	0.140	0.110	0.161	0.161	0.188	0.188	0.188	0.180

Nota: Cálculo de velocidad por trazadores, por Felipe Guarín 2019

La velocidad tiene un comportamiento directamente proporcional a la pendiente y al caudal. Se puede observar dicho comportamiento en la Figura 18 la relación. En donde, a medida que

incrementa el caudal, la velocidad de flujo aumenta sensiblemente, así mismo, al igual que cuando se incrementa la pendiente. Sin embargo, la variable más influyente es el caudal.

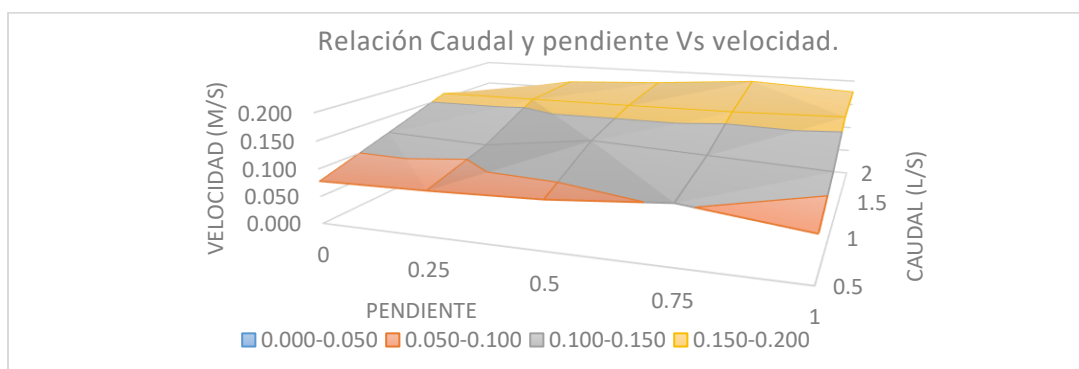


Figura 18 Grafica de relación pendiente-caudal-velocidad

Es relevante el cálculo de las velocidades del tramo, puesto que, generalmente cuando se utilizan herramientas como el molinete para medir velocidades, solo se mide la velocidad que pasa por tan solo una sección, desconociendo x cantidad presente en una sección, mientras que se desea establecer la velocidad media del tramo, el uso de trazadores puede lograrlo, puesto que los datos de velocidad medidos toman el tramo completo evaluado, considerándose una medición más precisa.

9.4.8. Energía.

Así como el régimen de flujo, el cálculo de la energía de un canal no prismático utilizando métodos no intrusivos facilita y agiliza el entendimiento del flujo.

Tabla 27 Resultados cálculo de energía a través de trazadores

Pendiente	Energía				
	Caudal (l/s)				
	0.5	1	1.5	2	2.5
0	0.048	0.072	0.090	0.084	
0.25	0.048	0.072	0.084	0.080	0.091
0.5	0.047	0.074	0.079	0.079	0.090
0.75	0.045	0.070	0.076	0.083	0.081
1	0.042	0.065	0.074	0.076	0.082

Nota: Calculo de energía a través de trazadores, por Felipe Guarín 2019

La energía calculada para este canal, dada la magnitud del mismo se mantiene en valores bajos, sin embargo, se evidencia el aumento de energía con relación al aumento de caudal, debido que a mayor caudal se incrementa la velocidad y por tanto el número de Froude, fenómeno que también se presenta en canales prismáticos (Ver figura 19).

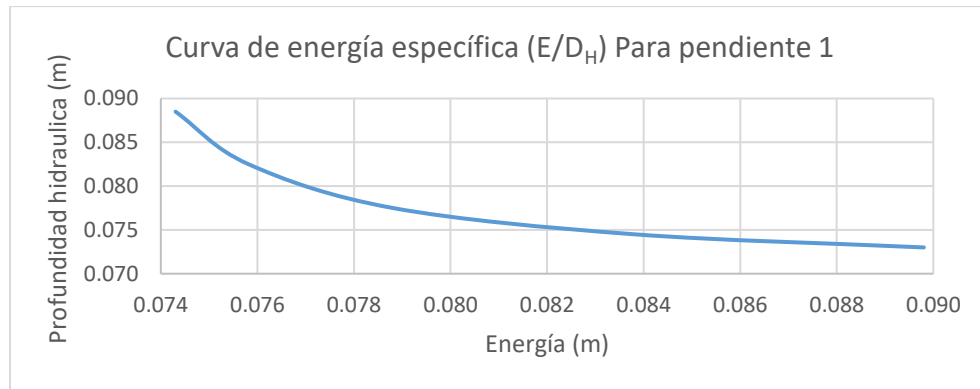


Figura 19 Curva de energía específica del flujo.

