CÁLCULO DEL CAUDAL DEL RÍO CAUCA EN LA ESTACION TRES CRUCES Y CALCULO DEL CAUDAL DEL RIO VICHADA EN LA ESTACION DE SANTA RITA, POR EL METODO DE LA MAXIMA ENTROPIA

EDUARDO ENCISO ROJAS
20111279034

CARLOS ANDRÉS ROJAS HERNANDEZ.
20111279045

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD TECNOLOGICA
BOGOTÁ D.C.
2015

CÁLCULO DEL CAUDAL DEL RÍO CAUCA EN LA ESTACION TRES CRUCES Y CALCULO DEL CAUDAL DEL RIO VICHADA EN LA ESTACION DE SANTA RITA, POR EL METODO DE LA MAXIMA ENTROPIA

EDUARDO ENCISO ROJAS
20111279034

CARLOS ANDRÉS ROJAS HERNANDEZ.
20111279045

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil

Director de Tesis

Ing. EDUARDO ZAMUDIO HUERTAS

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS
FACULTAD TECNOLOGICA
BOGOTÁ D.C.
2015

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____
Firma del Presidente del Jurado

_____
Firma del Jurado

_____
Firma del Jurado

_____
Fecha

Contenido

INDICE DE TABLAS 6
GLOSARIO 8
INTRODUCCIÓN 9
1. PROBLEMA 11
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA 11
2. OBJETIVOS 12
2.1 OBJETIVO GENERAL 12
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 12
3. MARCO TEORICO 13
3.1 CALCULO DE CAUDALES DE RIOS 13
A) Métodos volumétricos 13
B) Método velocidad/Superficie 14
3.2 MAXIMA ENTROPIA 19
3.2.1 Aplicaciones. 20
3.2.2 Descripción. 20
3.3 METODOS EFICACES DE ESTIMACION DE CAUDALES 21
3.4 ECUACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD BASADO EN CONCEPTO DE PROBABILIDAD 21
3.5 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE EJE Y 24
3.6 LOCALIZACION DE LA MAXIMA VELOCIDAD Y SU RELACION CON M. 25
Donde; 26
4. MARCO CONCEPTUAL 26
5. MARCO REFERENCIAL 27
5.1 GENERALIDADES 27
5.2 LOCALIZACION ZONA DE ESTUDIO 27
6. METODOLOGÍA 31
6.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN 31
ETAPA I INVESTIGACIÓN 31
ETAPA II ANALISIS DE RESULTADOS 32

6.2 OBJETO DE ESTUDIO 32
6.3 VARIABLES 32
7. TRABAJO DE INGENIERÍA 33
7.1 CALCULO DEL CAUDAL EN LA ESTACION TRES CRUCES RIO CAUCA 33
Grafica de Isolíneas de velocidad 33
Localización eje *y* 34
Relación velocidad media – velocidad máxima 35
Calculo del parámetro M 37
Calculo de la velocidad máxima en el eje *y* 38
Calculo de la velocidad promedio en el eje *y* 39
Calculo del caudal 40
7.2 CALCULO DEL CAUDAL EN LA ESTACION SANTA RITA RIO VICHADA 45
Grafica de Isolíneas de velocidad 45
Localización eje y 46
Relación velocidad media – velocidad máxima 47
Calculo del parámetro M 48
Calculo dela velocidad máxima en el eje y 49
Calculo de la velocidad promedio en el eje y 50
Calculo del caudal 51
ANALISIS DE RESULTADOS 54
CONCLUSIONES 55
RECOMENDACIONES 56
BIBLIOGRAFIA 57
INFORMACION ELECTRONICA 58
ANEXOS 59

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Cálculo del caudal a partir de las lecturas en el molinete 18
Tabla 2. Marco conceptual 26
Tabla 3. Análisis de variables 32
Tabla 4. Aforos y fecha de la estación Tres Cruces Río Cauca. 33
Tabla 5. Localización del eje *Y*. 34
Tabla 6. Velocidad Máxima – Velocidad Media, por cada aforo. 36
Tabla 7. Calculo por tanteo del parámetro de distribución M. 37
Tabla 8. Calculo de la velocidad máxima en cada uno de los aforos sobre el eje y. 39
Tabla 9. Velocidad promedio en cada aforo sobre el eje Y. 40
Tabla 10. Caudales método No 1 río Cauca 41
Tabla 11. Caudales método No 2 río Cau 44
Tabla 12. Aforos de la estación Santa Rita Vichada. 45
Tabla 13. Localización del eje Y. 46
Tabla 14. Relación Velocidad Máxima – Velocidad Media. 47
Tabla 15. Calculo por tanteo del parámetro de distribución M. 48
Tabla 16. Calculo de la velocidad máxima en cada uno de los aforos sobre el eje y. 50
Tabla 17. Velocidad promedio en cada aforo sobre el eje Y. 50
Tabla 18. Caudales método No 1 río Vichada. 51
Tabla 19. Caudales método No 2 río vichada 53

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. *Variación de velocidad de una corriente* 14
Ilustración 2. Dos tipos de molinete-..... 16
Ilustración 3. Depósito de documentos de la FAO 16
Ilustración 4. Cálculo del caudal de una comente a partir de las mediciones efectuadas con un molinete 17
Ilustración 5. Comparación de un proceso muy "incierto" vs uno menos "incierto" –..... 19
Ilustración 6. Relación entre la velocidad media (ū) y la Velocidad Máxima (Umax) 22
Ilustración 7. Determinación de la localización del eje Y, distribución de la velocidad sobre de la superficie del agua y bajo la superficie del agua..... 24
Ilustración 8.Análisis de la localización del eje Y. 25
Ilustración 9. Perfil rio cauca con isolineas de velocidad de flujo..... 34
Ilustración 10 Análisis de localización eje *Y* 35
Ilustración 11. Línea de tendencia relación velocidad media – velocidad máxima. 36
Ilustración 12. Sección trasversal rio Cauca estación Tres Cruces. 42

GLOSARIO

Aforo: medición de caudal.

Caudal: Volumen de agua por unidad de tiempo.

Caudal Medio Diario: Cantidad de agua que requiere una población en un día.

Caudal Mínimo Horario: Es la mínima cantidad de agua que será requerida en una determinada hora del día.

Entropía: Medida del desorden de un sistema.

Estrella Fluvial: se considera a la zona geográfica casi siempre ubicada en macizos montañosos, es decir en altura, donde se produce por deshielo el nacimiento de varios ríos.

Molinete: artefacto que nos permite conocer la velocidad de una corriente o flujo de agua, se utiliza en ríos para tomar en cuenta gastos y volúmenes para la construcción de una obra de captación para una obra hidráulica. Consiste en un mecanismo que consta de una rueda y unos cucharones, que va girando con la velocidad con la que avanza el caudal, emite un pequeño sonido cada que da una vuelta completa, y una persona cuenta el número de veces que emite el sonido en un lapso de tiempo, y con esos datos podemos obtener la velocidad del flujo

Proyecto: Conjunto de planos, cálculos y demás documentos pertinentes para la planificación y definición de la planta de tratamiento de aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

Debido a las abundantes lluvias y a su relieve, Colombia posee una gran cantidad de ríos, entre ellos encontramos los ríos Cauca y Vichada, los cuales están entre los más caudalosos del país y entre otros tantos que superan su caudal.

Por lo anterior, es necesario contar con un método eficaz que permita analizar el comportamiento de cada uno de los ríos y calcular su caudal, verificando estadísticamente el volumen de agua que pasa por sección transversal del rio en diferentes zonas y épocas del año.

Es claro que el agua es esencial para la vida, y ya que el país cuenta con un gran recurso hídrico para mantener abastecidos los departamentos, ciudades, municipios, etc., es necesario contar con un método que a partir de las mediciones de campo y un análisis estadístico se determine de manera rápida el caudal de un río.

Existen varios métodos para hallar el caudal de un rio, la mayoría de ellos altamente probados y utilizados, pero el método de la máxima entropía es un método relativamente nuevo, por eso se quiere comprobar que esta forma de calcular el caudal es fiable, y que los resultados se pueden asemejar a los resultados obtenidos por métodos tradicionales. Este trabajo busca encontrar el caudal de los ríos Cuca y Vichada usando el método de la máxima entropía y compararlo al resultado del caudal del mismo rio usando algún método tradicional, esperando encontrar un margen de error que permita concluir que el método se puede utilizar en cualquier rio sin el problema de tener mucha incertidumbre o que la forma de hallar caudales usando el principio de máxima entropía no es viable. Si el método resulta tener resultados cercanos a los de los métodos tradicionales, se tendrá otra forma de hallar el caudal de los ríos, con la cual se podrá comparar resultados anteriores o calcular caudales de ríos de los que no se tienen datos y que los métodos tradicionales resultan poco prácticos o efectivos.

Los recursos hídricos superficiales que proceden de las cordilleras del país, constituyen un eje fundamental en el insumo a la actividad agrícola e industrial de Colombia, ofertando el agua potable a gran parte de la población, además representa también una alta capacidad instalada de energía hidroeléctrica. Por lo anterior, se ha creado una mayor conciencia en la comunidad científica respecto de la alta variabilidad de los caudales afectados por los regímenes de precipitación y escorrentía. Estos cambios en la precipitación se reflejan en la escorrentía, por lo que se hace necesario el cálculo de caudales de una forma más rápida y eficaz, teniendo en cuenta el gran recurso hídrico con el que cuenta Colombia y la rapidez con la se necesitaría contar con datos actualizados del comportamiento de los ríos más importantes de la geografía colombiana.

Este trabajo se concentra cálculo del caudal del río cauca en la estación tres cruces y cálculo del caudal del rio vichada en la estación de santa Rita, por el método de la máxima entropía. El objetivo es el análisis de los caudales en un periodo de tiempo, para definir patrones regionales de caudal, debido a la naturaleza puntual y no distribuida de la variable. Este análisis probó la existencia de patrones principales de caudales máximos ubicados en a una distancia casi constante del punto de referencia. Para el estudio se aplicó una metodología basada en el libro Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling de Shihmeng Hsu, el cual presenta modelos en 2D de la velocidad de distribución y estimación de caudal en un canal abierto.

Posteriormente se realizaron comparaciones con métodos tradicionales de cálculo de caudales, dando resultados que despejaremos a lo largo del presente proyecto.

Con lo anterior se avanza en la implementación de nuevos métodos aplicables al cálculo y análisis de caudales y se implementan los objetivos trazados en el semillero UDNES dirigido por el director de proyecto Ing. Eduardo Zamudio quien aporto significativamente al desarrollo del presente proyecto.

1. PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para realizar el aforo de un río se realizan bastantes mediciones en diferentes abscisas de la sección trasversal y sobre estas a diferentes profundidades, con el fin de estimar al final el caudal de río basado en los datos de estos aforos, los cuales son bastante extensos y con unos datos que son dispersos y propensos a arrojar datos erróneos por su distribución. Lo anterior es más común sobre todo en ríos de caudales grandes como es el caso de los principales ríos de Colombia.

El método de la máxima entropía es la base con la cual se analizan los aforos con menos datos, definiendo el caudal de ríos eficazmente, teniendo apenas un punto de velocidad en una sección de aforo.

¿Se puede determinar que el método del principio de máxima entropía tiene las características necesarias para ser usado con toda confianza en el análisis y cálculo de caudales en los ríos Cauca, estación las Cruces y río Vichada, estación Santa Rita?

