

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE
TRAZADORES**

LEONARDO MURTE GALLO

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2013**

**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE
TRAZADORES**

LEONARDO MURTE GALLO

IC-019-2012-1

**Trabajo de grado en modalidad Auxiliar de Investigación presentado como
requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil**

**Ing. Jorge Corredor
Tutor Universidad Militar Nueva Granada**

**Ing. Alfredo José Constáin
Cotutor externo**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2013**

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD

MAYOR GENERAL ® EDUARDO ANTONIO HERRERA BERBEL

Rector

BRIGADIER GENERAL (r) ALBERTO BRAVO SILVA

Vicerrector General

Dra. SONIA OSPINO GÓMEZ

Vicerrector Administrativo

Dra. MARTHA LUCÍA BAHAMÓN JARA

Vicerrector Académico

Dra. JACQUELINE BLANCO BLANCO

Vicerrectora de Investigaciones

ERNESTO VILLAREAL SILVA, Ph.D.

Decano de la Facultad de Ingeniería

ING. LUZ YOLANDA MORALES MARTIN

Directora Programa de Ingeniería Civil

AGRADECIMIENTOS

La vida misma se llena de alegría cuando se cumplen las metas que nos trazamos, cuando podemos sentirnos completamente dichosos de alcanzar los logros que con tanto esfuerzo conseguimos, cada uno de ellos adquiere un valor más especial cuando podemos compartirlo con las personas allegadas y que de una u otra manera ayudaron a cada paso para cumplir estas metas.

Hoy puedo dar gracias a Dios por darme el valor y el tiempo para continuar mi camino; a mi Madre pues gracias a ella vivo para poder soñar y cumplir mis sueños, a mis abuelos pues con ellos nunca me faltó un lugar seguro donde llegar, un lugar donde tengo el amor de familia, a mis tíos ya que el aliento que me dieron y su ayuda incondicional me aportaron para estar aquí, a Doryan Lozano por mostrarme realmente que es la vida que escogí para mí y la profesión que llevare con gran orgullo toda mi vida, gracias a Angie Londoño por el apoyo y los buenos deseos, por su tiempo e inteligencia y por darme parte en el camino que la lleva a compartir mi profesión. Gracias a todos aquellos por el apoyo brindado en cada uno de estos días para lograr uno de mis sueños.

Gracias a la Universidad Militar Nueva Granada y toda su estructura, pues lograron formar en mí un ingeniero capaz, y eficiente, preocupado por la sociedad y con grandes valores morales para ejercer la profesión.

Bogotá, D.C., Enero 2013

Señores:

**COMITÉ DE OPCIÓN DE GRADO
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA**

Ref.: Presentación
Informe

En cumplimiento del reglamento de la Facultad para el desarrollo de la Opción de Grado, modalidad **AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN** me permito presentar para los fines pertinentes la propuesta titulada: **“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES”**

Tutor:

Ing. Jorge Corredor
Tutor Universidad Militar Nueva Granada

Atentamente,

Leonardo Murte Gallo
Estudiante de Ingeniería Civil.
Código: 1100858

Bogotá D.C, Enero de 2013.



APROBACIÓN

El trabajo de grado en modalidad de **AUXILIAR DE INVESTIGACIÓN** PARA LA UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA titulado “**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES**”. Para soportar el presente **LEONARDO MURTE GALLO**, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar el título de “Ingeniero Civil”, fue aprobado por el tutor.

Ing. Jorge Corredor
Tutor Universidad Militar Nueva Granada

CONTENIDO

1. TRASPORTE DE MASA	5
1.1. LONGITUD DE MEZCLA	6
1.2. MEZCLA COMPLETA.....	8
1.3. PHI (ϕ) COMO FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE MEZCLA.....	10
1.4. TEORÍA CLÁSICA DE LA ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN	10
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1. EQUIPO.....	13
2.2. MÉTODO.....	13
2.3. APLICACIÓN DEL EQUIPO.....	14
2.4. COMPONENTES DEL EQUIPO.....	14
2.4.1. Hardware.....	15
2.4.1.1. PDA ZATURUS de SHARP / PDA AXIM de Dell	15
2.4.1.2. INTERFAZ IMHE (Convertidor de señales desde el sensor hasta la PDA)	15
2.4.1.3. Sensor.....	16
2.4.2. Software	17
2.4.2.1. Monitoreo.....	18
2.4.2.2. Análisis.....	19
2.4.2.3. Informes.....	21
3. EJEMPLO DE APLICACIÓN	23
3.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO.....	24
3.2. UBICACIÓN DEL SENSOR EN EL CAUCE	24
3.3. ELECCIÓN PUNTO DE MEDICIÓN Y PUNTOS DE VERTIMIENTOS	24
3.4. VERTIMIENTO	24
3.5. MEDICIONES	25
4. INFORMES TÉCNICOS AFOROS CON TRAZADOR SALINO QUEBRADA “LA VIEJA”	27
4.1. NOVIEMBRE 1	27
4.1.1. Recopilación de datos	28
4.1.2. Tiempo de llegada de las primeras partículas de trazador:.....	29
4.1.2.1. Vertimiento 1 (X=10 m)	29
4.1.2.2. Vertimiento 2 (X=20 m)	31
4.1.3. Modelación de las curvas experimentales de trazador.....	31
4.1.3.1. Vertimiento 1 (X=10 m).....	32
4.1.3.2. Vertimiento 2 (X=20 m).....	32
4.1.4. Calculo del Coeficiente longitudinal de dispersión	33
4.1.5. Datos promedio consolidados.....	34
4.1.6. Curva de tendencia: Cp(t).....	34
4.1.7. Calculo de datos operativos del cauce en el tramo estudiado.....	35
4.1.7.1. Datos de Hidráulica y transporte de masa.....	35
4.1.7.2. Datos de Geomorfología	36
4.2. NOVIEMBRE 15.....	37

4.2.1. Curvas aforos	37
4.2.1.1. Vertimiento 1 (X=15m)	38
4.2.1.2. Vertimiento 2 (X=15m)	38
4.2.1.3. Vertimiento 3 (X=30m)	39
4.2.1.4. Vertimiento 4 (X=30m)	40
4.2.2. Corrección de caudal.....	41
4.2.3. Curva de tendencia: Cp(t).....	42
4.2.4. Curva de $\varphi(t)$	43
CONCLUSIONES	45
GLOSARIO.....	46

Índice de Figuras

Figura 1. Longitud de mezcla.....	8
Figura 2. Mezcla completa.....	9
Figura 3. PDA	15
Figura 4. INTERFAZ	16
Figura 5. Sensor	16
Figura 6. Pantalla de inicio IDF	17
Figura 7. Monitoreo.....	18
Figura 8. Datos iniciales del vertimiento.....	18
Figura 9. Grafica sin filtro.....	19
Figura 10. Grafica con filtro.....	19
Figura 11. Análisis	20
Figura 12. Crear curva ideal.....	20
Figura 13. Resultados.....	21
Figura 14. Área bajo la curva	21
Figura 15. Resumen de variables	22
Figura 16. Aforo Noviembre	27
Figura 17. Grafica aforos Noviembre	28
Figura 18. Aforo Noviembre 1	30

Índice de Graficas

Grafica 1. Tiempos de aforos.....	29
Grafica 2. Grafica equipo Noviembre 1	30
Grafica 3. Tiempo pico.....	31
Grafica 4. Aforo 10m.....	32
Grafica 5. Aforo 20m.....	33
Grafica 6. Aforo total	33
Grafica 7. Curva de tendencia Cp(t)	35
Grafica 8 Aforo 1 15m.....	38
Grafica 9 Aforo 2 15m.....	39
Grafica 10 Aforo 3 30m.....	40

Grafica 11 Aforo 4 30m.....	40
Grafica 12 r_q vs φ	41
Grafica 13 Curva de tendencia $C_p(t)$	43
Grafica 14 Curva de $\varphi(t)$	44

Índice de Tablas

Tabla 1 Parámetros medidos por el equipo en el cauce.	13
Tabla 2. Recopilación datos aforo.....	28
Tabla 3. Datos promedio consolidados.....	34
Tabla 4 Recopilación de datos.....	37
Tabla 5 Corrección caudal	42
Tabla 6 Valores de curva $C_p(t)$	42

RESUMEN

La creciente importancia del recurso hídrico en el mundo, ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que nos permitan agilizar procesos, comenzando con la toma de muestras y la interpretación de los datos, con base en dicha problemática se han desarrollado diferentes modelos que logran darnos una idea real del comportamiento de los contaminantes en el agua, el uso de los trazadores es la base para este tipo de estudios además de ser la herramienta principal para el desarrollo del equipo IDF. con el cual podemos obtener datos en tiempo real su interfaz nos permite un análisis básico al momento de realizar los aforos, con gran aceptación frente a los diferentes modelos existentes, esto gracias a la confiabilidad de los datos arrojados por ello el uso de los trazadores para la determinación de la calidad de agua se vuelve el eje central de la investigación, partiendo de las bases del transporte de masa podemos llevar a cabo un estudio real y confiable del comportamiento que tendrá un contaminante aguas abajo de su punto de vertimiento.

ABSTRACT

The growing importance of water resources in the world, has led to the development of new technologies that allow us to streamline processes, beginning with sampling and interpretation of the data, based on this problem have been developed that achieve different models give us a real idea of the behavior of pollutants in the water, the use of tracers is the basis for this type of study as well as being the main tool for the IDF team development. with which we can get real-time data interface allows basic analysis at the time of the appraisals, with great success against the different models, this thanks to the reliability of the data obtained from the use of this tracer determining water quality becomes the focus of research, starting from the basics of mass transport can carry out a real and reliable study to be a contaminant behavior downstream of its discharge point.

INTRODUCCIÓN

El agua lleva largo tiempo siendo estudiada, y cada día se busca ampliar el conocimiento sobre el tema, con diferentes estudios, que en pocas palabras buscan entender cómo está la calidad del agua, y que está pasando con ella, no solamente en un laboratorio como es usual, ya se buscan la ayuda de la tecnología para lograr realizar estudios en campo. De esta manera se plantea la necesidad de investigar los factores importantes tales como datos hidráulicos y de transporte, porque es de suma importancia establecer relaciones practicas entre el flujo y la concentración de posibles contaminantes.(1)

Dada la problemática es necesario el estudio de diferentes metodologías para poder relacionar los efectos ya mencionados, y la manera más idónea de relacionar esto es a través de la Longitud de Mezcla (LM), la cual es una característica de vital importancia para analizar el comportamiento de los solutos trasportados por un cauce, ya que la longitud de mezcla indica en qué medida dichos solutos van abarcando la sección transversal del cauce, hasta lograr la condición llamada Mezcla Completa (MC) que es cuando el soluto abarca totalmente la sección transversal del cauce, que para este caso es La Quebrada La Vieja.