Asimismo, al contrario de lo anterior, cuando la pendiente se incrementa, la energía tiende a disminuir. Este comportamiento se sustenta debido a que, de acuerdo a la ecuación 7 el aporte energético más significativo se representa en la profundidad de flujo, y esta es inversamente proporcional a la pendiente, por lo tanto, aunque a mayor pendiente hay velocidades mayores, la energía de flujo es menor, a su vez, el comportamiento de la energía específica en un régimen subcrítico se puede contemplar en la figura 20, donde a mayor velocidad y menor profundidad de flujo, menor es la energía específica del canal. (Jaime & Garcés, 2008)

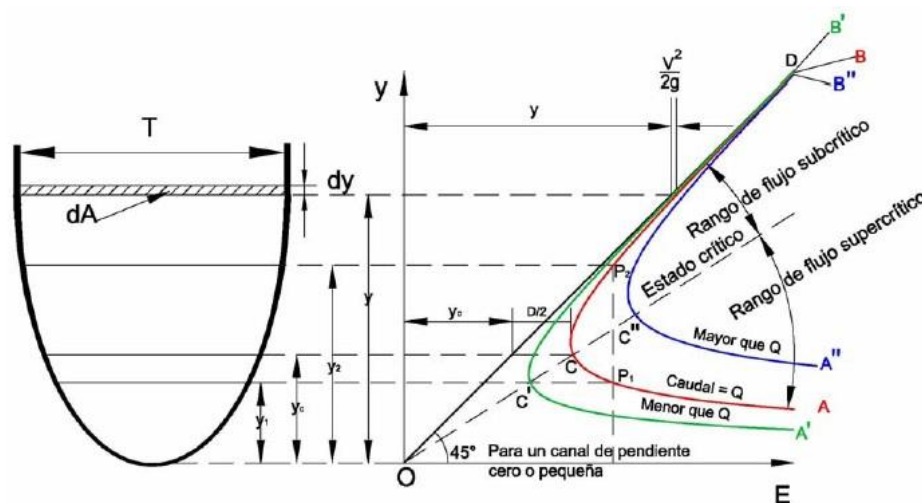


Figura 20 Energía específica de acuerdo a la profundidad y régimen de flujo. (Jaime & Garcés, 2008)

10. Conclusiones

- Las características Hidro-geométricas del canal hidráulico desarrollado para el experimento se obtuvieron teniendo en cuenta el alcance que permitía el canal hidráulico Flow Channel FC300-7m, en donde se pudo diseñar un canal no prismático en pvc de diámetro 10" y 4.5 metros de largo, revestido con fibra de vidrio reforzada con poliéster, el cual logró operar con caudales entre 0.5 l/s y 2.5 l/s, unas pendientes entre 0% y 1%, una altura máxima de lámina de agua de 14 centímetros. Permitiendo obtener así una simulación de flujo que permitiese estudiar el comportamiento hidráulico en un canal no prismático controlando las variables que inciden directamente en su comportamiento.
- En el desarrollo de las características hidro-geometrias el método de vadeo requirió la medición directa en el canal no prismático de seis parámetros hidráulicos como datos de entrada para la determinación de las características hidráulicas (caudal, área mojada, perímetro mojado, ancho superficial, altura de lámina de agua y pendiente), y partir de relaciones hidráulicas de referentes hallar las demás variables como Velocidad, Rugosidad, Profundidad hidráulica, Radio Hidráulico, Número de Froude, y Energía del tramo de estudio. Mientras que en el caso del uso de trazadores en conjunto con fotogrametría se requirió medir solo cuatro parámetros, obteniendo el caudal y la velocidad por medio de los trazadores, el ancho superficial por la fotogrametría y la pendiente por medio del dato provisto por el canal, para continuar con las correlaciones hidráulicas conocidas y otras nuevas para obtener las demás variables hidráulicas como área mojada, Profundidad Hidráulica, Perímetro Mojado, Radio Hidráulico, Número de Froude, Rugosidad y Energía.
- Comparativamente, ambos métodos obtuvieron valores muy cercanos, con niveles de precisión o de aproximación entre ellos que variaron de acuerdo al parámetro analizado, es así como el Caudal se ubicó entre 0.41 l/s – 2.5 l/s y un porcentaje de proximidad del 88.07%, área mojada ($0.05 \text{ m}^2 - 0.013 \text{ m}^2$) con una proximidad del 84.91%, perímetro mojado (0.197 m – 0.33 m) con una proximidad del 93.69%, profundidad hidráulica (0.03m y 0.069m) con una proximidad del 88.46%, rugosidad (0.0078 y 0.0163) con un porcentaje de aproximación del 77.75%, a su vez, el valor de rugosidad hallado en comparación al valor de rugosidad establecido a través de bibliografía tiene una aproximación del 85.79%, y el ancho superficial (0.133 m – 0.185 m), con una proximidad del 81.93%, cuyo nivel de confiabilidad