El aforo de ríos puede ser realizado de manera exacta con la medición de apenas un punto de velocidad en una sección de aforo. La base de esta teoría es el principio de la máxima entropía. Utilizando el principio de la máxima entropía se obtienen la distribución de la probabilidad en la que se puede determinar teóricamente las velocidades en cualquier vertical de la sección transversal de un río o canal. Examinando los datos históricos es posible prever para flujos naturales que una distribución de velocidades analizada por un método de campo como el de molinete, será repetitiva y a su vez será una característica del flujo si el valor de dicha velocidad, a una profundidad de determinada medida desde el fondo, es equivalente al valor de la velocidad máxima de la sección. La variable determinante es la profundidad total de la vertical donde se realiza la observación. La inspección de datos de aforos existentes comprueba esta previsión y demuestra que sería posible delimitar en la sección de aforo un rango espacial de muestreo, en el cual es factible

observar velocidades equivalentes a la velocidad media en un punto del fondo o de la superficie libre. De esta forma, y conociendo el área de la sección transversal, el aforo de caudales de ríos podría reducirse a la medición de un único punto de velocidad en la abscisa donde repitentemente se ubica la velocidad máxima de la sección a través del tiempo.

Los recursos hídricos se constituyen en un elemento de vital importancia para el desarrollo de la vida en la tierra. El agua es esencial tanto para el consumo humano, la salud, la elaboración de alimentos etc. Además Colombia cuenta con numerosos ríos en los cuales se puede aplicar el método de máxima entropía para determinar su caudal usando los datos obtenidos de las diferentes estaciones ubicadas en puntos estratégicos del territorio nacional para controlar los niveles de los ríos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la aplicación del método de Máxima Entropía en el cálculo de caudales.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Describir el procedimiento para hallar el caudal por el método de máxima entropía.
- Comparar el resultado del método de máxima entropía, con el resultado hallado por un método tradicional.

3. MARCO TEORICO

3.1 CALCULO DE CAUDALES DE RIOS

Podemos definir caudal como el volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma. Su unidad de medida se da en m^3/seg. El cálculo de este caudal puede emplearse para planificar los recursos hídricos y el uso a través de embalses proyectos de obra civil que incluyen canales, embalses, represas, etc., La mediciones de este caudal se realizan por medio de aforos los cuales se obtienen por medio de estaciones ubicadas a lo largo del cauce del río y se contiene información histórica de los ríos a través de los años gracias a este método, controlando la información del comportamiento del río.

Existen diversos métodos para el cálculo de caudales.

A) Métodos volumétricos

"La forma más sencilla de calcular los caudales pequeños es la medición directa del tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. La corriente se desvía hacia un canal o cañería que descarga en un recipiente adecuado y el tiempo que demora su llenado se mide por medio de un cronómetro. Para los caudales de más de 4 l/s, es adecuado un recipiente de 10 litros de capacidad que se llenará en 2½ segundos. Para caudales mayores, un recipiente de 200 litros puede servir para corrientes de hasta 50 L/s. El tiempo que se tarda en llenarlo se medirá con precisión, especialmente cuando sea de sólo unos pocos segundos. La variación entre diversas mediciones efectuadas sucesivamente dará una indicación de la precisión de los resultados". [1]

[1] DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm.

“Si la corriente se puede desviar hacia una cañería de manera que descargue sometida a presión, el caudal se puede calcular a partir de mediciones del chorro. Si la cañería se puede colocar de manera que la descarga se efectúe verticalmente hacia arriba, la altura que alcanza el chorro por encima del extremo de la tubería se puede medir y el caudal se calcula a partir de una fórmula adecuada. Es asimismo posible efectuar estimaciones del caudal a partir de mediciones de la trayectoria desde tuberías horizontales o en pendiente y desde tuberías parcialmente llenas, pero los resultados son en este caso menos confiables” [2]

B) Método velocidad/Superficie

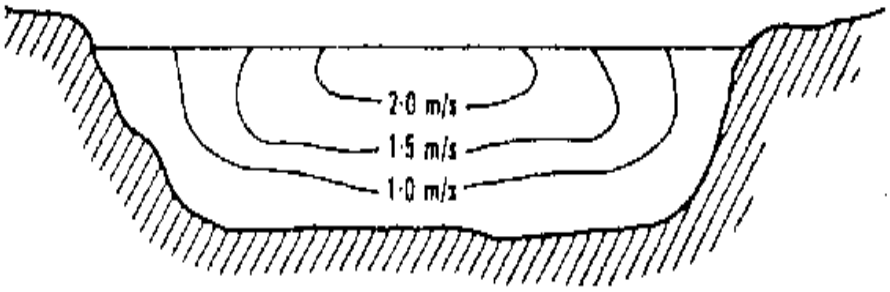
Basado principalmente en la ecuación de continuidad, donde se evalúa que el caudal es el producto de la velocidad por el área que ocupa el fluido dentro del canal.

$$Q = V * A$$

Q= Caudal (m3/S)
V= Velocidad (m)
A= Área (m2)

En la ilustración 1, se puede apreciar un modelo del comportamiento de la velocidad en la sección transversal del río.

Ilustración 1. *Variación de velocidad de una corriente*



Fuente: http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm, Deposito de documentos de la FAO.

[2]DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO, M edición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm

- ***Método de la dilución***

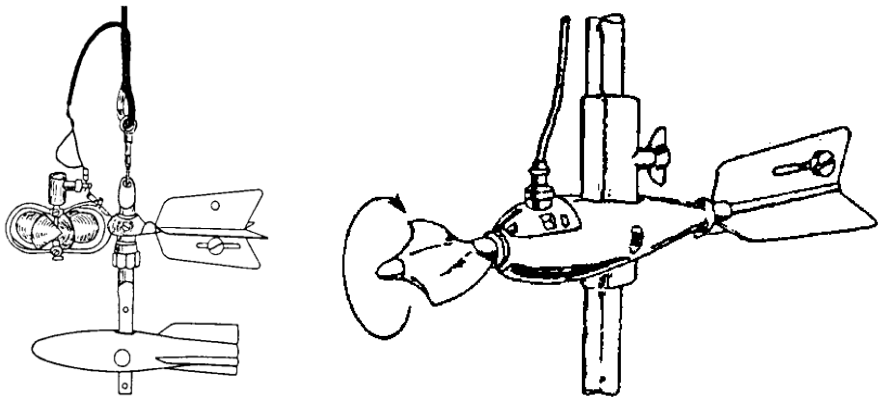
Entre los métodos que tienen como variable la velocidad existe uno mediante el cual se vierte en la corriente una cantidad de colorante bastante denso el cual recorre aguas abajo una distancia conocida y se mide el tiempo en que tarda de un punto a otro. Se mide el tiempo que tarda el primer colorante y el último en llegar al punto de medición aguas abajo, la suma de las dos velocidades sirven para calcular así la velocidad media.

- ***Método del molinete***

"Una determinación más exacta de la velocidad se puede obtener utilizando un molinete. En la ilustración 2 se ilustran los dos principales tipos de molinete. El de tipo de taza cónica gira sobre un eje vertical y el de tipo hélice gira sobre un eje horizontal. En ambos casos la velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de la corriente; se cuenta el número de revoluciones en un tiempo dado, ya sea con un contador digital o como golpes oídos en los auriculares que lleva el operador. En las corrientes superficiales se montan pequeños molinetes sobre barras que sostienen operarios que caminan por el agua. Cuando hay que medir caudales de una avenida en grandes ríos, las lecturas se toman desde un puente o instalando un cable suspendido por encima del nivel máximo de la avenida; el molinete se baja por medio de cables con pesas para retenerlo contra la corriente del río (Ver ilustración 3)."[3]

[3] DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO, M edición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm

Ilustración 2. Dos tipos de molinete-



a) Tipo Taza Cónica b) Tipo hélice

Fuente http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm,

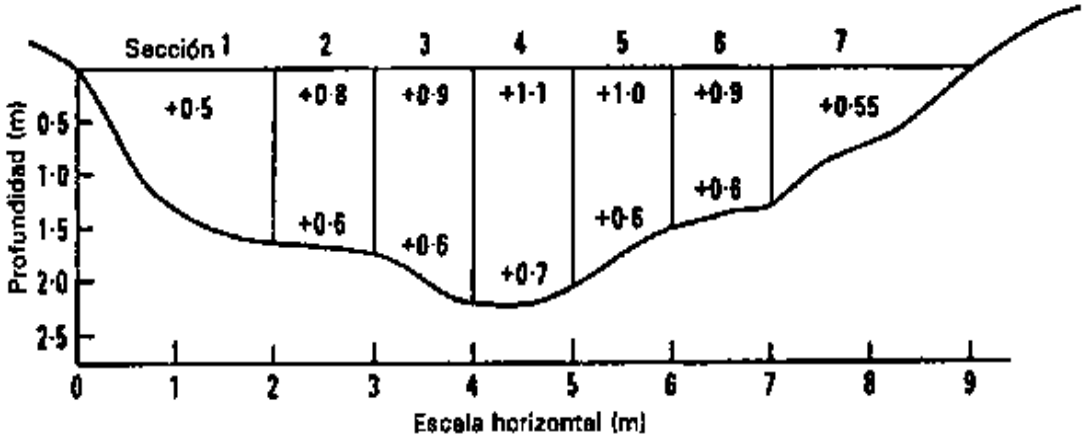
Ilustración 3. Depósito de documentos de la FAO

.

Fuente, http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm, Deposito de documentos de la FAO.

“Se requiere de varias mediciones por medio del molinete, ya que este mide un solo punto a la vez en cada una de las abscisas de la sección trasversal del río. “El procedimiento consiste en medir y en trazar sobre papel cuadriculado la sección transversal de la corriente e imaginar que se divide en franjas de igual ancho como se muestra en la ilustración 4”.

Ilustración 4. Cálculo del caudal de una comente a partir de las mediciones efectuadas con un molinete



Fuente: http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm, Deposito de documentos de la FAO.

“La velocidad media correspondiente a cada franja se calcula a partir de la media de la velocidad medida a 0,2 y 0,8 de la profundidad en esa franja. Esta velocidad multiplicada por la superficie de la franja da el caudal de la franja y el caudal total es la suma de las franjas. La tabla 1 muestra cómo se efectuarán los cálculos con respecto a los datos indicados en la ilustración 4. En la práctica, se utilizarían más Franjas que el número indicado en la ilustración 4 y en la tabla 1. Para aguas poco profundas se efectúa una única lectura a 0,6 de la profundidad en lugar de la media de las lecturas a 0,2 y 0,8.” [4]

“A veces la información necesaria con respecto a las corrientes es el caudal máximo y se puede efectuar una estimación aproximada utilizando el método

[4] DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO, M edición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm

velocidad/superficie. La profundidad máxima del caudal en una corriente se puede a veces deducir de la altura de los residuos atrapados en la vegetación de los márgenes o de señales más elevadas de socavación o de depósitos de sedimentos en la orilla. También es posible instalar algún dispositivo para dejar un registro del nivel máximo. Para evitar lecturas falsas debidas a la turbulencia de la corriente, se utilizan pozas de amortiguación, normalmente una tubería con agujeros del lado aguas abajo. La profundidad máxima del agua se puede registrar sobre una varilla pintada con una pintura soluble en agua, o a partir de las trazas dejadas en el nivel superior de algún objeto flotante sobre la superficie del agua en la varilla. Entre otros materiales utilizados cabe mencionar corcho molido, polvo de tiza o carbón molido. Una vez que se conoce la profundidad máxima de la corriente, se puede medir el área de la sección transversal correspondiente del canal y calcular la velocidad por alguno de los métodos descritos, teniendo presente que la velocidad en un caudal elevado suele ser superior a la de un caudal normal."[5]

Tabla 1. Cálculo del caudal a partir de las lecturas en el molinete

1	2	3	4	5	6	7	8
Sección	**Velocidad del caudal (m/s)**			**Profundidad (m)**	**Ancho (m)**	**Área (m^2) 5x6**	**Caudal (m^3/s) 4x7**
	0,2D	**0,8D**	**Media**				
1	-	-	0,5	1,3	2,0	2,6	1,30
2	0,8	0,6	0,7	1,7	1,0	1,7	1,19
3	0,9	0,6	0,75	2,0	1,0	2,0	1,50
4	1,1	0,7	0,9	2,2	1,0	2,2	1,98
5	1,0	0,6	0,8	1,8	1,0	1,8	1,44
6	0,9	0,6	0,75	1,4	1,0	1,4	1,05
7	-	-	0,55	0,7	2,0	1,4	0,77
						TOTAL	9,23

Fuente http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm, Deposito de documentos de la FAO.