Con base en dicho parámetro se puede observar la incidencia de un contaminante que va a ser transportado por el cauce, donde se encuentran diferentes condiciones a partir del vertimiento del mismo, puesto que a mayor distancia aguas abajo del vertimiento el soluto va a ir abarcando mayor área de la sección transversal, lo cual es importante para lugares en los cuales se hacen captaciones de agua.

En la actualidad el parámetro LM es estudiado con base en diferentes metodologías, en vista de la diferencia entre cauces, por lo cual se tienen que tener diferentes contemplaciones para cada caso. Los modelos matemáticos generados van mostrando diferentes datos e incluso el uso de diferentes variables del rio, por esto se busca unificar en una sola teoría dichas variables, lo cual se ha logrado con el avance de la tecnología y se ve reflejado en el equipo elaborado por la empresa Amazonas Technologies, la cual ideo un equipo capaz de medir diferentes parámetros físicos, hidráulicos y de transporte luego de un vertimiento súbito, lo cual ahorra en gran medida la toma de datos para el análisis de la LM.

El equipo lleva por nombre INIRIDA DEEP FLOW (IDF), el cual basándose en los parámetros ya mencionados realiza una modelación de la cantidad de concentración del soluto que va pasando por unidad de tiempo en un punto específico del cauce, claro está luego de realizar el vertimiento súbito del

trazador aguas arriba. De esta manera podemos ver la facilidad para la obtención de datos, lo cual se va a representar en la interpretación de datos de una manera más rápida, gracias a la interfaz que maneja el IDF.

En la actualidad se tienen diferentes metodologías enfocadas a la caracterización de la calidad de agua, sabemos que ello proviene directamente de los contaminantes que se encuentren presentes en el agua, ya que a mayor cantidad de contaminantes el agua se considera de menor calidad, por lo cual es necesario conocer la influencia que tienen diferentes tipos de vertimientos sobre el cauce de un río.

Cada día se buscan nuevas maneras de predecir, controlar y administrar los diferentes recursos hídricos, por lo cual es necesario tener modelos que puedan llevar este tipo de actividades de una manera real y acorde con la ubicación de cada problema, por eso es necesario conocer la importancia de la advección y dispersión de solutos en los cauces, ya que partiendo de ello se puede conocer el recorrido en el cual tendrá influencia dicho soluto, además se tienen que buscar las herramientas necesarias para obtener datos de una manera rápida y confiable, y a su vez la manera de procesar dicha información. Lo anterior con el fin de encontrar la llamada Longitud de Mezcla, la cual es de vital importancia para nuestro estudio, ya que es el resultado que se busca encontrar con los diferentes aforos, para determinar en qué longitud el soluto logra una dispersión lateral completa.(2)

Para dar solución al problema es necesario formularlo con base en interrogantes tales como: ¿Cuál es el comportamiento de los solutos transportados en el agua de la Quebrada La Vieja?, ¿Cómo se puede interpretar la calidad del agua de la Quebrada la Vieja utilizando trazadores?, Con que metodología se pueden analizar los procesos de Advección y Dispersión de solutos en la Quebrada la Vieja?, entre otras, las cuales darán las pautas de los objetivos a cumplir, la relevancia del estudio y el alcance del proyecto.

La importancia del proyecto está en determinar la calidad del agua, para lo cual es necesario realizar una serie de monitoreos de manera constante sobre el mismo punto de estudio, con el fin de reducir los errores que se pueden presentar por la diferencia de intervalos de tiempo entre cada estudio, ya que la calidad del agua es una variable que depende de muchas otras, partiendo de condiciones atmosféricas hasta componentes que van ligados directamente con las poblaciones circundantes a los cuerpos de agua.

Al considerar la frecuencia entre ensayos realizados, es necesario encontrar metodologías acorde con el tema que se busca analizar, tales como la advección y dispersión de los solutos, determinando así el comportamiento de los mismos por el cauce de la Quebrada la Vieja y modelando las condiciones. Con el fin de establecer la longitud de mezcla de los trazadores se utilizó Sulfato de sodio “sal común” puesto que se debe encontrar además de un vertimiento

súbito del trazador la distancia en la cual dicho trazador cubrirá totalmente la sección transversal del flujo.(3)

Para la Universidad Militar Nueva Granada es una necesidad ya que esta debe mantenerse a la vanguardia de las últimas tecnologías, y debe estar en la capacidad de competir y debatir frente a las otras universidades, mostrando también mejoras académicas y de investigación innovando con mecanismos que creen competencias y disciplinas líderes en investigación.

1. TRASPORTE DE MASA

En lo que se refiere al Transporte de Masa, los principales procesos que afectan al flujo de un contaminante en el agua son la advección y la dispersión hidrodinámica.(4). Con base en esta primera definición vemos la importancia de estos dos procesos, por ello como primera medida vamos a dar una explicación sobre dichos términos.

Por advección se entiende el movimiento ideal que realiza un soluto en una corriente, el soluto es transportado sin desviación del transporte medio del flujo, y es desplazado a una velocidad igual a la velocidad media de desplazamiento del flujo (velocidad macroscópica).(4). Como segunda parte tenemos la dispersión la cual se puede entender como el movimiento que realiza el soluto para dispersarse de manera transversal al flujo, debido a diferentes características propias de los cauces, como su rugosidad y pendiente. Debido a los cambios de velocidad que se generan dentro del cauce el soluto comienza a abarcar más de la sección transversal del cauce.(4).

El transporte de masa se lleva basado en los dos principios antes mencionados, como vemos los solutos que vierten en un cauce son transportados aguas abajo por la corriente cumpliendo los dos parámetros anteriormente nombrados, para de esta manera lograr que el soluto abarque la sección transversal del cauce mientras se van degradando sus partículas. De manera ideas se podría decir que este transporte debería llevar la cantidad de soluto que se vierte hasta un punto determinado aguas abajo, y que en ese punto se encuentre la misma cantidad de soluto, de lo anterior nace la primera teoría que describe el transporte de masa, comenzando con la idea de modelar dichas condiciones del flujo de manera matemática se comenzó pensando en realizar medida de la cantidad de soluto en un punto y esperando que la medida aguas abajo sea la misma. Las primeras aproximaciones se hacían dependiendo de la cantidad de masa que entra en un elemento volumétrico del dominio del flujo y el que sale del mismo: flujo másico. (4).

Son diferentes los mecanismos que pueden alterar el soluto o la masa del mismo vertida en el cauce, el comportamiento del soluto se rige por:

- La dispersión por el proceso de transporte del soluto por diferentes medios del cauce.
- La advección por la cantidad de soluto que es transportada en manera longitudinal a lo largo del cauce.
- Reacciones que se presentan por las propiedades físico químicas del soluto al contacto con el agua.

- Conexiones diferentes al cauce, ya que se pueden presentar aportes de caudal y de soluciones con características similares al de estudio, o en cambio pueden presentar conexiones que se lleven el caudal y el soluto.

Con base en los anteriores parámetros y considerando un flujo uniforme sin pérdidas de ningún tipo, se puede hacer el primer la primera modelación de las condiciones del soluto, de la siguiente manera.(4).

$$\text{Variacion de masa} = \text{Flujo entrante} - \text{Flujo saliente} \pm R \pm I \quad \text{Ec. (1)}$$

Aplicando la teoría de la conservación de masa podemos interpretar la ecuación anterior, pues vemos que la masa que va a variar en el cauce está delimitada por los procesos físicos (Advección y dispersión). Además se pueden presentar variaciones de la cantidad de soluto en el cauce por los procesos químicos físicos y biológicos (R) y/o aportes desde el exterior (I).(4).

1.1. LONGITUD DE MEZCLA

Un parámetro de gran importancia en el transporte de solutos es la llamada longitud de mezcla (L_M), la cual es definida como aquella distancia a la cual la difusión lateral se ha completado totalmente y por lo tanto la concentración del trazador en la sección transversal es casi homogénea, para lo cual se propuso una formula práctica, para poder determinar este parámetro. (2).

$$L_M \approx \frac{k * U_x * W^2}{\epsilon_y} \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

L_M = Longitud de mezcla.

k = Constante empírica.

U_x = Velocidad media del flujo.

W = Ancho medio del cauce.

ϵ_y = Coeficiente transversal de dispersión.

En la ecuación anterior vemos un valor de k , el cual ha sido el gran problema de esta fórmula, ya que al ser una constante que varía dependiendo del cauce y lugar en el que se busque la L_m , no da confiabilidad a las personas que realizan las investigaciones, hasta llegar al punto que se buscan realizar diferentes mediciones transversales en búsqueda de un ajuste más acertado. El coeficiente trasversal de dispersión (ϵ_y) es el encargado de parametrizar los

efectos difusivos de origen molecular y turbulento además los efectos generados a partir de la combinación de gradientes de velocidad que generan un cambio transversal del soluto en el cauce.

El estado de la técnica actual con respecto a la estimación o determinación de la L_M en cuerpos de agua es limitado debido a que se cuenta con fórmulas estadísticas o empíricas cuya precisión y practicidad es discutible, como la propuesta por Ruthven (1971) posteriormente adoptada por Fischer:(5).

$$L_M = \frac{0.075 * U_x * W}{\varepsilon_y} \quad \text{Ec. (3)}$$

Dónde:

U_x = Velocidad media del cauce.

W = Ancho del cauce.

ε_y = Coeficiente de difusión vertical.

Podemos ver que a diferencia de la Ecuación (2), la Ecuación (3) deja de lado el parámetro k pero esto debido únicamente a una serie de ensayos que buscaron modelar dicho valor.