es aceptable por ser la medición directa de un escenario real, logrando obtener por correlaciones matemáticas para hallar velocidades entre 0.079 m/s y 0.2 m/s, así como un régimen de flujo sub-critico (Número de froude menor a 1) en todas las corridas desarrolladas.

- El cálculo de caudales y la medición de velocidad por medio de trazadores, a su vez, ofrece un alto rango de confiabilidad que se valida en un 88% de aproximación a los métodos de vertedero, volumétrico y medidor automático, a su vez, la confianza en los datos es mayor que en estos métodos puesto que los datos recolectados son en su totalidad automatizados, lo que puede desestimar errores manuales en la toma de datos; así mismo, es un método que agiliza en gran medida la medición de caudal, puesto que; al desarrollar la actividad de recolección de información por el método de vadeo involucraría alrededor de 90 horas, mientras que con el uso de las inyecciones de trazadores y la recolección de la información involucran en un periodo de tiempo no mayor a 4 horas.
- La medición de ancho superficial a través de fotogrametría es una opción muy ágil y eficiente de acuerdo a los tiempos del levantamiento de la información, dada la precisión que tienen las mediciones tomadas cada centímetro a través de este método; además, se pueden hacer las mediciones a la frecuencia deseada y los datos se generan de manera automatizada, si bien hay que hacer un pos procesamiento de las imágenes, el trabajo que requiere es mucho menor al dibujo de cada sección, el procesamiento de las doce fotografías por cada experimento, tomó cerca de quince minutos, lo que en total da un tiempo aproximado de procesamiento de 6 horas y 15 minutos.
- La profundidad hidráulica presenta una aproximación porcentual a un 80% de la profundidad de lámina, por tanto, con base en este porcentaje se puede hallar el valor de profundidad hidráulica más el 20% de su valor, representando la profundidad de lámina de agua. Esto valida el uso de la metodología por trazadores y fotogrametría para calcular el valor de la profundidad de lámina a un nivel de aproximación del 96% sin realizar las mediciones de manera intrusiva al flujo y con la rigurosidad que estas mediciones exigen.
- El calcular características hidráulicas como perímetro mojado de manera no intrusiva es uno de los resultados más relevantes de esta investigación, puesto que, aunque se han establecido métodos para hallar de manera independiente características como rugosidad o régimen de flujo, no se tienen referentes de la posibilidad de hallar una forma de calcular el perímetro

sin la necesidad de medir físicamente el mismo, y, por tanto, agiliza la medición y el cálculo de las características subyacentes a este. La definición de la expresión matemática como la relación entre el área y la profundidad hidráulica, expresada como $P_m = \pi D_h + \sqrt{A_m}$, hallada después de un análisis y la operación de parámetros hidráulicos, tiene un porcentaje de aproximación de 92.57%, porcentaje que demuestra un nivel de confianza alto en los datos, que valida la ecuación para el canal trabajado.