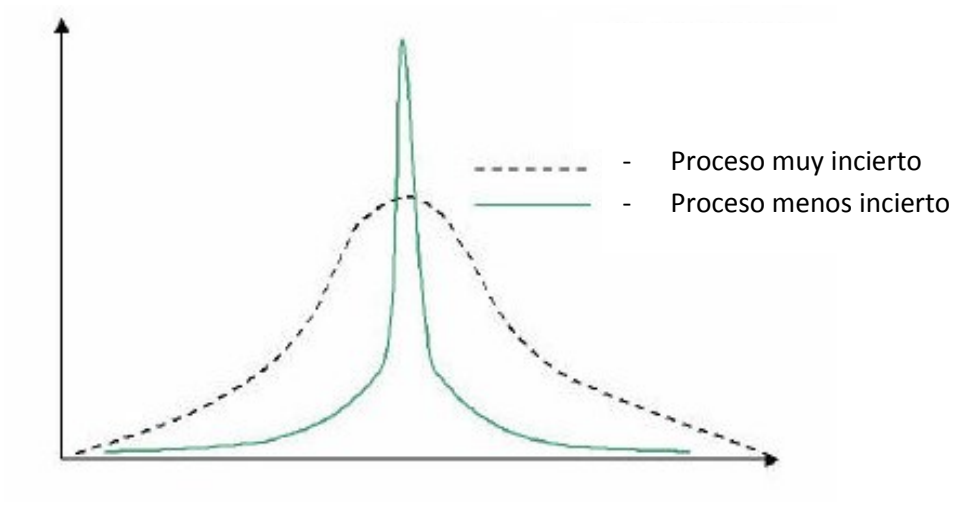
[5] DEPOSITO DE DOCUMENTOS DE LA FAO, M edición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm

3.2 MAXIMA ENTROPIA

"La entropía de una distribución de probabilidad es una medida de la incertidumbre asociada al proceso aleatorio que tal distribución modela. El principio es muy sencillo. Si bien un proceso sujeto a incertidumbre carece de predictibilidad, existen procesos más inciertos que otros:

Por ejemplo un proceso aleatorio con una distribución de probabilidad muy concentrada alrededor de su media podría considerarse como menos incierto en comparación con un proceso con alta dispersión."[6]

Ilustración 5. Comparación de un proceso muy "incierto" vs uno menos "incierto" –



Fuente http://allman.rhon.itam.mx/~ggomez/Entropia.pdf.

[6] - MÁXIMA ENTROPÍA Y LA INCERTIDUMBRE ASOCIADA A UN PROCESO http://allman.rhon.itam.mx/~ggomez/Entropia.pdf

3.2.1 Aplicaciones.

El Principio de Máxima Entropía no se ha usado regularmente en la estimación de parámetros de la distribución para casos explícitos de la hidrología superficial. Más sin embargo, se ha utilizado en los siguientes casos.

- Modelación física regional de crecientes (Solana – Ortega y Solana, 2001).
- Representación de lluvia intermitente (Koutsoyiannis, 2006).
- Relaciones geométricas hidráulicas (Singh et al. 2003).
- Análisis regional de precipitación (Escalante y Domínguez, 2001).
- comparación de momentos L y momentos C (Ulrych et al, 2000).

3.2.2 Descripción.

"La asignación de probabilidades con un grado de perjuicio mínimo es aquella que maximiza la entropía sujeta a la información dada"[7]

Por medio de este proyecto de desea aplicar el Principio de Máxima Entropía en cálculo de caudales, de tal forma que se determine de manera rápida y precisa el caudal que puede llegar a contener un río, esto a nivel de trabajos de campo y como datos estadísticos históricos de velocidades de los ríos.

"El Principio de Máxima Entropía ha sido definido y aplicado a varias funciones de distribución de probabilidad, con funciones de probabilidad definidas y directamente invertibles (Singh, 1998). El método de Principio de Máxima Entropía aplicado a la estimación de parámetros de funciones de distribución de probabilidad, consiste en los siguientes pasos principales (Singh, 1998)."[8]

1) Definir la información dada en términos de las restricciones.
2) Maximizar la entropía sujeta a la información dada.
3) Relacionar los parámetros a la información dada.

---

[7] Jaynes (1961, 1982).
[8] - COMPARACIÓN DEL MÉTODO DEL PRINCIPIO DE LA MÁXIMA ENTROPÍA EN LA ESTIMACIÓN. http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v19n2/art12.pdf

3.3 METODOS EFICACES DE ESTIMACION DE CAUDALES

"Los métodos convencionales en la estimación de caudales requieren de bastante tiempo y no se pueden utilizar durante altos flujos inestables. Por la aplicación del concepto de probabilidad para la derivación de la ecuación distribución de la velocidad, se determinaron las regularidades en los canales abiertos. Esto genera un nuevo parámetro hidráulico llamado M, que es una constante en la sección de canal y relacionada con varios fenómenos observados en el flujo de canal abierto. Una de sus aplicaciones es simplificar la medición de caudal y superar la debilidad del método convencional, de modo que la descarga durante flujos altos puede llegar a ser medible."[9]

3.4 ECUACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD BASADO EN CONCEPTO DE PROBABILIDAD

"Se conocen modelos de distribución de velocidad tales como la ley logarítmica Prandtl-von Karman y la ley de alimentación simple. Sin embargo, estos no pueden describir los patrones de distribución de velocidad, en el que la velocidad máxima se produce por debajo de la superficie del agua. La distribución de velocidad debe ser capaz de representar todos los patrones posibles de distribución. Aplicando el concepto de probabilidad y el principio de máxima entropía sobre la información se deriva una nueva ecuación de distribución de la velocidad de los fluidos, su forma general es."[10]

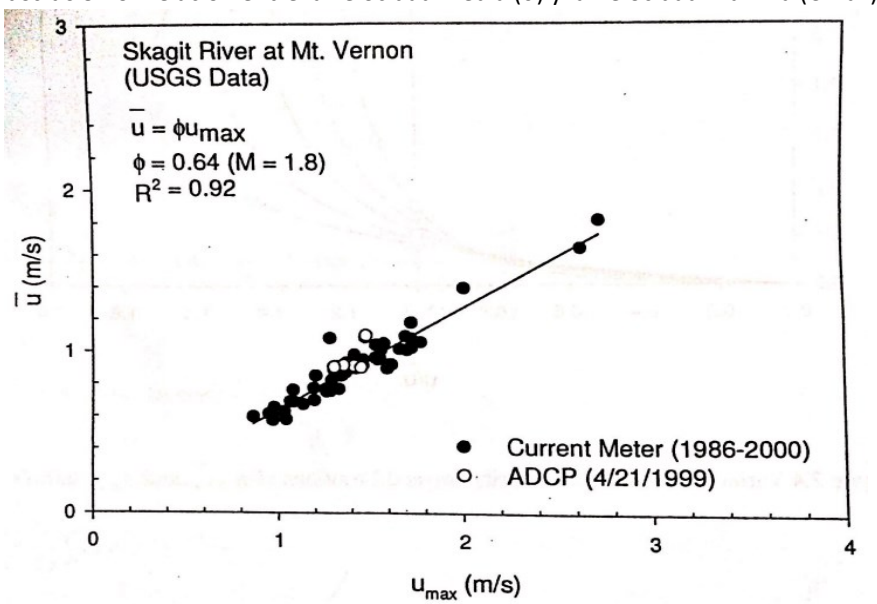
La ecuación 3-1 la utilizamos para hallar el parámetro M que es el la distribución de la probabilidad y es constante en una sección de canal dado. Despejando esta incógnita. El valor de ϕ se estima mediante la ilustración 6 la cual es la relación entre la velocidad media y la velocidad máxima.

[9] SHIH-MENG HSU. "Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling"
[10] SHIH-MENG HSU. "Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling"

$$\frac{u}{u_{max}} = \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \qquad \textbf{Ecu. (3-1)}$$

u : Velocidad media.
Umax : Velocidad máxima.
M: Distribución de la probabilidad.

Ilustración 6. Relación entre la velocidad media (ū) y la Velocidad Máxima (Umax)



Fuente: Shih-meng Hsu. "Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling"

La grafica de la ilustración 6. Proviene de realizar una regresión al origen, esta regresión se debe calcular mediante el siguiente método.

Dado que el interés es obtener la ecuación de regresión o modelo ajustado, a continuación se presenta la aplicación del método de mínimos cuadrados para obtener la estimación del único parámetro en este modelo.

Supóngase que se tienen n observaciones (X1, Y1),(X1,Y1)…(Xn,Yn), entonces la suma de cuadrados del error es dada por.

$$SC_{\text{Error}} = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \beta_1 X_i)^2 \quad \textbf{Ecu. (3-2)}$$

Al derivar esta suma de cuadrados con respecto a único parámetro β_1 se tiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial SC_{\text{Error}}}{\partial \beta_1} &= \frac{\partial}{\partial \beta_1} \left[\sum_{i=1}^{n} (Y_i - \beta_1 X_i)^2 \right] \\ &= -2 \sum_{i=1}^{n} X_i (Y_i - \beta_1 X_i) \end{aligned} \quad \textbf{Ecu. (3-3)}$$

Al igual a cero la anterior ecuación se obtiene la llamada ecuación normal

$$\sum_{i=1}^{n} Y_i X_i - \sum_{i=1}^{n} b_1 X_i^2 = 0 \quad \textbf{Ecu. (3-4)}$$

Al despejar b_1 el estimador de la pendiente es

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i X_i}{\sum_{i=1}^{n} X_i^2} \quad \textbf{Ecu. (3-5)}$$