Podemos encontrar diferentes ecuaciones que se plantean de la misma manera, siendo diferentes únicamente en el valor de k , como la siguiente ecuación.

$$L_M = \frac{0.4 * U_x * W^2}{\varepsilon_y} \quad \text{Ec. (4)}$$

También se pueden encontrar ecuaciones que describen la distribución del contaminante desde un vertimiento puntual corresponde a una distribución Gaussiana, Sanders (1978). Definió la Longitud de Mezcla en un río uniforme y derecho para una mezcla completa vertical y lateral con las siguientes ecuaciones:(5).

$$L_y = \frac{\sigma_y^{2\mu}}{2D_y} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$L_z = \frac{\sigma_z^{2\mu}}{2D_z} \quad \text{Ec. (6)}$$

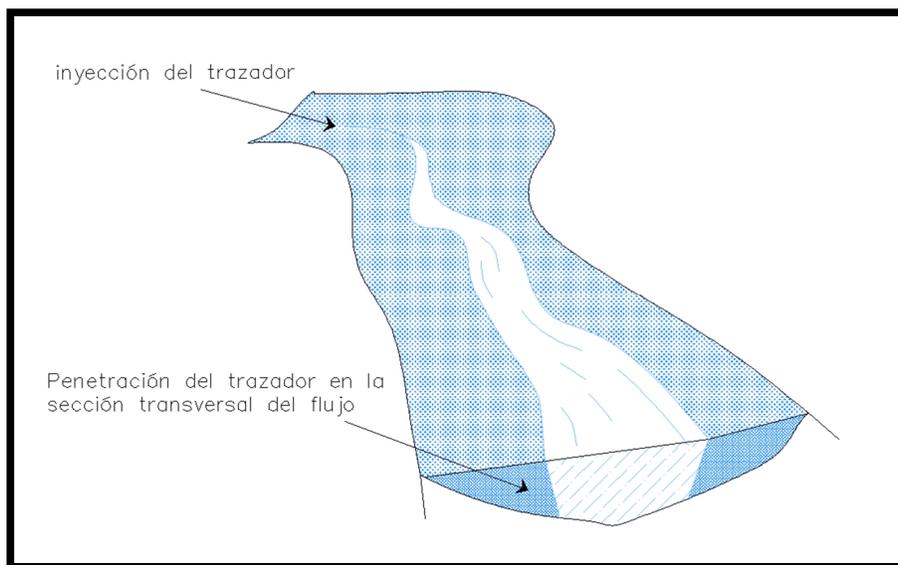
- = Longitud de Mezcla para una mezcla completa lateral.
- = Longitud de Mezcla para una mezcla completa vertical.
- = Distancia del punto de vertimiento al límite o borde lateral más lejano.
- = Distancia del punto de vertimiento al límite o borde vertical más lejano.

1.2 MEZCLA COMPLETA

Para cualquier tipo de cauce se puede realizar una estimación de la longitud de mezcla explicada en la sección 1.1, vemos el comportamiento de los solutos y los procesos que se deben llevar a cabo para poder distribuir el soluto de una manera uniforme en la sección transversal del cauce. En pocas palabras la longitud desde el vertimiento hasta el punto de distribución homogénea sobre el cauce es llamada longitud de mezcla, el cual se ve como una pluma por la manera como se distribuye el soluto en el cauce, pero a partir de este punto de adelante cuando el soluto se va a desplazar de manera homogénea en la totalidad del cauce es llamada mezcla completa, pues se entiende que gracias a los procesos de advección y dispersión el soluto fue repartido en toda la sección transversal.

Esto lo podemos ver de manera más clara en la Figura 1.

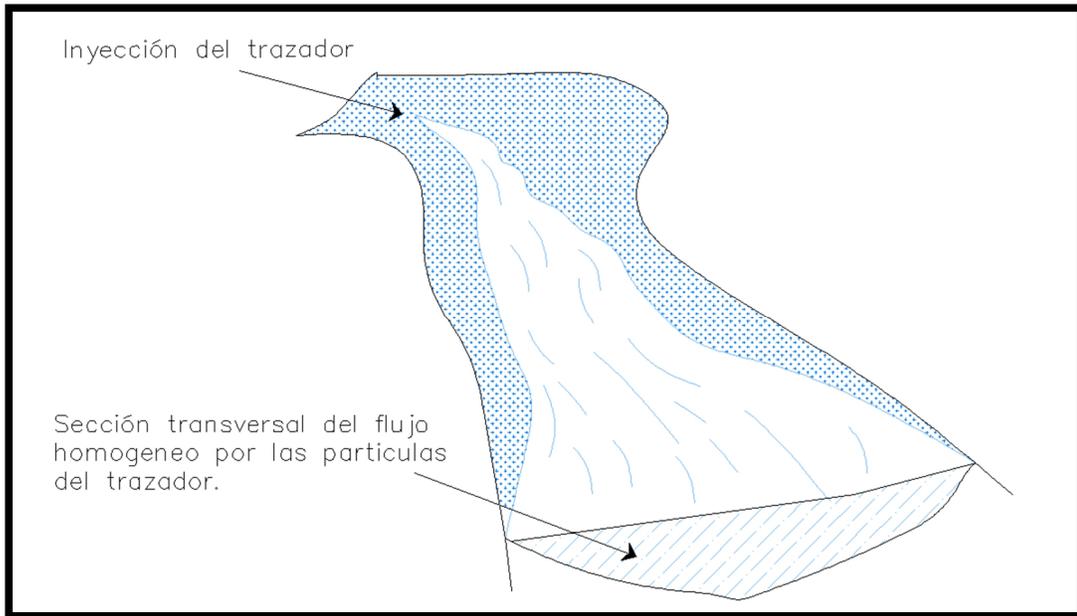
Figura 1. Longitud de mezcla



FUENTE: Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de trazadores(5)

Como vemos luego del vertimiento puntual el trazador comienza a distribuirse a lo largo del cauce, y podemos ver que en la parte final el trazador aun no abarca en su totalidad la sección transversal, por lo cual podemos saber que aún no se presenta la mezcla completa. Comparada con la Figura 2 en la cual vemos lo que continua aguas abajo.

Figura 2. Mezcla completa



FUENTE: Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de trazadores(5)

Como se ve en la parte final de la imagen el trazador se ha distribuido de manera homogénea sobre el cauce, lo que nos indica de ese punto hacia atrás es la longitud de mezcla, pero a partir de este punto comienza la propiedad de mezcla completa sobre el cauce.

Por este tiempo y longitud que se tarda el trazador en distribuirse homogéneamente, se puede ver la relación directa que tiene dicho parámetro con respecto a otros estudios que se le pueden realizar al agua. Por ello se podría decir que sería equivoco tomar mediciones de parámetros como DBO, DQO, pH entre otros, antes de que se llegue a la mezcla completa, ya que al tomar mediciones antes de este punto se puedan presentar errores en los datos, debido a que el soluto aún no ha abarcado toda la sección transversal y dependiendo del soluto una mayor concentración o menor concentración puede generar distintas lecturas, además las muestras pueden ser tomadas en un punto del cauce en el cual aún no se encuentra el soluto, lo que nos va a generar información pobre, pues al medir en un punto sin soluto, no vamos a comprender la implicación que él va a tener en el cauce aguas abajo. Por esta justificación se debe buscar primero la condición de mezcla completa para poder realizar otro tipo de mediciones aguas debajo de este punto, para garantizar la veracidad de los datos y que ellos puedan relacionar directamente las afectaciones del soluto sobre el cauce, cabe anotar que es de vital importancia para un estudio de este tipo, la toma de muestras antes de incluir el soluto al cauce, para poder realizar una comparación entre los datos antes y después del vertimiento.

1.3 PHI (φ) COMO FUNCIÓN DE LA LONGITUD DE MEZCLA

Como veremos más adelante las gráficas del trazador no siempre cumplen un comportamiento simétrico, lo que es debido a diferentes circunstancias, pero puede corresponder realmente a una composición entre la velocidad unidimensional del flujo y la velocidad bidireccional de difusión del trazador.(2)Lo cual ha ligado a las diferentes pérdidas que se pueden presentar en el transporte del flujo entre el medio que se presente en el cauce.

El valor de $\varphi(t)$ es el encargado de medir la asimetría de la riada del trazador haciendo una relación entre los tiempos que lleva el trazador en el flujo aguas abajo del punto de vertimiento. Como vemos que φ se va transformando aguas abajo del punto de vertimiento, es posible buscar una relación entre φ y la longitud de mezcla, para lo cual se tienen que tener algunas consideraciones.

$\varphi(X)$ Aparece como una nueva manera para la evaluación de la longitud de mezcla hasta lograr la condición de mezcla completa. Es necesario primero entender que el valor de φ corresponde a un estado en el flujo que describe una característica propia de la pluma del trazador como sistema que tiende a un equilibrio termodinámico. Por esta razón se puede entender que φ va a describir completamente la evolución de la pluma del trazador hacia el equilibrio, es decir que él va a irse modificando desde el punto de vertimiento hasta alcanzar la mezcla completa aguas abajo. (2).

Luego de la realización de diferentes estudios, relacionando este factor en diferentes medios, se pudo determinar que el valor de φ para el cual se cumple una mezcla completa es $\varphi \approx 0.38$.(2).

1.4 TEORÍA CLÁSICA DE LA ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN

Partiendo de la ecuación conservativa de balance de masas para el transporte de sustancias en un cauce luego de un vertimiento súbito, se presentan como promedios los parámetros de dicha ecuación de la siguiente manera.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = (D_x + \varepsilon_x) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + (D_y + \varepsilon_y) \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial y^2} \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:

\bar{c} = Promedio temporal de la concentración.

\bar{u} = Promedio temporal de la velocidad longitudinal.

$D_x, \varepsilon_x, D_y, \varepsilon_y$ = Coeficientes de difusión térmicos y turbulentos para ambas coordenadas.

Partiendo de la Ecuación (7) podemos ver la relación entre las diferentes propiedades necesarias para completar la modelación del comportamiento del soluto en el cauce, es necesario hacer que esta ecuación se exprese de una manera más simple por lo cual se puede integrar respecto al espacio, sobre la sección transversal del flujo, para la concentración C y U . Para ello se deben tener en cuenta términos que puedan relacionar el transporte promedio con respecto a las fluctuaciones espaciales de concentración c' y velocidad longitudinal u' . Sin dejar de lado un término que siga representando la difusión transversal. (3).

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = (D_x + \varepsilon_x) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + (D_y + \varepsilon_y) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - \frac{\partial(\overline{u'c'})}{\partial x} \quad \text{Ec. (8)}$$

Al tener la ecuación anterior G.I. Taylor propuso un análisis que al considerar la dispersión generada por las fluctuaciones de velocidad u' y concentración c' , tiene una aproximación Fickiana(6), es decir proporcional al gradiente de concentración longitudinal. Por conveniencia de manejo matemático en la Ecuación (9) se incluye la difusión turbulenta y térmica longitudinal, aunque es un hecho que este término normalmente se puede despreciar frente a la dispersión, como en la Ecuación (10). (3).

$$\overline{u'c'} = (D_x + \varepsilon_x) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - E \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$\overline{u'c'} \approx -E \frac{\partial C}{\partial x} \quad \text{Ec. (10)}$$

Con base en la idea conductora que planteo Taylor, que dice que el mecanismo central de la dispersión es esencialmente el transporte debido a la fluctuación de velocidad. Ahora reemplazando la Ecuación 9 en la Ecuación 8 tenemos:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \text{Ec. (11)}$$

La ecuación anterior es conocida como ecuación elemental de Taylor para la advección y dispersión de un trazador, como vemos se relacionan la concentración del trazador, la longitud recorrida por el trazador y la dispersión que se presenta. Para esta ecuación se ha planteado una solución que es conocida como la función de Fick, la cual describe el comportamiento que sigue

la concentración promedio en el plano móvil asociado al centro de masa de la pluma.