- De manera estrechamente ligada al punto anterior, el cálculo de la rugosidad de flujo sin entrar directamente en el canal es un gran avance, puesto que a pesar de que existen diferentes métodos para la definición de un coeficiente de rugosidad, como métodos analíticos o de medición directa del material e incluso, también a través de la ecuación de Manning como se realizó en el presente trabajo y se valida con el trabajo de (Cayré et al., 2002); sin embargo, estos métodos son estrictamente intrusivos en el canal, el método propuesto en esta investigación ofrece una alternativa eficiente y con un porcentaje de aproximación del 77.75% para la definición del valor de rugosidad para el tramo analizado, sin depender de puntos de muestreo específicos.
- Finalmente, y como respuesta a la pregunta problema de la investigación, el método para caracterizaciones hidro-geométricas de canales no prismáticos a través de trazadores salinos y técnicas fotogramétricas ofrece un porcentaje de aproximación media del 85.63% de todas las características evaluadas frente a la metodología por vadeo y modelo Área-Velocidad, lo que se traduce en una alta aproximación a la misma y valida la funcionalidad esta.

11. Recomendaciones

- Para facilitar la captura de la información de ancho superficial a través de técnicas fotogramétricas se propone para investigaciones futuras o subyacentes aplicar un colorante en el agua que facilite distinguir la misma de las paredes del canal, con la finalidad de agilizar la medición en las fotografías.
- De manera similar, al utilizar un colorante que distinga el flujo del canal, se puede implementar una categorización y posible vectorización por grupos de pixel a través del mosaico de las imágenes, con esto, se puede automatizar el proceso de medición de ancho superficial, haciendo aún más eficiente y ágil el procesamiento de la información.
- Dadas las condiciones aplicadas en el flujo, se recomienda manejar en futuras ocasiones un flujo supercrítico en el flujo y analizar su comportamiento, de esta manera se abordarían las dos regiones energéticas y podría generarse un estudio de flujo con mayor rango de aproximación a la realidad.
- La aplicación de la metodología bajo condiciones de flujo controladas y evaluadas en laboratorio se desenvuelve de manera muy precisa, sin embargo, la finalidad de estos experimentos es extrapolar la metodología y aplicarla en escenarios reales para caracterizar cuerpos hídricos, por lo tanto, es necesario aplicar esta metodología en canales naturales y con ello verificar con mayor ajuste a la realidad los datos generados en el laboratorio.
- La resina poliéster reforzada con fibra de vidrio es un material altamente eficiente para moldear las características geométricas deseadas en el canal, puesto que dada su maleabilidad, se adhiere a las formas requeridas; luego de su secado adquiere un grado de rigidez tal que es muy complicado cambiar la forma que adquiere; esto es de gran importancia si se requiere que las características geométricas del canal no tengan ninguna modificación a lo largo de los experimentos, así mismo, asegura una larga vida útil, lo que permite su uso en estudios posteriores.
- El canal construido tiene una aplicabilidad muy alta para una gama muy amplia de estudios, ejercicios de aula e investigaciones, puesto que en este puede simularse de manera muy amplia el flujo en canales irregulares, de esta manera las simulaciones representan la realidad de manera controlada, estableciendo las condiciones de flujo deseadas; por tanto, se recomienda el uso del mismo para ejercicios académicos futuros.

- Del mismo modo, con los datos de los experimentos realizados en esta investigación pueden realizarse diferentes estudios hidráulicos, estos datos pueden usarse para comparar diferentes relaciones hidráulicas.