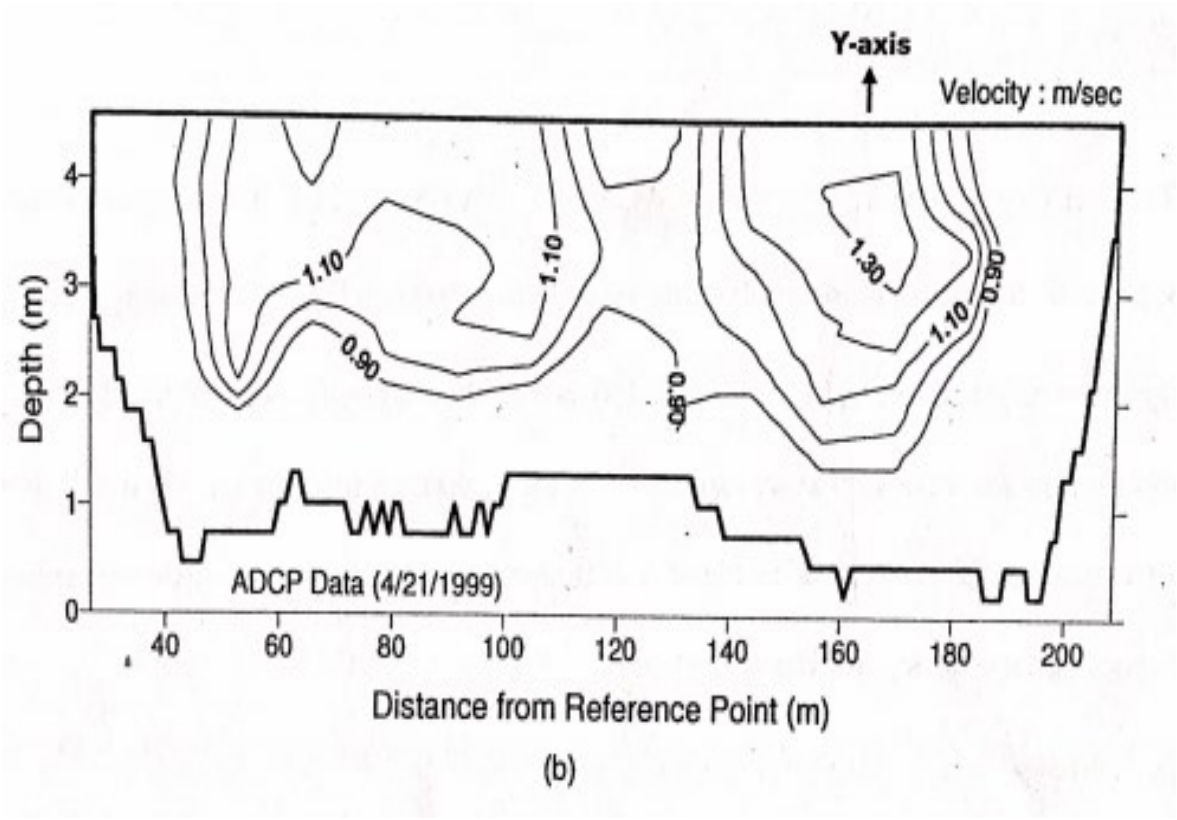
Luego el modelo ajustado

3.5 CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE EJE Y

La velocidad máxima Umax se produce en el denominado eje Y. allí podemos encontrar los datos necesarios de la sección transversal del canal para aplicarlos en el método eficiente de medición de la descarga.

Para determinar la ubicación del eje Y usamos las gráficas de las iso líneas de los aforos entregados por el IDEAM, los cuales son de una sección de canal ilustración 7, en esta figura se puede ver el ejemplo de la ubicación del eje Y donde se ubica la velocidad máxima de la sección Umax, 1,30 m / s y a 160 m desde el punto de referencia.

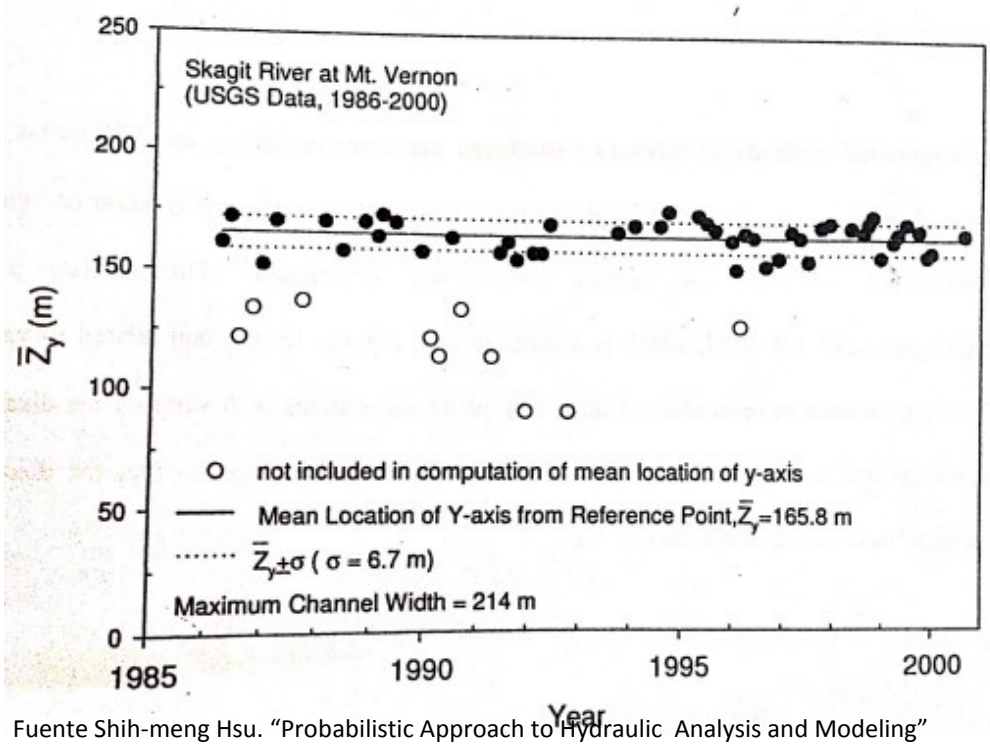
Ilustración 7. Determinación de la localización del eje Y, distribución de la velocidad sobre de la superficie del agua y bajo la superficie del agua.



Fuente: Shih-meng Hsu. "Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling"

La verificación de la localización del eje Y se realiza por medio de la figura de la ilustración 8, donde según el ejemplo se tiene un registro de quince años el cual indica que en promedio el eje Y se ubica a 165,8 de punto de referencia. También se determina en la gráfica una desviación estándar de 6,7 m, en análisis se hace en una sección de 214 m.

Ilustración 8.Análisis de la localización del eje Y.



Fuente Shih-meng Hsu. "Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling"

3.6 LOCALIZACION DE LA MAXIMA VELOCIDAD Y SU RELACION CON M.

Cuando la máxima velocidad Umax ocurre por debajo superficie del agua, h permite denotar la ubicación de la velocidad máxima por debajo de la superficie del agua. Se encuentra entonces una relación entre h y M así.

$$\frac{h}{D}(M) = -0.2\ ln\frac{G(M)}{58.3} \qquad (3\text{-}6)$$

Donde G(M)

$$G(M) = \frac{e^M - 1}{M\emptyset} \qquad (3\text{-}7)$$

La velocidad que ocurre por debajo de la superficie del agua es

$$u = \frac{u_{max}}{M} ln\left[1 + (e^M - 1)\frac{y}{D-h} exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right)\right] \qquad (3\text{-}8)$$

Donde;
D: la profundidad del agua.
y : Distancia vertical desde el fondo del canal hasta el punto de medición.
h : Distancia vertical de la velocidad máxima desde la superficie del agua.

4. MARCO CONCEPTUAL

Tabla 2. Marco conceptual

TÉRMINO	DEFINICIÓN	CITA
Distribución de Probabilidades	Es la frecuencia con la cual se pueden esperar unos resultados dentro de una cantidad de datos.	"forma útil de resumir las variaciones en los valores observados" Estadística para administración y economía - Escrito por Richard I. Levin, David S. Rubin
Máxima Entropía		"En el campo de la termodinámica, los estados de máxima entropía compatibles con las restricciones operativas (por ejemplo constancia de la energía o del volumen) constituyen un conjunto de configuraciones en las cuales se espera (con alta probabilidad) encontrar a un sistema. Con esta base es posible responder a la pregunta de cuál es la distribución de probabilidad que solo contiene la información que está comprometida en las restricciones y que no tiene ningún otro sesgo o supuesto. Esa respuesta está contenida en el principio de máxima entropía." Jaynes 1957.
Caudal máximo	Cantidad de de agua que puede pasar por una sección de un canal en un periodo dado.	"Valor máximo de caudal para un periodo instantáneo." Glosario geohidrológico Escrito por Ramón Ortiz Aguirre

Fuente. Autor.

.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1 GENERALIDADES

Colombia es uno de los países con mayor número de recursos hídricos en el mundo. En él se pueden encontrar seis tipos de aguas, incluyendo aguas lluvias, aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas termo minerales, aguas marinas y oceánicas y aguas de alimentación glacial.

Igualmente, Colombia por su ubicación geográfica y las condiciones del terreno, presenta una precipitación anual alta, lo que representa una significativa abundancia hídrica comparada con el nivel promedio de lluvias mundial.

La riqueza hídrica del país se ve representada en la extensa red superficial de aguas que cubre al país, en las favorables condiciones que permiten el almacenamiento de aguas subterráneas y en la existencia de un importante número de cuerpos de agua (aguas estancadas como lagos y pantanos) y enormes extensiones de humedales.

La presencia de altas montañas, extensas sabanas y húmedas selvas que caracterizan nuestro territorio, además de la presencia de grandes reguladores y reservorios como los páramos junto con la ubicación estratégica del país en la zona tropical hacen que Colombia tenga un potencial hídrico único.

En principio se hará un análisis de aforos históricos de dos de los ríos más caudalosos de Colombia en una estación de cada uno, río cauca estación tres cruces y río Vichada estación Santa Rita.

5.2 LOCALIZACION ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se divide en dos:

Río Cauca:

La cuenca hidrográfica del Río Cauca se destaca en el contexto nacional como un lugar estratégico, pues en ella se localizan la industria azucarera, buena parte de la

zona cafetera, las zonas de desarrollo minero y agropecuario de Antioquia y el Bajo Cauca, un sector significativo de la industria manufacturera del Occidente colombiano, dos de las ciudades más pobladas del país y tres de las consideradas intermedias, permitiendo contabilizar fácilmente cerca de unos 10`000000 de habitantes, lo cual representa aproximadamente el 25 % de la población total del país. El Río Cauca, principal afluente del Río Magdalena, tiene una longitud de 1350 Km y una hoya hidrográfica de unos 63300 Km

. Se puede dividir en cuatro tramos: Alto Cauca, Valle del Cauca, Cauca Medio y Bajo Cauca

- Estación Tres Cruces: Ubicada en el municipio de Achi, en el suroccidente del departamento de Bolívar a 50 metros aproximadamente sobre el nivel del mar, limita al norte con Magangue, al sur con San Jacinto, al occidente con Majagual y Guaranda, y al oriente con los municipios de Pinillos, Tisquiso y Montecristo.

  Su territorio cuenta con una variada geografía en la que se incluyen zonas llanas y ligeramente onduladas en la costa, montañas hacia el interior, ciénagas y zonas inundables y selvas en el sur, cerca de las estribaciones de la cordillera Central. Posee una variada vegetación y fauna. Entre la vegetación hay cocoteros, batatas, uveros y mangles en la playa y bosques tropófilos (caracolí, orejero, ceiba, guarumo).

  Las coordenadas de la estación Tres cruces 08ª42`10.8``N -- 74ª31`02``

Rio Vichada:

Tiene 700 km de extensión. Solamente recorre el departamento de Vichada. Nace en la selva y desemboca al Río Orínoco. Su ribera es propicia para extraer madera de construcción y caucho. El río Muco es su principal afluente. San Jose de Ocune, Puerto Nariño y Santa Rita son sus principales poblaciones ribereñas. Igualmente sirve de límite natural entre las regiones naturales de la Orinoquia y la Amazonia, en el sector oriental de esta región en Colombia.

- Estación Santa Rita: Ubicada en el municipio de Cumaribo, limitado por el norte con los municipios de Santa Rosalía, La primavera y puerto Carreño, Vichada, cuyo límite lo determina el río Tomo; por el sur limita con el departamento del Guaviare demarcado por el río del mismo nombre; al Oriente limita con la Republica de Venezuela limite determinado por el río Orinoco, y por el occidente limita con el departamento del Meta.
  La Orinoquía, es una de las regiones más ricas en recursos hídricos de Colombia, especialmente en el tramo en el cual el río Orinoco demarca la frontera con Venezuela, ya que en esta pequeña área desembocan importantes afluentes, los cuales reciben a su vez aportes de ríos menores y caños asociados a todo el sistema.