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4\pi tE}} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{4Et}} \quad \text{Ec. (12)}$$

A esta ecuación ya se le han realizado unas modificaciones, y con la que se va a realizar la modelación en este trabajo es nombrada como ecuación de Fick modificada:(7).

$$C(x, y, t) = \frac{M}{Q * \phi * t * 1.16} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{2\beta\phi^2U^2t^2}} \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde para las dos ecuaciones:

C = Concentración del trazador.

M = Masa del trazador vertida súbitamente.

A = Área de la sección transversal del flujo.

E = Coeficiente longitudinal de dispersión.

X = Longitud a partir del vertimiento hacia aguas abajo.

U = Velocidad media del flujo.

t = Tiempo de recorrido del trazador.

ϕ = Coeficiente de asimetría.

Beta (β) es la relación constante entre el tiempo característico de la difusión (relacionado con el avance del trazador referido al punto de inflexión de la curva Gaussiana y el tiempo general (variable independiente) t . Luego de diferentes estudios el valor de beta es 0.214.

Los datos necesarios para la realización de la modelación de un cauce basado en el uso de trazadores se realizan con la ecuación anterior, ya que todos los valores que se necesitan para alimentar la ecuación son arrojados por el sistema IDF.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 EQUIPO

El equipo utilizado para la realización de los monitoreos lleva como nombre INIRIDA DEEP FLOW (IDF) desarrollado por la empresa Amazonas technologies, el cual es una herramienta moderna para realizar estudios con trazadores, con el cual se pueden determinar las condiciones actuales del agua en un lugar geográficamente determinado. Esta herramienta nos permite la obtención de diferentes datos, los cuales nos van a servir para realizar el modelamiento de la características del cauce, dicha información es obtenida en tiempo real y de una manera precisa buscando minimizar los errores que se pueden presentar al momento de la recopilación de información.

El IDF es capaz de determinar tres tipos de parámetros al momento de los monitoreos, los parámetros se van a relacionar en la Tabla 1.(8).

Tabla 1 Parámetros medidos por el equipo en el cauce.

Físicos	Parámetros	
	Hidráulicos	Transporte
Conductividad	Caudal	Coefficiente de dispersión longitudinal
Temperatura	Velocidad media del flujo	Coefficiente de difusión transversal
	Número de Manning	Concentración del trazador
	Número de Reynolds	Verificación de Longitud de Mezcla

2.2 MÉTODO

El IDF se basa en una metodología definida, que busca reducir las variables que se pueden llegar a presentar al momento de realizar los aforos, dicho método es llamado “riada de trazador” mediante un vertimiento súbito del trazador (slug technique), básicamente el equipo se encarga de recolectar la información de conductividad y temperatura, para luego internamente realizar una serie de cálculos para mostrar con base en ellos otra cantidad de variables que se pueden presentar en un cauce, para realizar la obtención de información

es necesario realizar un vertimiento súbito del trazador con el cual se desea trabajar, que para nuestro caso es sal común (Cloruro de sodio), dicho vertimiento se hace aguas arriba del punto donde se encuentra el sensor del IDF, se debe tener una longitud determinada entre el equipo y el vertimiento, puesto que dicho valor es necesario incluirlo en el equipo como parámetro inicial.

2.3 APLICACIÓN DEL EQUIPO

El sistema IDF es una herramienta que puede llegar a emplearse para diferentes propósitos en lo que se refiere a tareas relacionadas con la hidráulica, haciendo medidas, estudios y modelamiento de aguas superficiales y subterráneas.

Entre otras las aplicaciones del sistema son:(8).

- Tareas de hidrometría fluvial.
- Tareas de hidrometría subterránea.
- Tareas de hidrometría de precisión (calibración de medidores de flujo).
- Tareas de geomorfología de cauces.
- Localización de vertimientos peligrosos.
- Localización de fugas cloacales.
- Verificación de plantas de tratamiento.
- Caracterización de zonas de mezcla.
- Patrones de dispersión.
- Estudios de tiempos de tránsito.
- Medición de eficiencias de bombas.
- Verificación de flujo en tubos.
- Estudios de la física de la turbulencia.
- Estudios de re aireación.

Como podemos ver las posibilidades de empleo para el IDF abarcan varias ramas, y teniendo en cuenta la rapidez para la obtención de información y la facilidad para realizar las modelaciones a partir de los datos encontrados, datos que por la experiencia que se tiene con el equipo se ve son de gran confiabilidad, vemos desde ya una gran ventaja que nos ofrece el equipo y es el ahorro de tiempo.

2.4 COMPONENTES DEL EQUIPO

El IDF se compone de dos parte, una de ellas es el hardware y la otra el software, las cuales unidas nos dan la garantía para una óptima recopilación de información en tiempo real, y un procesamiento de igualmente confiable.

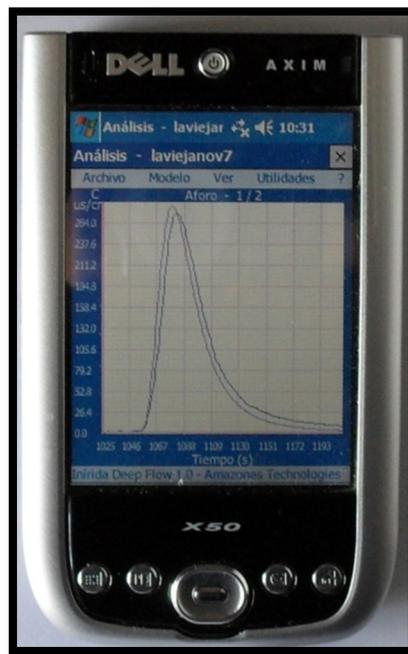
2.4.1 Hardware

Una de las dos partes del IDF está compuesta por el hardware del equipo, el cual se compone de tres elementos los cuales serán mostrados a continuación.

2.4.1.1. PDA ZAURUS de SHARP / PDA AXIM de Dell

Portable Device Assistant (PDA) (ver Figura 3), que traduce asistente digital portable, es la primera herramienta que utiliza el equipo, se tienen dos tipos de PDA que se pueden utilizar para esta tarea, una es la ZAURUS de SHARP y la AXIM de DELL las cuales nos proporcionan un medio para la visualización de los datos en el momento de la toma de información en tiempo real realiza el procesamiento de las variables recopiladas en campo, todo bajo el sistema del IDF.(8).

Figura 3. PDA



2.4.1.2. INTERFAZ IMHE (Convertidor de señales desde el sensor hasta la PDA)

La interfaz es la encargada de transformar las señales del sensor para que puedan ser interpretadas por la PDA. Ver Figura 4.

Figura 4. INTERFAZ



2.4.1.3. Sensor

Este dispositivo es de gran importancia para la toma de muestra, y como se explicara en la Sección 3.2 es de vital importancia su correcta ubicación en el cauce. Ver Figura 5.

Figura 5. Sensor



El hardware como vemos está compuesto por tres elementos, de los cuales el IMHE y el sensor son productos desarrollados por **Amazonas Technologies**.

2.4.2. Software

El componente encargado de mostrarnos los datos recopilados en los aforos entre otras acciones que se relacionaran a continuación es el software, el cual fue desarrollado por Amazonas Technologies para computadores portátiles (Laptop), y para facilitar el transporte del equipo se diseñó el software para computadores de mano (PDA).

INIRIDA Deep Flow es un software que puede realizar una serie de procesos basado en unos datos obtenidos mediante aforos realizados en un cauce, para modelar las condiciones del cauce, para la cual se necesitan tener una serie de procesos para lograr su propósito.

- Se tienen que tomar los datos en campo.
- Tener claras las condiciones del agua respecto a:
 - a. Conductividad.
 - b. Temperatura.
 - c. Concentración del trazador a través del tiempo.
- Generación de informes para los aforos.

Luego de realizar el vertimiento del trazador, el equipo comienza a tomar los datos de la concentración por unidad de tiempo.

El software IDF nos presenta la Figura 6 al momento de iniciar el equipo.

Figura 6. Pantalla de inicio IDF



Como podemos ver tenemos tres módulos en el IDF, monitoreo, análisis e informes, de las cuales vamos a explicar en qué consiste cada una de ellas para de esta manera mostrar lo competente que es este software para un trabajo como el que se realizó.

2.4.2.1. Monitoreo

Este módulo es el encargado de la captura de información que es suministrada por la interfaz IMHE, al momento de seleccionar este módulo la pantalla de la PDA nos mostrara la Figura7.

Podemos encontrar diferentes opciones que van desde abrir un archivo guardado anteriormente, realizar el ajuste de las diferentes opciones de visualización del plano donde se dibuja la curva (Plot) y la de mayor importancia para este tema que es la pestaña de Aforo, en la cual se introducen desde el nombre que llevara el archivo que alimentaremos con la información obtenida en el aforo hasta el ingreso al sistema de las condiciones iniciales con las cuales vamos a trabajar, las cuales son la cantidad de masa de trazador a utilizar y la distancia que se encuentra entre el sensor y el punto de vertimiento, como vemos en la Figura8, los otros dos datos no son obligatorios pero en caso tal que se pueda hacer una estimación correcta de ellos, se puede alimentar el software con ellos para buscar una modelación más acorde con la realidad.

Figura 7. Monitoreo

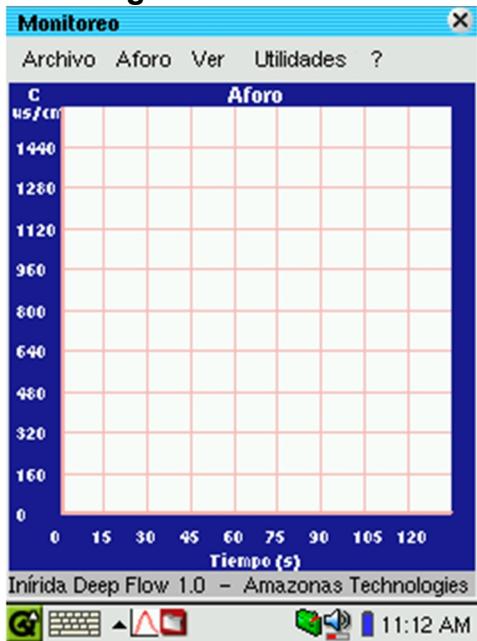


Figura 8. Datos iniciales del vertimiento

The screenshot shows a dialog box titled "Vertimiento" with a close button (X). It contains a section for "Curva 1" with four input fields: "Masa (gr)", "Longitud (m)", "Ancho (m)", and "Pendiente". At the bottom of the dialog, there are two buttons: "Vertir" and "Cancelar".