12. Bibliografía

- Agualimpia, Y., & Castro, C. (2006). Metodologías para la determinación de los caudales ecológicos en el manejo de los recursos hídricos. *Tecnogestión*, 3(1), 3–13. Retrieved from <https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/4333/6342>
- Aguirre-pe, J., Olivero, M. L., & Alix, N. (2001). Efecto del número de Froude densimétrico en el transporte de sedimentos Effect of the densimetric Froude number on sediment transport, 22(1).
- Aguirre-Pe, J., Olivero, M. L., & Moncada, A. T. (2015). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. *Ingeniería Del Agua*, 7(4), 353. <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2851>
- Aristizábal, E., & Gómez, J. (2008). Inventario De Emergencias Y Desastres En El Valle De Aburrá. Originados Por Fenómenos Naturales Y Antropicos En El Periodo 1880-2007. *Gestión y Ambiente*, 10(2), 17–30. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/1409/2022>
- Bos, M. G., Replogle, J. A., & Clemmens, A. J. (1986). Aforadores de caudal para canales abiertos, 293. Retrieved from <http://content.alterra.wur.nl/Internet/webdocs/ilri-publicaties/publicaties/Pub38/pub38.pdf>
- Cardona, O. (1993). Evaluación de la Amenaza la Vulnerabilidad y el Riesgo. Elementos para el ordenamiento y la planeación del desarrollo. *Los Desastres No Son Naturales*, 51–74.
- Carvajal, Y. (2011). Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, (9), 33–61.
- Castro Huertas, M. A. (2015). Aplicación del QUAL2kw en la modelación de la calidad del agua del río Guacaica, departamento de Caldas, Colombia, 100. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. <https://doi.org/10.1001/jama.297.7.716>
- Castro, J. P. (1991). La Fotogrametria Como Auxiliar Del Ingeniero.
- Cayré, M. E., Castro, M. P., & Garro, O. A. (2002). Estudio exploratorio de la sensibilidad del coeficiente de rugosidad en un río de llanura. Retrieved from <http://www.unne.edu.ar/unnevieja/Web/cyt/cyt/2003/comunicaciones/08-Exactas/E-067.pdf>

- Chow, V. Te. (1985). *Hidráulica de Canales abiertos*. Editorial Mc. Graw Hill.
<https://doi.org/9586002284>
- Chow, V. Te. (2004). *Hidraulica de Canales Abiertos*.
- Christofolletti, A. (1982). La noción de equilibrio en geomorfología fluvial. *Revista de Geografía Norte Grande*, 86(1981), 69–86.
- Costa Posada, C., Rivera, H., & Romero Pinzón, H. (2007). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento del agua 2007*. (I. N. De Colombia, Ed.) (2014th ed.). Bogotá.
- Díez, J. M. (2005). Bases metodológicas para el establecimiento de caudales ecológicos en el ordenamiento de cuencas hidrográficas. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), 11–18. Retrieved from <https://www.redalyc.org/html/2913/291323478002/>
- FAO. (2003). Review of world water resources by country. *Water Reports* 23, 23, 127. Retrieved from <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/wr23e.pdf>
- Fuentes Ruiz, C., León Mojarro, B. de, Saucedo Rojas, H., Parlange, J.-Y., Antonino, A. C., FUENTES RUIZ, C. 13576, ... Parlange, J. (2004). El sistema de ecuaciones de Saint-Venant y Richards del riego por gravedad: 1. La ley potencial de resistencia hidráulica. *Ingeniería Hidráulica En México*, 19(2), 65–75. Retrieved from <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/755>
- González, L.1, González, A.1, Saavedra, C. ., & (1). (2009). Caracterización hidrogeológica de los recursos hídricos en la Cuenca del Río Mañihuales , Región Aysén , mediante trazadores isotópicos y hidroquímicos . *XII Congreso Geologico Chileno*, 1–4.
- Headley, T. R., & Kadlec, R. H. (2007). Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 7(3–4), 269–282.
[https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70110-6](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70110-6)
- Hidrolatinoamericana, R. (2018). Topografía de un modelo físico de drenaje urbano a partir de la técnica fotogramétrica Structure from Motion Topography of a drainage physical model with the photogrammetric technique Structure from Motion, 2, 1–3.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua. Estudio Nacional del Agua 2014*.