  La Orinoquía es una de las regiones más ricas en recursos hídricos de Colombia, especialmente en el tramo, que el río Orinoco demarca la frontera con Venezuela; en esta pequeña área desembocan importantes afluentes, los cuales reciben a su vez aportes de ríos menores y caños asociados a todo el sistema

  El territorio municipal y su red hidrográfica hacen parte de la cuenca del río Orinoco; el municipio, cuenta con los ríos Tomo, Vichada, Guaviare, Tuparro y caño Matavén como principales tributarios del río Orinoco que dependen

de factores como la pluviosidad en la cordillera y en la llanura, el régimen de los ríos, la erosión y el arrastre de material de la cordillera.

Las coordenadas de la estación Santa Rita 4ª51`58`` N – 68ª21`46``.

6. METODOLOGÍA

6.1 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Según James McKernan: “en la investigación – acción, es la investigación de profesionales en ejercicio para resolver sus propios problemas y mejorar su práctica. Para el práctico reflexivo es una forma de desarrollo en su gestión. En tanto que actividad y práctica social, se hace en colaboración e implica un gran número de participantes.”

La investigación será del tipo correlacional, se relacionan las variables velocidad y área en el mismo punto del rio, y se desea conocer si el resultado de del caudal, es similar usando dos métodos diferentes. El enfoque será cuantitativo, y que se recolectaran datos y se trataran de comprobar hipótesis, se aportara evidencia a una teoría, de que el método de máxima entropía funciona para calcular los caudales.

La investigación se realizó en dos etapas:

ETAPA I INVESTIGACIÓN

- Recopilación de información con el grupo de investigación
- Tabulación de la información.
- Interpolación de velocidades.
- Elaboración de isolíneas de las secciones transversales de los ríos basados en las tablas de aforos interpoladas.
- Por el principio de máxima entropía se determina la abscisa (eje Y) de la sección del rio donde se encuentra la velocidad máxima por aforo.
- Grafica de relación de velocidad media (**ū) –** velocidad máxima (**umax**).
- Calculo del parámetro M.
- Calculo de la velocidad máxima en el eje Y.
- Calculo de la velocidad promedio.
- Calculo de caudal

ETAPA II ANALISIS DE RESULTADOS

- Se comparan los resultados del caudal con los caudales contenidos en los aforos y en la información del IDEAM.

6.2 OBJETO DE ESTUDIO

Ésta investigación tiene como objeto determinar la bondad de aplicación del Principio de Máxima Entropía en el análisis de caudales, tanto a nivel de aplicación práctica como a nivel de bondad estadística.

6.3 VARIABLES

Tabla 3. Análisis de variables

CATEGORÍA DE ANÁLISIS	VARIABLE	INDICADORES
Sección transversal de río Datos iniciales	Aforo	Ancho de la sección Velocidad media Radio hidráulico Profundidad media Caudal
Análisis de datos y cálculos	Aplicación del método	Velocidad máxima Localización del eje Y Velocidad media Relación velocidad máxima – velocidad media Parámetro M Ancho de la sección del rio Caudal

Fuente: Autor.

7. TRABAJO DE INGENIERÍA

La población de estudio para el proyecto lo compone el rio Cauca y río Vichada, para la determinación del caudal se tendrán aforos tomados en un punto, también se contara con los datos de alturas del punto donde se tomaron los aforos, para calcular el área de la sección, los datos serán suministrado por el IDEAM.

7.1 CALCULO DEL CAUDAL EN LA ESTACION TRES CRUCES RIO CAUCA

Se hará en cálculo de caudal por el método de máxima entropía en los ríos Cauca estación Tres Cruces. La estación está ubicada en el municipio de Achí en el departamento de Bolívar.

Se recolectan 16 aforos (Ver anexo 1 – Aforos estación Tres Cruces Río Cauca).

Grafica de Isolíneas de velocidad

Se tiene los datos de los aforos de las carteras de aforos de la estación Tres Cruces.

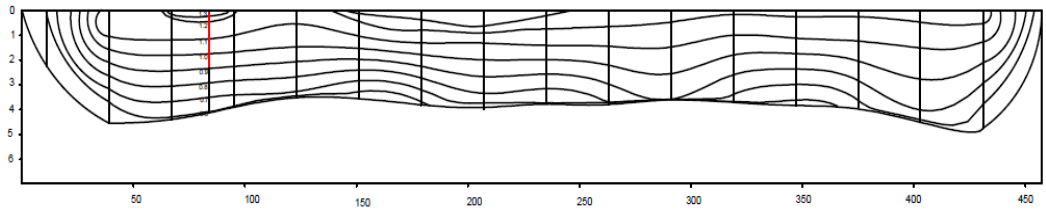
Tabla 4. Aforos y fecha de la estación Tres Cruces Río Cauca.

Aforo	Año
000	14-mar-86
011	21-nov-86
013	16-dic-86
047	20-jun-87
029	09-abr-87
048	21-jun-87
079	26-nov-87
055	13-dic-88
110	13-mar-89
123	08-jun-89
129	23-nov-89
142	20-mar-90
161	17-ago-90
077	13-may-91
176	12-sep-87
185	19-abr-86

Fuente Autor

Con los datos se procede a realizar un perfil de sección transversal del rio por cada aforo, graficando las isolineas de velocidad del flujo en dicha sección. En la siguiente imagen se tiene un ejemplo de uno de los perfiles resultantes.

Ilustración 9. Perfil rio cauca con isolineas de velocidad de flujo.



Fuente: Autor

Dichos perfiles se encuentran como archivos anexos.

Localización eje *y*

Utilizando los perfiles realizados, se determina la ubicación de la velocidad máxima en la sección transversal del río para cada uno de los aforos, y se mide la distancia desde la orilla de referencia, en nuestro caso desde la izquierda, los datos de la velocidad máxima encontrada y su localización con respecto a la orilla se muestran en la tabla 5.

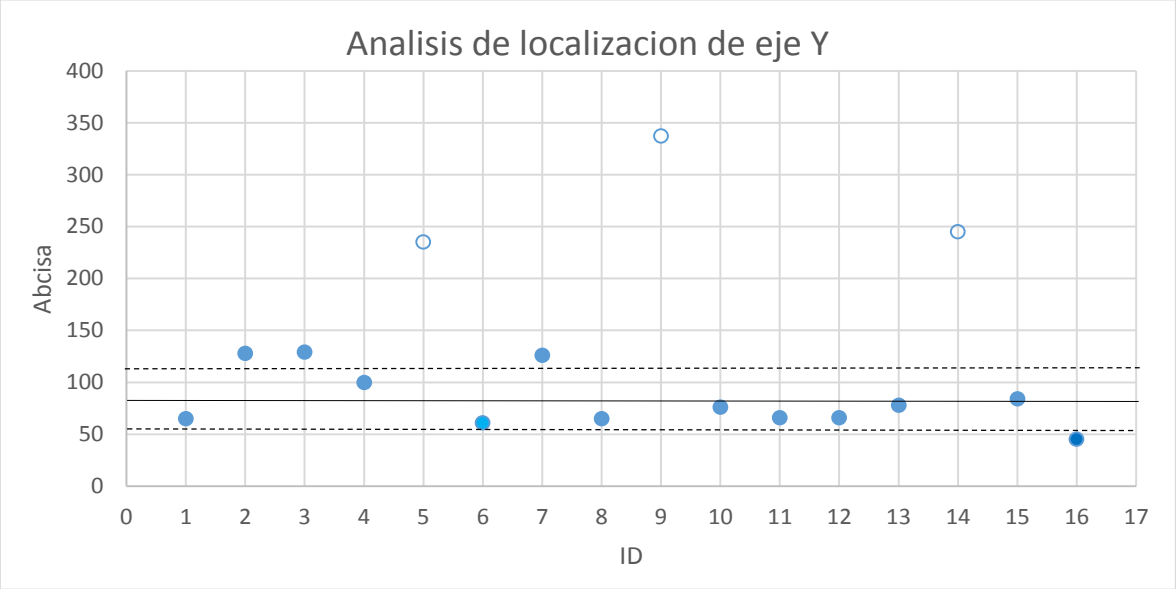
Tabla 5. Localización del eje *Y*.

Id	Año	Aforo	u máx. (m/s)	Abcs (m)
1	14-mar-86	000	1,33	65
2	21-nov-86	011	1,53	128
3	16-dic-86	013	1,40	129
4	20-jun-87	047	1,25	100
5	09-abr-87	029	1,19	235
6	21-jun-87	048	1,30	61
7	26-nov-87	079	1,57	126
8	13-dic-88	055	1,83	65
9	13-mar-89	110	1,53	337
10	08-jun-89	123	1,54	76
11	23-nov-89	129	1,54	66
12	20-mar-90	142	1,17	66
13	17-ago-90	161	1,76	78
14	13-may-91	077	1,43	245
15	12-sep-87	176	1,83	84
16	19-abr-86	185	1,50	45

Fuente. Autor

Posteriormente se construye una gráfica donde se relaciona la velocidad máxima vs la localización o abscisa donde esta se encuentra.

Ilustración 10 Análisis de localización eje *Y*



No incluido en el calculo de la media de localizacion del eje y.
Media de la localizacion del eje y = 83.8 m.
Desviacion estandar σ= 28.14 m.

Fuente. Autor

En la ilustración 9 se observa la distribución de los datos de velocidad en los distintos aforos, el promedio de los datos arrojo un resultado de 83.8 metros desde la orilla, con una desviación estándar de 28,14.

Cabe aclarar que los datos de los aforos identificados con los números 5, 9 y 14, no se tuvieron en cuenta debido a que tiene valores muy altos y desvían el valor del promedio.

Relación velocidad media – velocidad máxima

Luego se toma el valor de la velocidad media de cada aforo (este se encuentra en la parte final de cada registro), y la velocidad máxima encontrada con los perfiles por cada aforo, aparecen en la tabla 6.

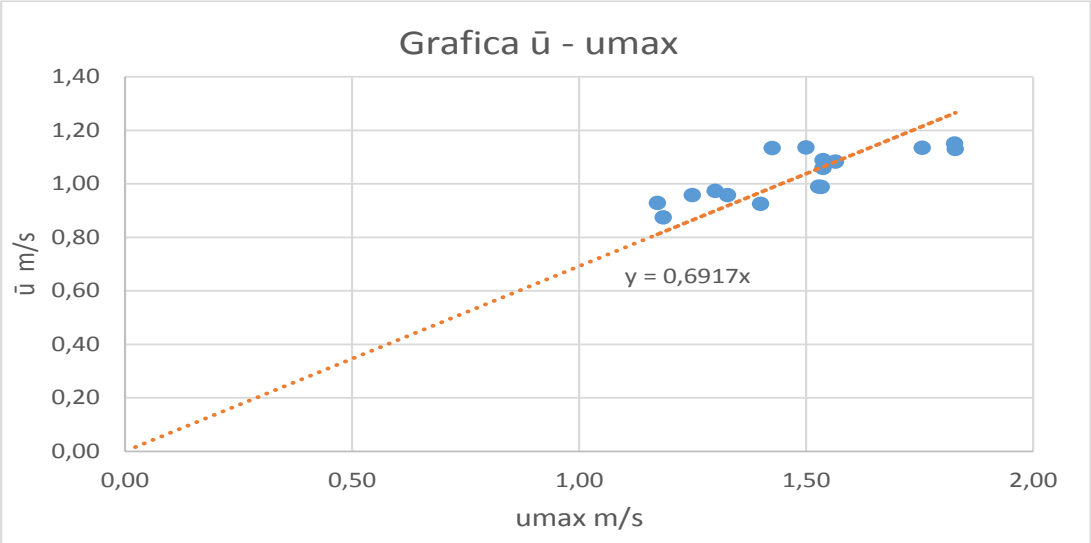
Tabla 6. Velocidad Máxima – Velocidad Media, por cada aforo.