Como este es el módulo encargado de la captación de información tenemos la opción para iniciar y finalizar los diferentes aforos, además de contar con una

opción llamada filtro que se encarga de suavizar las curvas como se puede ver en la Figura 9 y 10, esta dispersión de datos se puede deber a diferentes parámetros, que van desde cambios de turbiedad en el punto donde se encuentra el sensor o a otros tipos de solutos que también puedan presentar conductividad.

Figura 9. Grafica sin filtro

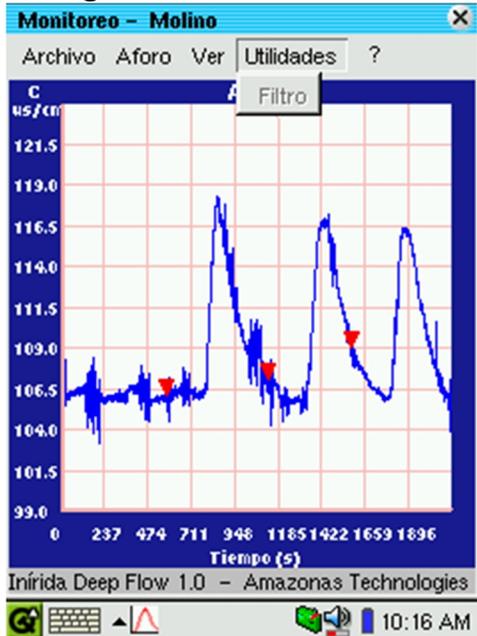
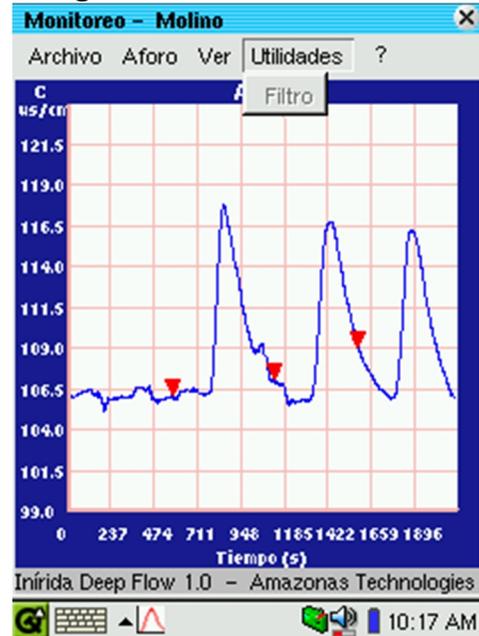


Figura 10. Grafica con filtro



2.4.2.2. Análisis

El segundo módulo que encontramos se llama análisis, en el cual vamos a encontrar diferentes herramientas para realizar el procesamiento de información, veremos cómo se puede trabajar sobre las curvas obtenidas de los aforos y es la primera etapa para poder encontrar las variables que nos darán criterio para determinar las condiciones del cauce estudiado.

Al ingresar a este módulo vemos un espacio de trabajo igual al del módulo anterior, ver Figura 11, lo que varía son las herramientas que podemos utilizar, ya que al tener la información de los aforos solo basta comenzar con el análisis de los mismos.

Para la pestaña referente a archivo y ver encontramos las mismas opciones del módulo anterior, pero a diferencia encontramos la pestaña Modelo, la cual nos da unas primeras aproximaciones de lo que va a ser el modelamiento del cauce. Para comenzar tenemos una herramienta que se llama crear, la cual a partir de la curva obtenida en el aforo nos genera basados en los datos iniciales del cauce, ver Figura 8, una curva experimental la cual modela basado en

condiciones ideales la conductividad que se va a encontrar en el cauce, como vemos en la Figura12.

Figura 11. Análisis

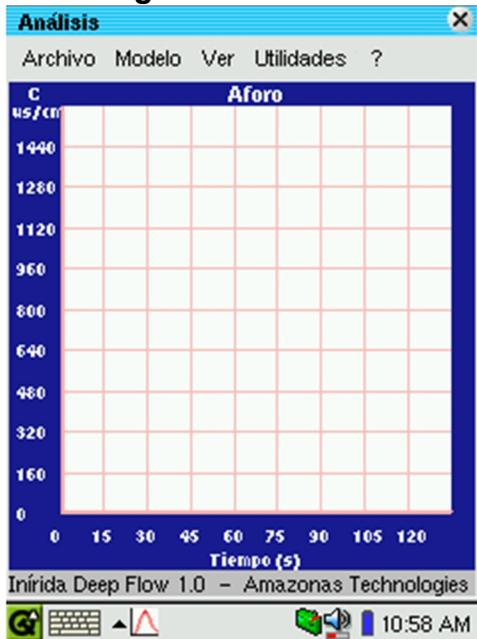
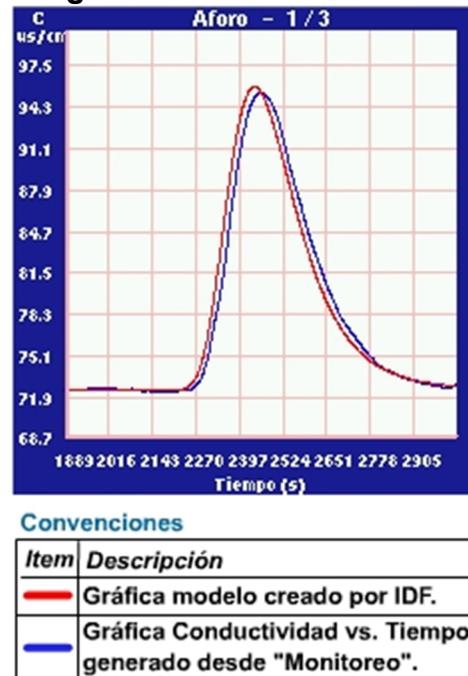


Figura 12. Crear curva ideal



Como se puede observar la modelación concuerda con los datos obtenidos, en pocas palabras esta es una de las manera de verificar que nuestros datos sean correctos, y en vista que esta curva es la base para todo el análisis es de gran importancia comprobar su confiabilidad al comenzar con el análisis.

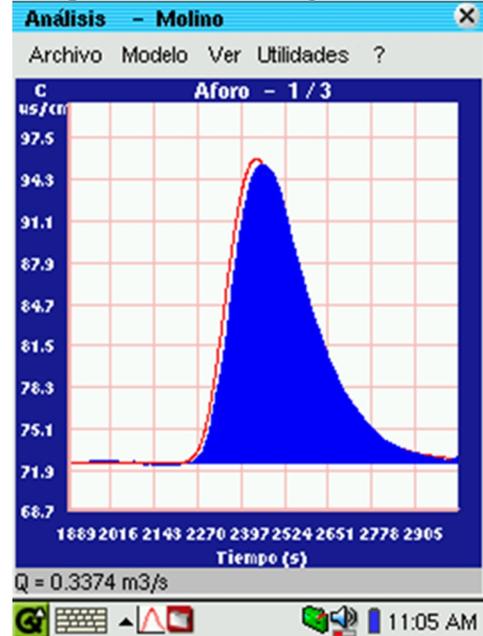
Además de esta primera herramienta, tenemos que determinar las diferentes variables que se presentan en un flujo, como lo son la velocidad del cauce, su caudal y primordialmente su dispersión, el mismo software hace el cálculo de dichas variables y nos presenta los datos de una manera de fácil interpretación, ver Figura13.

Ya teniendo las variables encontradas a partir del aforo, podemos generar informes con ellas, para luego poderlos consultar de manera rápida, adicionalmente podemos ver otra herramienta que se encuentra en la pestaña de utilidades, donde nos muestra el área que se encuentra bajo la curva, como sabemos del cálculo en graficas la región delimitada por la curva representa diferentes variables y para este caso dicha variable es el caudal, ver Figura14.

Figura 13. Resultados



Figura 14. Área bajo la curva



2.4.2.3. Informes

El tercer módulo se refiere a los informes, en el cual podemos generar diferentes archivos donde se recopile toda la información de los aforos, pasando desde las curvas iniciales, hasta el empalme de todas ellas según la distancia de los puntos de vertimiento. Nos muestra un cuadro resumen de las diferentes variables con los errores que se pueden presentar entre los diferentes aforos para las diferentes variables, dicho cuadro se puede ver en la Figura15.