- Iosub, M., Minea, I., Hapciuc, O., & Romanescu, G. H. (2015). The Use of HEC-RAS Modelling in Flood Risk Analysis. *Air & Water Components of the Environment / Aerul Si Apa Componente Ale Mediului*, (October), 315–322. <https://doi.org/10.17378/AWC2015>
- Iunes, D. H., Castro, F. A., Salgado, H. S., Moura, I. C., Oliveira, A. S., & Bevilaqua-Grossi, D. (2005). Confiabilidade intra e interexaminadores e repetibilidade da avaliação postural pela fotogrametria. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, 9(3), 327–334. <https://doi.org/10.1016/j.acra.2010.04.010>
- Jaime, F., & Garcés, M. (2008). Relación De Las Curvas De Energía Específica Y Pendiente De Fricción Con Las Zonas De Flujo Libre En Canales, 69–75.
- John Díaz Tibanta, B. I. V. G. (2014). *Análisis Del Riesgo De Inundación Asociado Al Diseño Hidráulico De La Confluencia De Dos Canales Urbanos Canal El Virrey – Canal La Castellana En La Ciudad De Bogotá*.
- Krug, L. A., & Noemberg, M. A. (2007). O sensoriamento remoto como ferramenta para determinação de batimetria de baixios na baía das laranjeiras, Paranaguá - PR. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(SUPPL. 1), 101–105. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000500010>
- López Alonso, R. (2005). Características Hidráulicas y Geomorfológicas de Ríos de Montaña (II). *CIMBRA- Universidad de Lleida. Artículos de Opinión*, (Ii), 4. Retrieved from http://www.citop.es/publicaciones/documentos/Cimbra362_05.pdf
- Marbello Pérez, R. (2013). Manual De Prácticas De Laboratorio De Hidráulica Universidad Nacional De Colombia. *Manual de Practicas de Laboratorio de Hidraulica*, 37. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/12697/68/3353962.2005.Parte 13.pdf>
- Marbello, R. (2005). Vertederos y Calibración de Vertederos. *Manual de Prácticas de Laboratorio de Hidráulica*, 5–47. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/31/3353962.2005.Parte 6.pdf>
- Marcheli, I. E., & Contreras, N. (2012). Evaluación Y Aplicación De La Tecnica De Lspiv Para Estimar La Velocidad Superficial En Obras Hidráulicas”.
- MARIN, C. M. M. Z. J. (2012). “ Diseño Y Construcccion De Un Canal Hidráulico De Pendiente

- Variable Para Uso Didactico E Investigación. (Tesis de pregrado). Universidad del Salvador, San Salvador, Salvador.
- Muy, R., & Tandazo, L. (2012). Universidad de cuenca. *El Escorial*, 34,56.
- Pacheco, M. P. (2001). Tuberia de resina reforzada con fibra de vidrio para recoleccion y transporte de hidrocarburos y fluidos corrosivos liquidos si. *Comité de normalizacion de petroleos mexicanos y organismos subsidiarioS*, 1–67.
- Ranieri, E., Gorgoglione, A., & Solimeno, A. (2013). A comparison between model and experimental hydraulic performances in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 60, 45–49. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.037>
- Redweik, P. (2015). Fotogrametria aérea, (November).
- Rodríguez, E. J. M., & Ayala, g. P. R. (2016). Calculo de la velocidad media y el caudal con base en la velocidad superficial del agua en pequeñas corrientes (Tesis de pregrado). *Universidad distrital francisco josé de caldas* Bogotá, Colombia.
- Ruiz, P. R. (2008). *Hidraulica II*. Oaxaca: Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del I. P. N.
- Sánchez, J. (2012). Cálculo aproximado de la altura de inundación, (1), 1–4. Retrieved from http://hidrologia.usal.es/Complementos/Calculo_altura_agua.pdf
- SILva, j. D. G. (2009). Calculo del coeficiente de rugosidad de manning utilizando gravilla, arena, piedra pegada y tierra como fondo mediante un canal a escala como modelo físico. (Tesis de pregrado) *Universidad de la salle*, Bogotá, Colombia.
- Tommaselli, A. M. G., Silva, J. F. C. da, Hasegawa, J. K., Galo, M., & Poz, A. P. D. (1999). FOTOGRAMETRIA: aplicações a curta distância. *ResearchGate*, (October 2014), 147–159. <https://doi.org/10.13140/2.1.1594.6246>
- Zambrano, J. D. C. (2004). *Estudios con trazadores e investigación de modelos de transporte de solutos en un río de montaña* (Tesis de pregrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Zambrano, J. D. C. (2016). *Determinación de las características hidro-geométricas de un río de*

montaña y su posterior implementación en un modelo de calidad del agua realizando trazadores de largo alcance. Caso de estudio: río teusacá (Tesis de postgrado). Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.