Aforo	u máx. (m/s)	ū (m/s)
000	1,33	0,96
011	1,53	0,99
013	1,40	0,93
047	1,25	0,96
029	1,19	0,88
048	1,30	0,97
079	1,57	1,08
055	1,83	1,15
110	1,53	0,99
123	1,54	1,09
129	1,54	1,06
142	1,17	0,93
161	1,76	1,14
077	1,43	1,13
176	1,83	1,13
185	1,50	1,14

Fuente. Autor

Se hace la gráfica de la relación de las dos velocidades, sin embargo es necesario realizar una regresión al origen, utilizando la ecuación 3-5 se obtiene la gráfica de la ilustración 10.

Ilustración 11. Línea de tendencia relación velocidad media – velocidad máxima.



Fuente. Autor

Se observa la línea de tendencia hacia el origen y su respectiva ecuación; Y=0,6917x lo que significa que la pendiente de la recta es 0.69, este dato nos es la relación entre velocidad promedio y velocidad máxima, también denominada ϕ, como se observa en la ecuación;

$$\bar{u} = \phi\, u_{max}$$

ϕ= 0,69

$$\bar{u} = 0.69\, u_{max}$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{max}} = 0.69 \qquad \textbf{Ecu (7-1)}$$

Calculo del parámetro M

El valor ø es 0.69, entonces se aplica la ecuación 3-1 para encontrar el parámetro M:

$$\frac{u}{u_{max}} = \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}$$

Se calculó el valor de M por tanteo, cuyas iteraciones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 7. Calculo por tanteo del parámetro de distribución M.

Iteración	ø	e^M	(e^M)-1	1/M	M	ø calculado
1	0,69	2,718	1,718	1,00	1	0,58
2	0,69	7,389	6,389	0,50	2	0,66
3	0,69	20,086	19,086	0,33	3	0,72
4	0,69	12,182	11,182	0,40	**2,5**	0,69

Fuente. Autor

El valor de M es de 2.5

Calculo de la velocidad máxima en el eje *y*

Se calcula el valor h que es el nivel al que se encuentra la velocidad máxima desde la superficie del agua en el eje *y*, con la ecuación 3-6 y 3-7:

$$\frac{h}{D}(M) = -0.2\ ln\frac{G(M)}{58.3}$$

Donde G(M)

$$G(M) = \frac{e^{M}-1}{M\emptyset}$$

Reemplazando M= 2.5 y ǿ=0.69

$$G(M) = \frac{e^{2.5}-1}{2.5 * 0.69} = 6.48$$

$$\frac{h}{D}(M) = -0.2\ ln\frac{6.48}{58.3} = 0.44$$

El valor de la relación h/D es igual a 0,44

Utilizando la ecuación 3-8, y aplicando la relación h/D, hallamos la velocidad máxima

$$u = \frac{u_{max}}{M} ln\left[1 + (e^{M}-1)\frac{y/D}{1-h/D} exp\left(1 - \frac{y/D}{1-h/D}\right)\right]$$

Donde:

y : Distancia desde el fondo del lecho hasta el punto de la muestra.
M: 2.5
h/D: 0.44
D: Distancia desde la superficie del agua hasta el fondo del canal en cada aforo.
u : Velocidad en el punto de muestra en el eje *y*.
umax: Velocidad máxima en el eje *y*.

Despejando y remplazando se tiene:

$$u_{max} = \frac{u}{ln\left[1 + (e^{2.5} - 1)\frac{y/D}{1 - 0.44} exp\left(1 - \frac{y/D}{1 - 0.44}\right)\right]} * 2.5$$

Se realiza el cálculo de la velocidad máxima del eje *y* para cada aforo, cuando se tiene una sola muestra de velocidad tomada en el eje *y* para cada aforo se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8**. Calculo de la velocidad máxima en cada uno de los aforos sobre el eje y.**

Aforo	**u máx eje *y* (m/s)**
000	1,06
011	1,24
013	1,16
047	1,13
029	1,07
048	1,24
079	1,23
055	1,80
110	1,16
123	1,38
129	1,40
142	1,09
161	1,64
077	1,24
176	1,74
185	1,31

Fuente. Autor

Calculo de la velocidad promedio en el eje *y*

Se tiene el valor de M, el valor de u_{max} la velocidad promedio ū del eje *y* se puede determinar por la ecuación 7-1.

$$\frac{\bar{u}}{u_{max}} = 0.69$$

Despejando ū con u_{max} hallada en el paso anterior, se halla la velocidad promedio del eje *y* por aforo, que se muestra en la tabla 9.

Tabla 9. Velocidad promedio en cada aforo sobre el eje Y.

Aforo	u máx. (m/s)	ū (m/s)
000	1,06	0,73
011	1,24	0,85
013	1,16	0,80
047	1,13	0,78
029	1,07	0,74
048	1,24	0,86
079	1,23	0,85
055	1,80	1,24
110	1,16	0,80
123	1,38	0,95
129	1,40	0,97
142	1,09	0,76
161	1,64	1,13
077	1,24	0,85
176	1,74	1,20
185	1,31	0,90

Fuente. Autor

Calculo del caudal

Se realizan dos métodos para el cálculo del caudal y al final se realiza una comparación de los dos métodos vs los datos de los aforos y caudales medios en la base de datos del IDEAM.

- **Método 1.**

- **Aforo:** Numero del aforo respectivo.
- **Área:** Se calcula el área de cada perfil en el programa Autocad.
- **V.prom:** Velocidad ū encontrada en el eje *y*

- **Q calculado:** Se multiplica el área por la velocidad promedio hallada, y el resultado es el Caudal calculado por el método de máxima entropía.
- **Q Aforo:** Caudales de las tablas de aforos, y con los caudales medios mensuales del mes del aforo.
- **Q medio mes:** Caudales medios mensuales, (la misma fecha del aforo)
- **% error 1:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q aforo.
- **% error 2:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q medio mes.

Tabla 10. Caudales método No 1 río Cauca

Aforo	Area (m)	V prom (m/s)	Q calculado (m/s)	Q aforo (m/s) 1	Q medio mes (m/s) 2	% error 1	% error 2
000	1740,27	0,73	1271	1603,1	1571	20,7	19,1
011	2620,67	0,85	2239	2628,8	3004	14,8	25,5
013	1860,75	0,80	1487	1730,0	1896	14,1	21,6
047	1800,9	0,78	1403	1754,3	2065	20,0	32,1
029	1430,74	0,74	1054	1251,8	1171	15,8	10,0
048	1800,76	0,86	1546	1788,3	2065	13,5	25,1
079	2770,97	0,85	2352	3055,3	3473	23,0	32,3
055	2870,03	1,24	3568	3342,2	3177	6,8	12,3
110	1940,84	0,80	1557	1965,0	1937	20,7	19,6
123	2300,05	0,95	2183	2633,0	2699	17,1	19,1
129	2590,79	0,97	2506	2760,7	3113	9,2	19,5
142	1380,83	0,76	1043	1295,2	1338	19,5	22,0
161	2140,81	1,13	2419	2476,8	1978	2,3	22,3
077	1780,56	0,85	1522	2060,4	2420	26,1	37,1
176	2760,71	1,20	3318	3178,6	2439	4,4	36,0
185	2160,68	0,90	1955	2508,7	2175	22,1	10,1
					Promedio	15,64	22,73

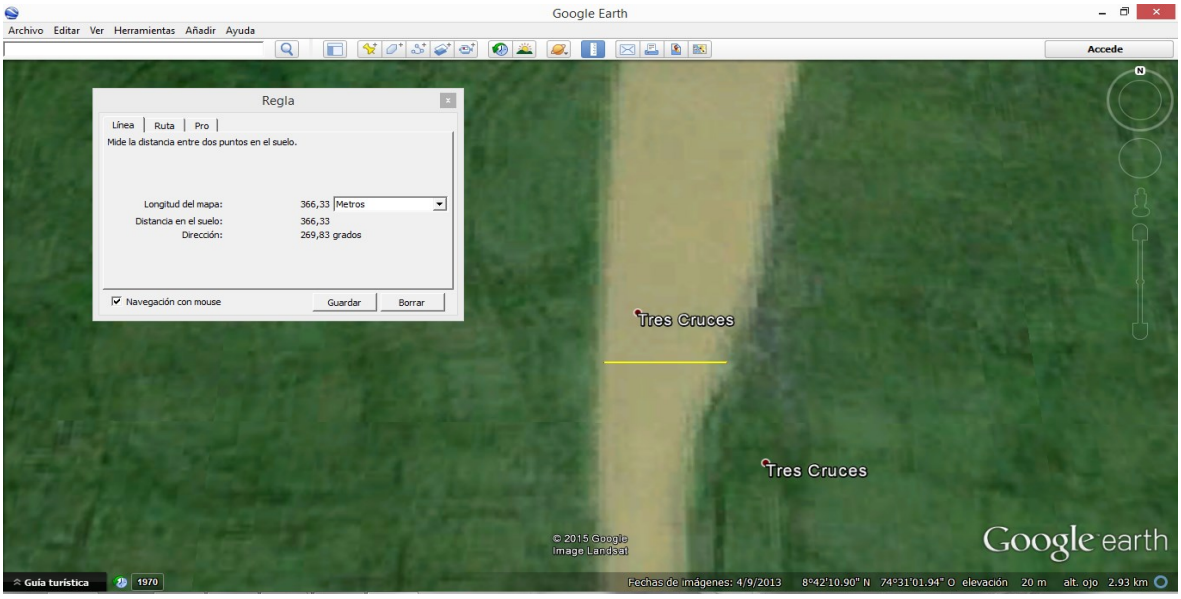
.

Fuente. Autor.

Método 2

Para este cálculo se hace el uso de la herramienta Google Earth. Y se mide el ancho de la sección trasversal en la zona donde se ubica la estación Tres Cruces.

Ilustración 12. Sección trasversal rio Cauca estación Tres Cruces.



Fuente. Google Earth.

Ancho de la sección transversal 366 mts.

- **Long:** Longitud del ancho de la sección medido en el programa Google Earth.
- **Nivel:** Es el promedio de la relación entre el ancho del rio (366 mts) y el área de cada perfil.

- **Área:** Se calcula el área de cada perfil como si fuera un canal rectangular long * nivel.
- **V.prom:** Velocidad ū encontrada en el eje *y*
- **Q Calculado:** Se multiplica el área por la V. promedio encontrada y el resultado es el caudal hallado por el método de máxima entropía.
- **Q Aforo:** Caudales de las tablas de aforos, y con los caudales medios mensuales del mes del aforo.
- **Q medio mes:** Caudal medios multianual.
- **% error 1:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q aforo.
- **% error 2:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q medio mes.