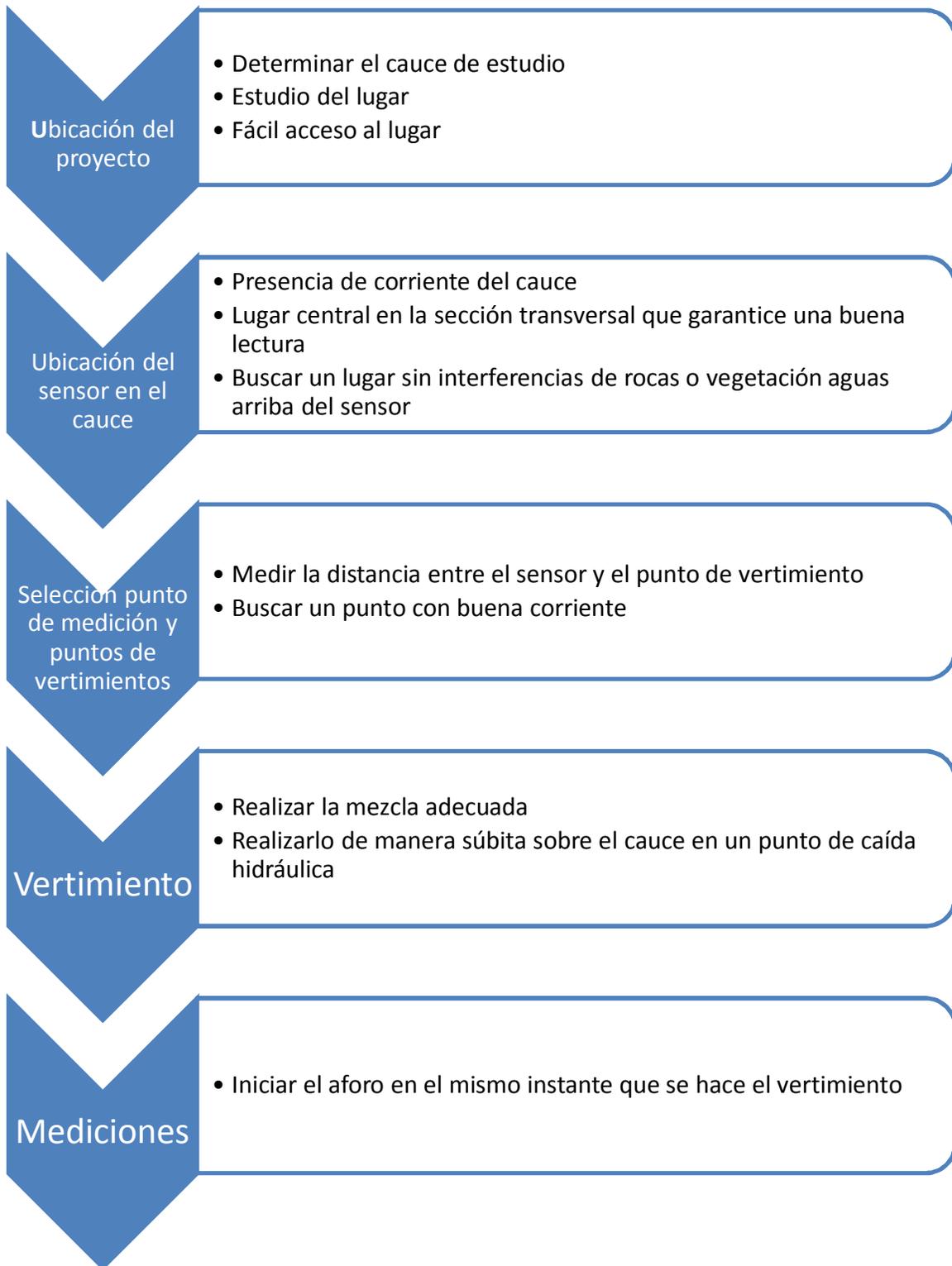
Para las futuras referencias queda grabada la información de la fecha y las horas de inicio y finalización de los aforos.

Luego de esta explicación de los diferentes módulos que manera el IDF, desde ya se pueden ver las grandes ventajas que se tienen al momento de ir a realizar un trabajo a campo, y la ventaja de almacenamiento y la posibilidad de analizar datos en campo nos muestra el gran panorama que abre esta herramienta.

Figura15. Resumen de variables



3. EJEMPLO DE APLICACIÓN



Para la realización de aforos con el equipo IDF es necesario tener en cuenta una serie de parámetros encaminados a dar la mejor calidad en la obtención de datos, los cuales vamos a mostrar de manera detallada además de las diferentes implicaciones que se pueden tener en la toma de decisiones.

3.1 UBICACIÓN DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta el alcance que buscamos tener con el trabajo, el cual es determinar y analizar la longitud de mezcla de un soluto en un cauce determinado, lo primero es determinar sobre que cauce vamos a realizar en trabajo, lo cual puede venir de un proyecto en específico o como en este caso el cual es buscando complementar un trabajo de investigación que se ha venido realizando sobre la calidad del agua de la quebrada La Vieja, por esta razón tenemos este cauce ya seleccionado.

Es necesario tener claras las condiciones no solo de la quebrada, también es necesario tener previsto el entorno del cauce, ya que se debe seleccionar un lugar de fácil acceso para tener el punto donde se va a hacer el registro de los datos, además de los puntos en los cuales se van a realizar los diferentes vertimientos, que dependiendo de las características del cauce se pueden prolongar varios metros aguas arriba del punto de registro.

3.2 UBICACIÓN DEL SENSOR EN EL CAUCE

Al tener definido el punto donde vamos a tener el equipo para hacer la toma de datos del cauce, tenemos que ir aguas arriba para determinar desde que lugar vamos a realizar los vertimientos del trazador, es necesario tener la longitud desde la ubicación del sensor hasta el punto de vertimiento que se encuentra aguas arriba, además se tiene que buscar un tramo donde se pueda garantizar que el soluto se va a dispersar completamente en la sección transversal del cauce.

3.3. ELECCIÓN PUNTO DE MEDICIÓN Y PUNTOS DE VERTIMIENTOS

El sensor del IDF debe ser ubicado de una manera que garantice la confiabilidad de los datos que él va a registrar, por lo cual es necesario que su ubicación no sea cerca de rocas que puedan variar el flujo que pasa por el sensor, se debe buscar una posición en un punto que se garantice una buena corriente para lograr una medida correcta del soluto, también se tiene que tener en cuenta que colocar el sensor en aguas mansas ya que esto generara que los datos obtenidos sean errados.

3.4. VERTIMIENTO

Para realizar el vertimiento del trazador iónico que en pocas palabras es un trazador de sal común, se deben tener las siguientes consideraciones para

lograr datos correctos, además de dar los parámetros para los cuales esta calibrado el equipo IDF, es recomendable el uso de la sal blanca y fina para que se obtenga una mejor disolución de la misma en el agua además de la importancia de la calibración del equipo la cual se realiza con este tipo de sal.

- En el punto donde se va a realizar el vertimiento se debe preparar una mezcla de sal y agua del cauce, esto con una relación aproximada entre una y tres veces la cantidad de sal en kilos del caudal que probablemente va por el cauce, dicho caudal probable se tiene que expresar en metros cúbicos por segundo. A manera de ejemplo se tiene un río con un caudal de $2 \text{ m}^3/\text{s}$ para el cual se necesita entre 2 y 6 kg de sal
- Con base en los estudios que se realizaron para la creación del equipo IDF se encontró que la concentración de la mezcla no debe superar los 400 g/l lo que se puede expresar como 4 kg de sal por 10 l de agua. Esto es debido a la saturación que puede presentar el agua al agregarle una cantidad mayor de sal, lo que alteraría los resultados que vamos a obtener en la toma de datos. Según lo anterior se diría que el IDF no puede ser utilizado para cauces en los cuales se requiera más de 4 kg de sal, por lo cual es necesario para estos casos no realizar una mezcla previa de la sal con el agua del cauce, por el contrario se realiza el vertimiento de la sal en seco, lo que quiere decir verter la sal sobre el cauce a lo ancho del cauce y previniendo que no se genere sedimentación de la misma para dar mejor calidad a los datos que se tomaran aguas abajo.

3.5. MEDICIONES

Este se puede considerar como el punto cumbre del trabajo en campo, ya que es el momento donde se realizan las diferentes mediciones del trazador sobre el cauce, en general lo que se realiza en este punto es tener el sensor ya ubicado en un punto ideal con base en las recomendaciones ya mencionadas en la sección 4.2. para proseguir con el vertimiento de manera súbita del trazador aguas arriba y en ese mismo instante comenzar con las lecturas del equipo; Dándole inicio al aforo se verá una imagen que poco a poco va generando una línea, la cual en los primeros segundos del aforo se puede ver como una línea horizontal constante, ya que en estos momentos no ha llegado el trazador al sensor, por ello los datos registrados son parámetros de conductividad dados por las propiedades físico químicas del agua en su estado natural, cuando el trazador comienza a llegar al punto donde se encuentra el sensor, él comienza a registrar datos de conductividad en micro siemens por

centímetro cúbico ($\mu\text{s}/\text{cm}^3$) respecto al tiempo que es medido en segundos (s), a mayor cantidad de soluto que en este caso es sal se obtiene una mayor conductividad por un mayor conjunto de iones que pasa por el sensor que básicamente son los que generan la reacción del sensor. Para este momento la curva comienza a crecer hasta llegar a un pico y vuelve a bajar para terminar de una forma constante como se inició.

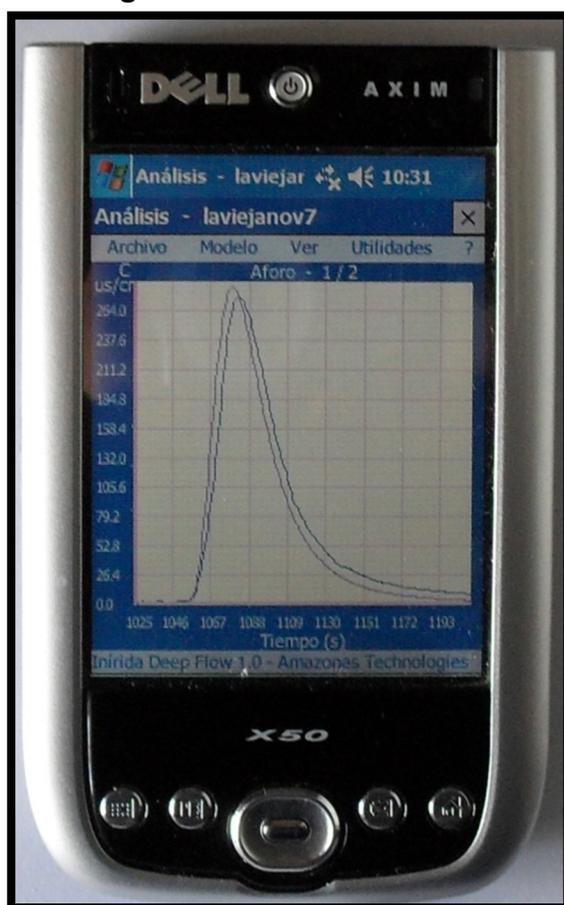
4. INFORMES TÉCNICOS AFOROS CON TRAZADOR SALINO QUEBRADA “LA VIEJA”

Con base a los diferentes aforos que se realizaron para la elaboración de la investigación, se va a relacionar en este capítulo los resultados de cada uno de ellos, y se mostrara paso a paso los diferentes cálculos, acompañados por sus respectivas ecuaciones.

4.1. NOVIEMBRE 1

Como primera medida tenemos la Figura 16, en la cual podemos ver una foto del equipo reportando la curva que se mide en los aforos.