Tabla 11. Caudales método No 2 río Cau

Aforo	Long (m)	Nivel (m)	Area (m2)	V prom (m/s)	Q calculado (m/s)	Q aforo (m/s) 1	Q medio multianual 2	% error 1	% error 2
000	366	5,80	2122,8	0,73	1551	1603,1	2388	3,3	35,1
011	366	5,80	2122,8	0,85	1814	2628,8	2388	31,0	24,0
013	366	5,80	2122,8	0,80	1696	1730,0	2388	2,0	29,0
047	366	5,80	2122,8	0,78	1653	1754,3	2388	5,7	30,8
029	366	5,80	2122,8	0,74	1563	1251,8	2388	24,9	34,5
048	366	5,80	2122,8	0,86	1823	1788,3	2388	1,9	23,7
079	366	5,80	2122,8	0,85	1802	3055,3	2388	41,0	24,6
055	366	5,80	2122,8	1,24	2639	3342,2	2388	21,0	10,5
110	366	5,80	2122,8	0,80	1703	1965,0	2388	13,3	28,7
123	366	5,80	2122,8	0,95	2015	2633,0	2388	23,5	15,6
129	366	5,80	2122,8	0,97	2054	2760,7	2388	25,6	14,0
142	366	5,80	2122,8	0,76	1604	1295,2	2388	23,8	32,8
161	366	5,80	2122,8	1,13	2398	2476,8	2388	3,2	0,4
077	366	5,80	2122,8	0,85	1814	2060,4	2388	11,9	24,0
176	366	5,80	2122,8	1,20	2551	3178,6	2388	19,7	6,8
185	366	5,80	2122,8	0,90	1921	2508,7	2388	23,4	19,6
							Promedio	17,21	22,13

Fuente. Autor.

7.2 CALCULO DEL CAUDAL EN LA ESTACION SANTA RITA RIO VICHADA

Se hará en cálculo de caudal por el método de máxima entropía en los ríos Vichada estación Santa Rita. Se sigue el mismo procedimiento que con el rio anterior.

Se recolectan 8 aforos (Ver anexo 1 – Aforos estación Santa Rita, Río Vichada).

Grafica de Isolíneas de velocidad

Se tomaron los datos de los aforos

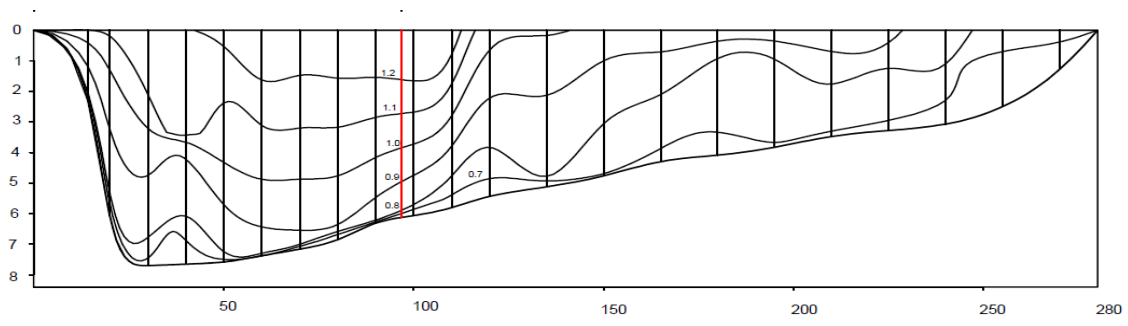
Tabla 12. Aforos de la estación Santa Rita Vichada.

Aforo	Año
054	20-nov-08
071	21-jun-08
097	22-nov-09
105	06-jun-10
130	21-jun-08
140	22-mar-09
294	15-may-11
322	14-ago-10

Fuente Autor.

Con los datos se procede a realizar un perfil de sección transversal del rio por cada aforo, graficando las isolineas de velocidad del flujo en dicha sección. En la siguiente imagen se tiene un ejemplo de uno de los perfiles resultantes.

Ilustración 13. Perfil rio vichada con isolineas de velocidad de flujo.



Fuente: Autor

Localización eje y

Se determina la ubicación de la velocidad máxima en la sección transversal del río para cada uno de los aforos.

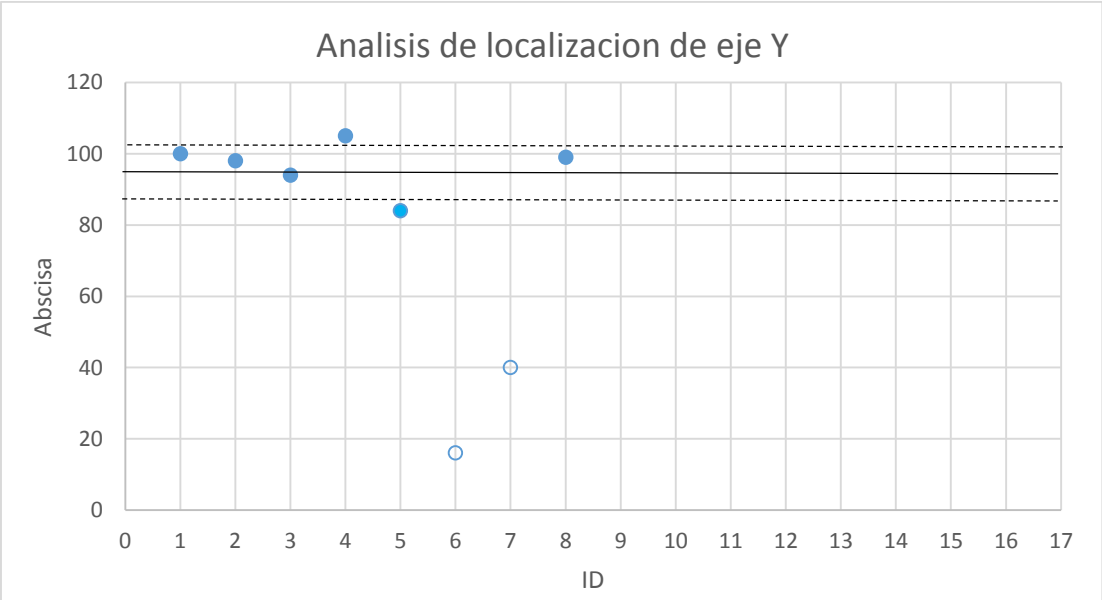
Tabla 13. Localización del eje Y.

ID	Año	Aforo	u máx. (m/s)	Abcs (m)
1	20-nov-08	054	1,26	100
2	21-jun-08	071	1,32	98
3	22-nov-09	097	1,03	94
4	06-jun-10	105	1,39	105
5	21-jun-08	130	1,40	84
6	22-mar-09	140	0,76	16
7	15-may-11	294	1,19	40
8	14-ago-10	322	1,51	99

Fuente. Autor.

Posteriormente se construye una gráfica donde se relaciona la velocidad máxima vs la localización o abscisa donde esta se encuentra.

Ilustración 14 Análisis de localización eje Y.



○	No incluido en el calculo de la media de localizacion del eje y.
———	Media de la localizacion del eje y = 83.8 m.
- - - - -	Desviacion estandar σ= 28.14 m.

Fuente. Autor.

En la ilustración 14 se observa la distribución de los datos de velocidad en los distintos aforos, el promedio de los datos arrojo un resultado de 96.7 metros desde la orilla, con una desviación estándar de 7.15.

Cabe aclarar que los datos de los aforos identificados con los números 6 y 7, no se tuvieron en cuenta debido a que tiene valores muy altos y desvían el valor del promedio.

Relación velocidad media – velocidad máxima

Luego se toma el valor de la velocidad media de cada aforo (este se encuentra en la parte final de cada registro), y la velocidad máxima encontrada con los perfiles por cada aforo, aparecen en la tabla 14.

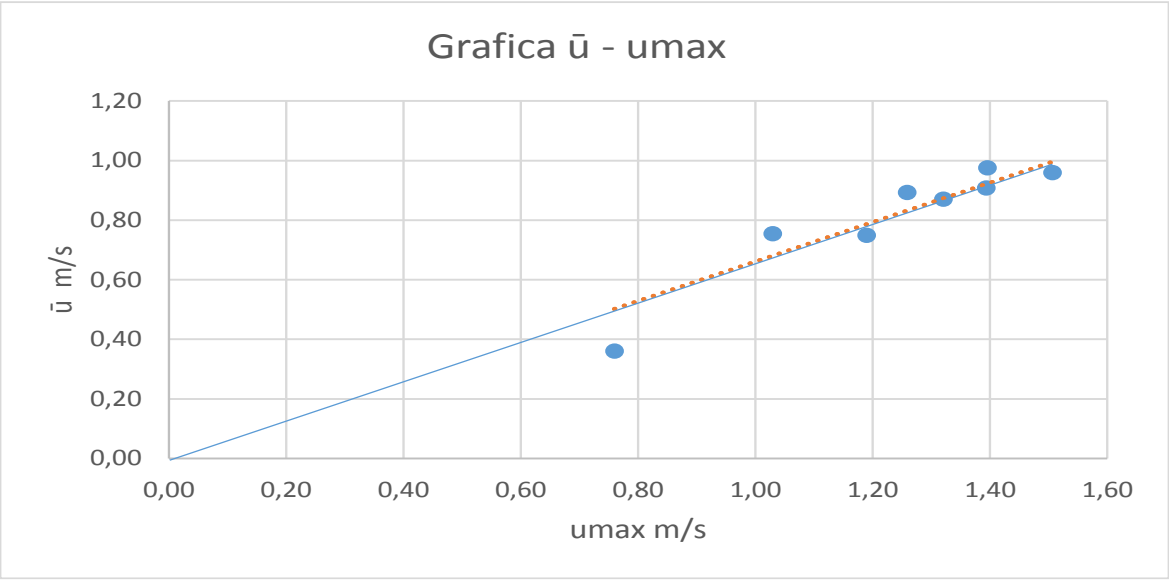
Tabla 14. Relación Velocidad Máxima – Velocidad Media.

Aforo	u máx. (m/s)	ū (m/s)
054	1,26	0,89
071	1,32	0,87
097	1,03	0,76
105	1,39	0,91
130	1,40	0,98
140	0,76	0,36
294	1,19	0,75
322	1,51	0,96

Fuente. Autor

Se hace la gráfica de la relación de las dos velocidades, sin embargo es necesario realizar una regresión al origen, utilizando la ecuación 3-5 se obtiene la gráfica de la ilustración 15.

Ilustración 15.Línea de tendencia relación velocidad media – velocidad máxima.



Fuente. Autor.

Se observa la línea de tendencia hacia el origen la pendiente de la recta es 0.66 este dato nos es la relación entre velocidad promedio y velocidad máxima, también denominada ϕ, como se observa en la ecuación;

$$\frac{\bar{u}}{u_{max}} = 0.66 \qquad \textbf{Ecu (7-2)}$$

Calculo del parámetro M

El valor ǿ es 0.66, entonces se aplica la ecuación 3.1 encontrar el parámetro M:

$$\frac{u}{u_{max}} = \phi = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M}$$

Se calculó el valor de M por tanteo, cuyas iteraciones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 15. Calculo por tanteo del parámetro de distribución M.

ǿ	e^M	(e^M)-1	1/M	M	ǿ calculado
0,66	2,718	1,718	1,00	1	0,58

0,66	7,389	6,389	0,50	2	0,66

Fuente. Autor.

El valor de M es de 2

Calculo dela velocidad máxima en el eje y

Se calcula el valor h que es el nivel al que se encuentra la velocidad máxima desde la superficie del agua en el eje *y*, con la ecuación 3-6 y 3-7:

$$\frac{h}{D}(M) = -0.2\ ln\frac{G(M)}{58.3}$$

Donde G(M)

$$G(M) = \frac{e^{M}-1}{M\emptyset}$$

Reemplazando M= 2 y ø=0.66

$$G(M) = \frac{e^{2.5}-1}{2 * 0.66} = 4.84$$

$$\frac{h}{D}(M) = -0.2\ ln\frac{4.84}{58.3} = 0.5$$

El valor de h/D es igual a 0,50

Utilizando la ecuación 3-8, y aplicando la relación h/D, hallamos la velocidad máxima

$$u = \frac{u_{max}}{M} ln\left[1 + (e^{M}-1)\frac{y}{D-h} exp\left(1 - \frac{y}{D-h}\right)\right]$$

Donde:

y : Distancia desde el fondo del lecho hasta el punto de la muestra.
M: 2
h/D: 0.5
D: Distancia desde la superficie del agua hasta el fondo del canal en cada aforo.
u : Velocidad en el punto de muestra en el eje *y*.
umax: Velocidad máxima en el eje *y*.

Despejando y remplazando:

$$u_{max} = \frac{u}{ln\left[1 + (e^2 - 1)\frac{y/D}{1 - 0.5} exp\left(1 - \frac{y/D}{1 - 0.5}\right)\right]} * 2$$

Se realiza el cálculo de la velocidad máxima del eje *y* para cada aforo, cuando se tiene una sola muestra de velocidad tomada en el eje *y* para cada aforo se muestra en la Tabla 8.

Tabla 16. Calculo **de la velocidad máxima en cada uno de los aforos sobre el eje** y.

Aforo	**u máx. (m/s)**
054	1
071	1,1
097	0,9
105	1,2
130	1
140	0,48
294	0,8
322	1,1

Fuente. Autor

Calculo de la velocidad promedio en el eje y

Se tiene el valor de M, el valor de u_{max} la velocidad promedio ū del eje *y* se puede determinar por la ecuación 7-2.

$$\frac{\bar{u}}{u_{max}} = 0.66$$

Tabla 17. Velocidad promedio en cada aforo sobre el eje Y.

Aforo	**U máx. (m/s)**	**ū (m/s)**
054	1,36	0,90
071	1,28	0,85
097	1,47	0,97
105	1,28	0,84
130	1,30	0,86
140	0,76	0,50
294	1,21	0,80
322	1,33	0,88

Fuente. Autor

Calculo del caudal

Se realizan dos métodos para el cálculo del caudal y al final se realiza una comparación de los dos métodos vs los datos de los aforos y caudales medios en la base de datos del IDEAM.

- **Método 1.**

- **Aforo:** Numero del aforo respectivo.
- **Área:** Se calcula el área de cada perfil en el programa Autocad.
- **V.prom:** Velocidad ū encontrada en el eje *y*
- **Q calculado:** Se multiplica el área por la velocidad promedio hallada, y el resultado es el Caudal calculado por el método de máxima entropía.
- **Q Aforo:** Caudales de las tablas de aforos, y con los caudales medios mensuales del mes del aforo.
- **Q medio mes:** Caudales medios mensuales, (la misma fecha del aforo)
- **% error 1:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q aforo.
- **% error 2:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q medio mes.

Tabla 18. Caudales método No 1 río Vichada.

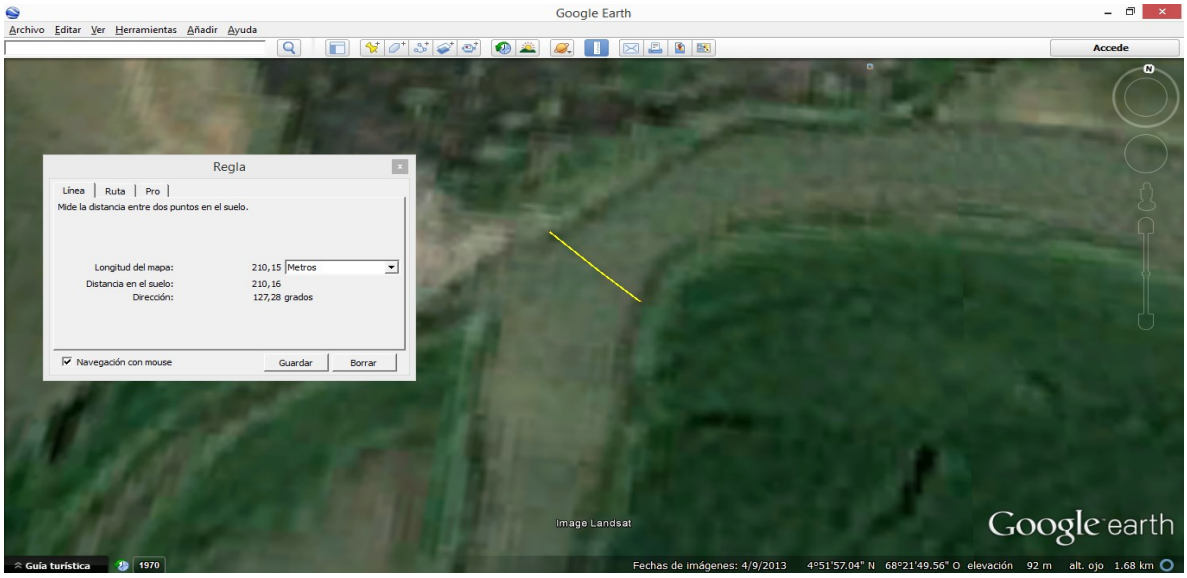
Aforo	Area (m)	V Prom (m/s)	Q calculado (m/s)	Q aforo (m/s) 1	Q medios mes 2	% error 1	% error 2
054	1290,5	0,90	1160	1152,0	1202,0	0,7	3,5
071	1390,8	0,85	1178	1230,0	1122,0	4,2	5,0
097	1310,6	0,97	1271	997,0	1120,0	27,5	13,5
105	1500,9	0,84	1265	1371,0	1378,0	7,8	8,2
130	1460,9	0,86	1252	1445,0	1223,0	13,4	2,4
140	640,5	0,50	320	234,0	193,6	36,8	65,4
294	1120,52	0,80	893	919,0	965,4	2,8	7,5
322	1770,6	0,88	1559	1722,0	1741,0	9,4	10,4
					Promedio	10,73	6,16

Fuente. Autor.

Método 2

Para este cálculo se hace el uso de la herramienta Google Earth. Y se mide el ancho de la sección trasversal en la zona donde se ubica la estación Santa Rita.

Ilustración 16. Sección trasversal rio Vichada estación Santa rita



Fuente. Google Earth.

Ancho de la sección transversal 265 mts.

- **Long:** Longitud del ancho de la sección medido en el programa Google Earth.
- **Nivel:** Es el promedio de la relación entre el ancho del rio (366 mts) y el área de cada perfil.
- **Área:** Se calcula el área de cada perfil como si fuera un canal rectangular long * nivel.
- **V.prom:** Velocidad ū encontrada en el eje *y*
- **Q Calculado:** Se multiplica el área por la V. promedio encontrada y el resultado es el caudal hallado por el método de máxima entropía.
- **Q Aforo:** Caudales de las tablas de aforos, y con los caudales medios mensuales del mes del aforo.
- **Q medio mes:** Caudal medios multianual.
- **% error 1:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q aforo.
- **% error 2:** Porcentaje de error comparando el Q calculado y el Q medio mes

Tabla 19. Caudales método No 2 río vichada

Aforo	Ancho (m)	Nivel (m)	Area (m2)	V. prom (m/s)	Q calculado (m/s)	Q aforo (m/s) 1	Q medio mes 2	% error 1	% error 2
054	265	4,87	1290,5	0,90	1160	1152,0	1032,1	0,7	12,4
071	265	5,25	1390,8	0,85	1178	1230,0	1032,1	4,2	14,2
097	265	4,95	1310,6	0,97	1271	997,0	1032,1	27,5	23,1
105	265	5,66	1500,9	0,84	1265	1371,0	1032,1	7,8	22,5
130	265	5,51	1460,9	0,86	1252	1445,0	1032,1	13,4	21,3
140	265	2,42	640,5	0,50	320	234,0	1032,1	36,8	69,0
294	265	4,23	1120,52	0,80	893	919,0	1032,1	2,8	13,5
322	265	6,68	1770,6	0,88	1559	1722,0	1032,1	9,4	51,1
							Promedio	6,38	22,50

Fuente. Autor

ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos basados en la aplicación del método de máxima entropía para estimar la velocidad en función del parámetro M y la determinación del área para completar la fórmula de continuidad se puede deducir que.

- La velocidad máxima para cada aforo presenta una tendencia de ubicación en una región de la sección trasversal del río a lo largo del tiempo, lo que permite predecir que la velocidad máxima siempre estará cerca de esta sección.
- Porcentajes de error:

Estación Tres Cruces, Rio Cauca:

Método	% Error 1	% Error 2
1	15,64 %	22,73 %
2	17,21 %	22,13 %

Estación Santa Rita, Rio Vichada:

Método	% Error 1	% Error 2
1	6,38 %	6,16 %
2	16,77 %	8,54 %

De acuerdo a las tablas, el mayor porcentaje de error para el rio Cauca se presenta con el método 1 con un valor de 22,73 % del error al comparar el caudal calculado con el caudal medio mensual, en la estación Santa Rita el mayor error se presenta con el método 2., al comparar el caudal calculado con el caudal aforado.

-

CONCLUSIONES

1. Se realizó el cálculo del caudal del Rio Cauca en la estación Tres Cruces, y del Rio Vichada en la estación Santa Rita, por el procedimiento de máxima entropía, el cual está en función del parámetro M, con el que posteriormente se calcula la velocidad máxima y promedio, para hallar finalmente el caudal por este método.
2. Los porcentajes de error tiene varianzas elevadas en algunos casos debido a los pocos datos utilizados en la muestra.
3. El método de la máxima entropía es una alternativa para análisis de caudales, dada su gran facilidad en la obtención de datos y el procesamiento de la información.
4. El parámetro M demuestra ser un parámetro estable, debido a que se mantiene constante en todos las diferentes secciones del rio, y además no varía en el tiempo.
5. El cálculo de la velocidad máxima en función del parámetro M, tiene resultados similares a los tomados por puntos de velocidad en las gráficas de las iso líneas.
6. El estudio indica que el método es confiable y exacto en las crecidas, pues con el aumento de velocidad del flujo más distribuciones de velocidades tienden en el rango espacial de muestreo hacia un valor constante de entropía.

RECOMENDACIONES

Para una mejor práctica del método de máxima entropía en el cálculo de caudales se recomienda lo siguiente.

1. Tener una gran cantidad de datos para la distribución de probabilidad, esto permite que se tengan varianzas muy pequeñas y una incertidumbre menor.
2. Se recomienda la aplicación de este método en diferentes ríos del país, teniendo en cuenta que contamos con una gran cantidad de recurso hídrico.
3. En la práctica sería recomendable tomar en cuenta pocas verticales próximas entre sí dentro del rango espacial de muestreo, ya que la exactitud depende de la calidad de las observaciones.

BIBLIOGRAFIA

SHIH-MENG HSU, PhD. Probabilistic Approach to Hydraulic Analysis and Modeling. First edition. U.S.A.. VDM Verlag Dr. Muller. 2009. 127P.

LLINAS, Alberto. Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. Primera edición. Colombia: Ediciones Uninorte, 2005. 405P.

FRANZINI, Joseph B. Mecánica de fluidos. Novena edición. México: Mc Graw Hill, 1999.193P

GILES, Ranald V. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Tercera edición. Madrid: Mc Graw Hill, 1994.

INFORMACION ELECTRONICA

Universidad de las Américas-Puebla (Puebla-México). Comparación del método del principio de la máxima entropía en la estimación de parámetros de la distribución de valores extremos tipo I [En línea].
http://evirtual.lasalle.edu.co/info_basica/nuevos/guia/GuiaClaseNo.3.pdf [Citado 19 de mayo de 2015]

Food and Agriculture Organization of the United Nations. Naciones Unidas. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía – Capitulo 4 – Caudal [En línea].< http://www.fao.org/docrep/t0848s/t0848s06.htm>. [Citado 19 de mayo de 2015]

Máxima Entropía y la Incertidumbre Asociada a un Proceso [En línea].
< http://allman.rhon.itam.mx/~ggomez/Entropia.pdf>[Citado 19 de mayo de 2015]

ANEXOS