Figura16. Aforo Noviembre



4.1.1. Recopilación de datos

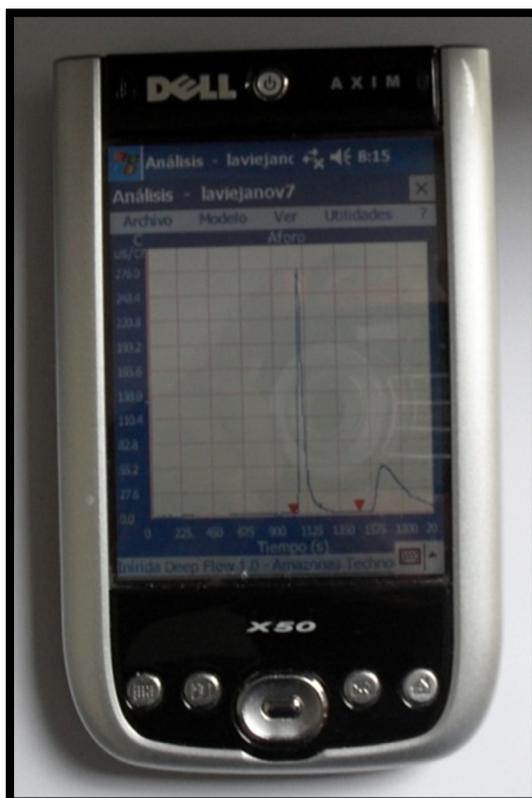
La información es recopilada en la Tabla 2, donde podemos encontrar los diferentes valores obtenidos de los diferentes aforos.

Tabla 2. Recopilación datos aforo

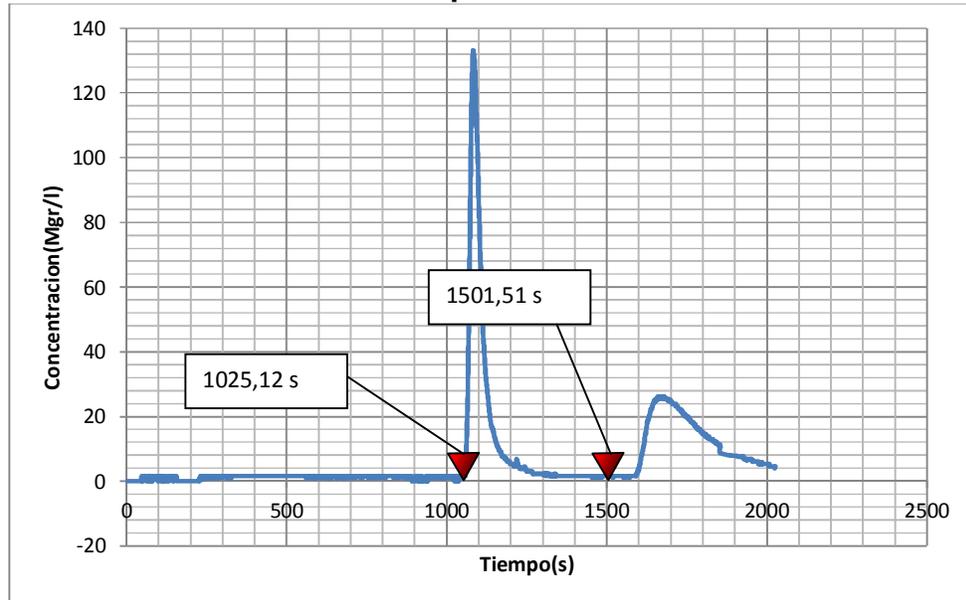
Vertimiento	Distancia (m)	Masa (g)	Tiempo del pico (s)	Velocidad media (m/s)	Caudal (l/s)	ϕ	Tiempo primeras partículas Tp (s)
1	X=10	132.4	59	0.171	25.5	0.57	28
2	X=20	132.4	190	0.121	25.5	0.55	93

Se baja el archivo de datos de las mediciones a Excel, como se muestra en la Grafica 1, los datos que descargamos son los mismo que en la Figura 17.

Figura 17. Grafica aforos Noviembre



Grafica 1. Tiempos de aforos



4.1.2. Tiempo de llegada de las primeras partículas de trazador:

El tiempo que tardan las partículas en llegar desde el vertimiento, hasta el sensor, es un parámetro que nos dará claridad sobre la velocidad de transporte del flujo, estos datos los obtenemos de las gráficas que se generan en el equipo, Ver Figura 18.

4.1.2.1. Vertimiento 1 (X=10 m)

Para poder ver de una manera más real los datos obtenidos con el equipo se muestra la Figura 18, y en la Grafica 2 se muestra la misma información pero ya en Excel.

Se tiene que:

$$T_p \approx t_o(1 - 2\sqrt{\beta\phi}) \quad \text{Ec. (14)}$$

Se conoce $\beta \approx 0.215$, $T_{p1} = 28$ s y $t_{o1} = 59$ s. Por lo tanto puedo despejar ϕ (este parámetro se usara para la modelación).

$$\phi \approx \frac{\left(1 - \frac{T_p}{t_o}\right)}{2\sqrt{\beta}} \quad \text{Ec. (15)}$$

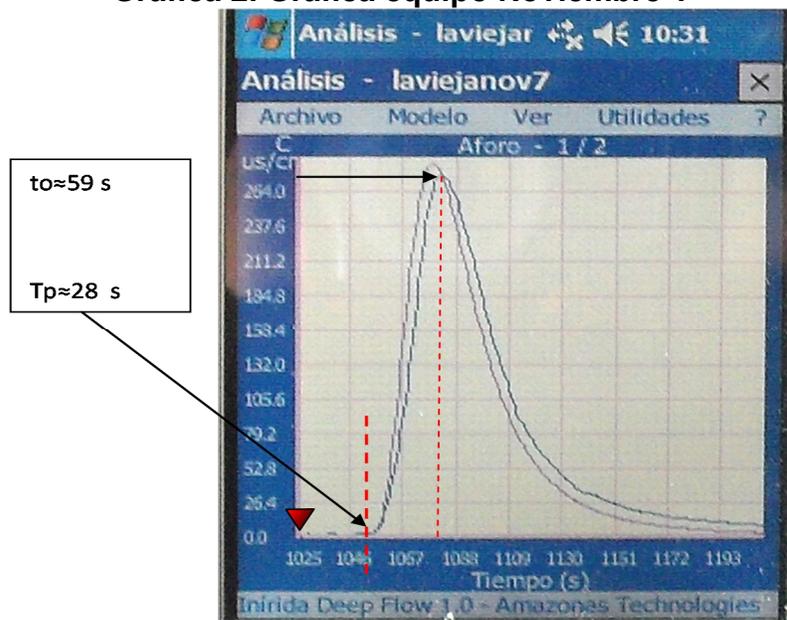


Este valor se verifica de nuevo.

Figura18. Aforo Noviembre 1

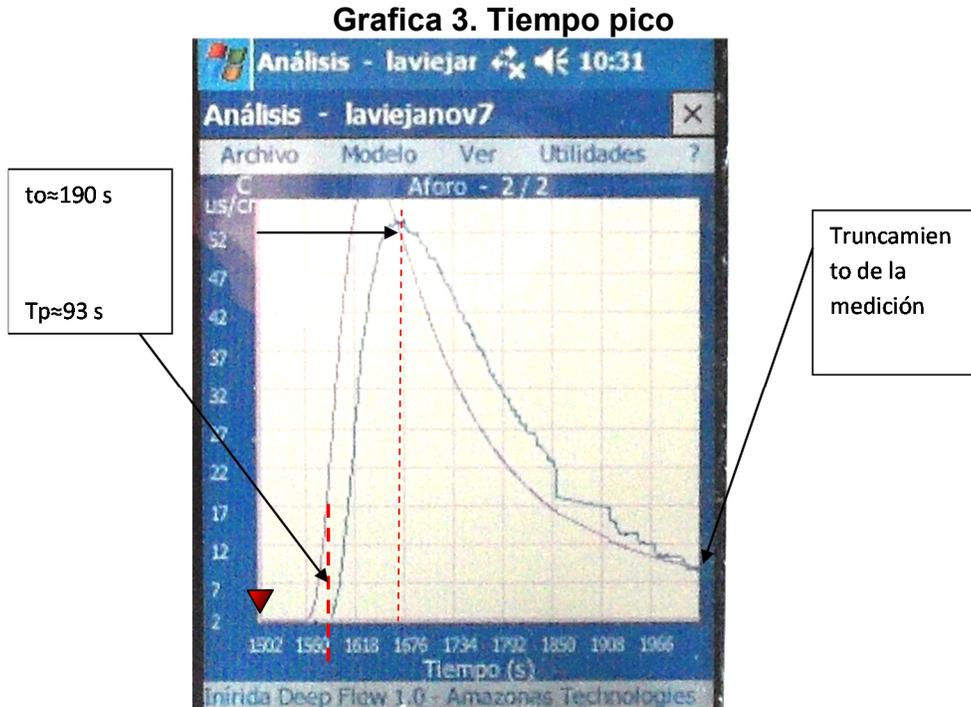


Grafica 2. Grafica equipo Noviembre 1



4.1.2.2. Vertimiento 2 (X=20 m)

Los tiempos para el segundo vertimiento, los podemos encontrar en la Grafica 3, donde además vemos la relación que tiene la curva teórica con la curva ideal que genera el equipo.



Se tiene la ecuación 14, con la cual determinamos el valor, de la misma manera que para la gráfica anterior.

Se conoce $\beta \approx 0.215$, $t_p = 93$ s y $t_o = 190$ s. Por lo tanto puedo despejar Φ y compararlo con el valor obtenido anteriormente.

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \frac{1 - \beta}{1 - \beta e^{-\Phi t_p}}$$

Estos valores de Φ se consideran confiables por cuanto son menos influenciados por el ruido.

4.1.3. Modelación de las curvas experimentales de trazador

Se usa la siguiente ecuacion Fick modificada. (7).

$$C = C_0 \left[1 - \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{x - vt}{\sqrt{4Dt}} \right) \right]$$

En seguida se analiza el archivo correspondiente mediante una graficación en Excel.

4.1.3.1. Vertimiento 1 (X=10 m)

Este vertimiento nos muestra un bajo error entre las curva que se genera con el aforo versus la curva que genera el equipo como ideal, esto se puede dar gracias a las condiciones en las que se encuentra la quebrada sumado a la corta distancia entre el sensor y el punto de vertimiento del trazador.

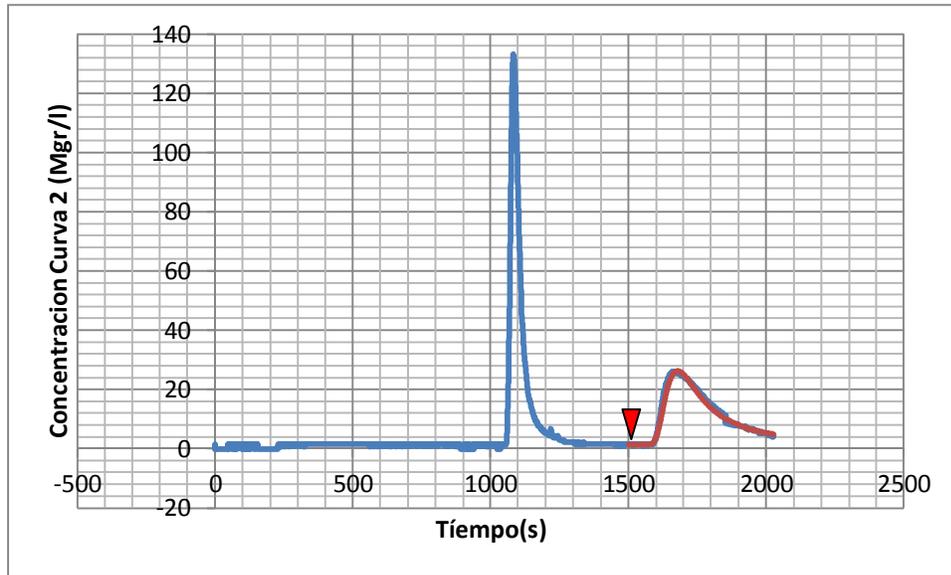


4.1.3.2. Vertimiento 2 (X=20 m)

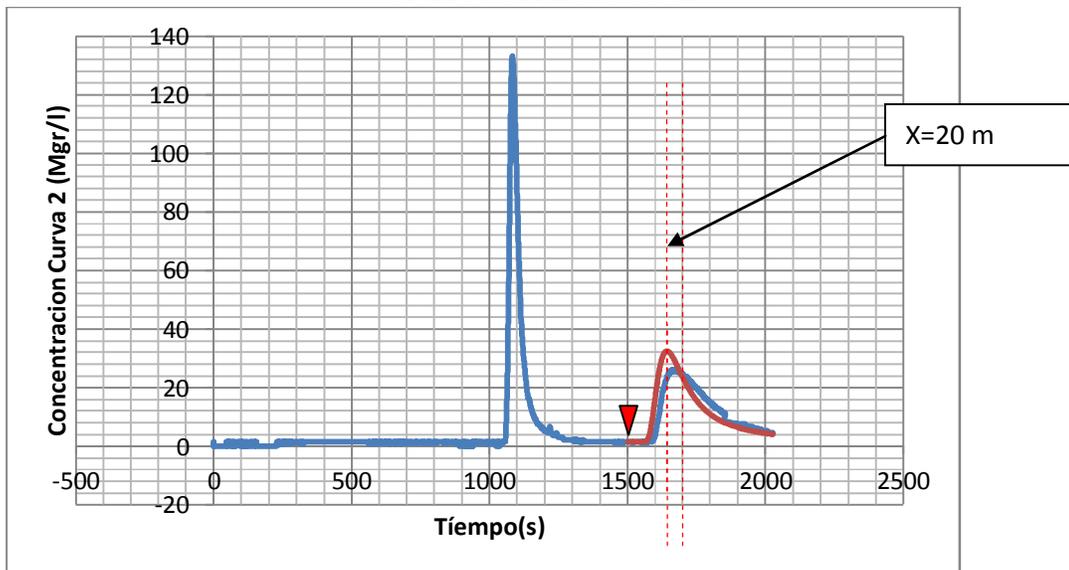
Este vertimiento al igual que el anterior se hizo de manera correcta y los datos obtenidos son acordes con la curva teórica, como se puede ver en la Grafica 5.

En Grafica 6 vemos un caso especial para este aforo, puesto que esta segunda modelación se obtuvo modificando la distancia a X=25 m y $\phi \approx 0.95$, pues utilizando los datos de la medición inicial se observa un desfase en el pico lo que indica que se cometió un error en la apreciación de la distancia. Esto modifica tanto la velocidad como el ϕ pero se corrige fácilmente. Se asume que el ϕ correspondiente a la segunda curva es el calculado por la Ecuacion (15).

Grafica 5. Aforo 20m



Grafica 6. Aforo total



4.1.4. Calculo del Coeficiente longitudinal de dispersión

Con base en la ecuación 16, encontramos un parámetro que modela el comportamiento del soluto en el cauce.

$$E = \frac{\phi^2 U^2 \beta t_o}{2} \tag{Ec. (16)}$$

$$E_1 = \frac{\phi_1^2 U_1^2 \beta t_{o1}}{2} = \frac{(0.57)^2 (0.171)^2 0.215 * 59}{2} = 0.060$$

$$E_2 = \frac{\phi_2^2 U_2^2 \beta t_{o2}}{2} = \frac{(0.55)^2 (0.121)^2 0.215 * 190}{2} = 0.097$$

4.1.5. Datos promedio consolidados

Se muestra un conjunto de datos congruentes para el tramo de cauce medido con el grupo de investigación de la Universidad Militar Nueva Granada. El dato de caudal cuando no hay “Mezcla completa” del trazador introduce un error sistemático, el cual para casos donde $\phi \approx 0.55$ es del orden del 10% o menor.

Tabla 3. Datos promedio consolidados

Aforo	X (M)	t _o (s)	U (M/s)	Q (L/s)	Qa(*) (L/s)	Cp (Mgr/l)	φ	E (M2/s)
1	10.1	59.0	0.171	25.5	23.5	134.0	0.57	0.060
2	23.0	190.0	0.121	25.5	29.7(**)	25.0	0.55	0.097
Promedio	-----	-----	0.146	25.5	23.5	-----	-----	0.079

(*) Tomado con Excel calculando el área bajo la curva.

(**) Dato no confiable por el truncamiento de la curva.

4.1.6. Curva de tendencia: Cp(t)

Se plantea una ecuación de tendencia del tipo:

$$C_p(t) = \alpha t^{-\frac{2}{3}} \approx \alpha t^{-0.7} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

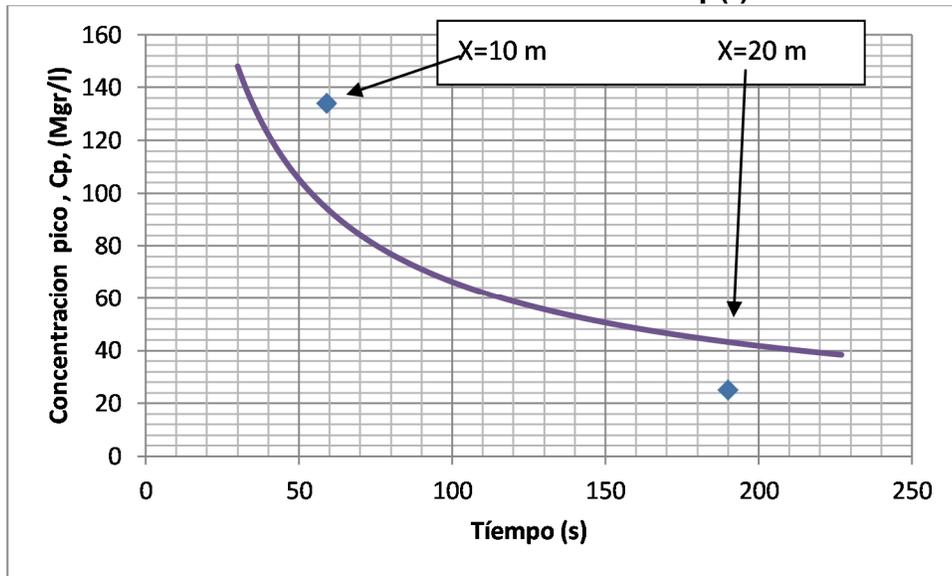
$$\alpha_i = \frac{C_{pi}}{t_i^{-\frac{2}{3}}} \quad \text{Ec. (18)}$$

Se usa en primera instancia un promedio de todos estos resultados:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_i \alpha_i \quad \text{Ec. (19)}$$

Su graficación en Excel con los 2 valores experimentales se muestra en seguida, no siendo muy precisa por tener un número limitado de experimentos.

Grafica 7. Curva de tendencia Cp(t)



Dada la incertidumbre con respecto al segundo valor de ϕ y que no se tienen más valores para construir una curva confiable, en este caso no se establece la tendencia para esta función.

4.1.7. Cálculo de datos operativos del cauce en el tramo estudiado

Con base en los diferentes parámetros registrados por el equipo, podemos llevar los datos obtenidos a una serie de ecuaciones para poder entender las condiciones del cauce, como el radio hidráulico y la pendiente del cauce, entre otras.

4.1.7.1. Datos de Hidráulica y transporte de masa

$$\begin{aligned}
 U &= 0.146 \text{ m/s} \\
 Q &= 25.5 \text{ l/s} \\
 A &= 0.175 \text{ m}^2 \\
 W &= 1.9 \text{ m} \\
 H &= 0.092 \text{ m} \\
 E &= 0.079 \text{ m}^2/\text{s}
 \end{aligned}$$

4.1.7.2. Datos de Geomorfología

a) Calculo del Radio hidráulico.

A partir del ancho medio, W y el Área hidráulica, A , se calcula el Radio hidráulico R .

$$R = \frac{A}{(2h + W)} = \frac{0.175}{(2 * 0.092 + 1.9)} \approx 0.084m \quad \text{Ec. (20)}$$

b) Calculo de la pendiente en régimen uniforme.

Asumiendo un predominio de la dispersión por efecto cortante de la distribución vertical de velocidades, de acuerdo con la fórmula de Elder, se tiene (Con h profundidad media):

$$E \approx 5.93 * h * U^* \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde U^* es

$$U^* = \sqrt{g * h * S} \quad \text{Ec. (22)}$$

Aquí g es la aceleración de la gravedad, y S la pendiente de la línea de energía.

Por lo tanto:

$$S = \frac{1}{35.2} * \frac{E^2}{g * h^3} = \frac{1}{35.2} * \frac{0.079^2}{9.81 * (0.092)^3} \approx 0.023 \quad \text{Ec. (23)}$$

c) Calculo del Coeficiente de Chezy.

Utilizando la ecuación aproximada de Chezy:

$$C = \frac{U}{\sqrt{R * S}} \approx \frac{0.146}{\sqrt{0.084 * 0.023}} \approx 3.32 \text{ m}^{\frac{1}{2}}/\text{s} \quad \text{Ec. (24)}$$

Usando la ecuación de Manning de forma aproximada:

$$n = \frac{R^{\frac{1}{6}}}{C} = \frac{(0.084)^{\frac{1}{6}}}{3.32} \approx 0.20 \quad \text{Ec. (25)}$$

Este gran valor de la Rugosidad integral es compatible con la gran rugosidad superficial y la presencia evidente de pozos y rápidos que aminoran drásticamente la velocidad, a pesar de la muy alta pendiente. Este valor elevado del Número de Manning indica que en ciertas partes el cauce hay un intercambio significativo entre energía cinética y potencial que incrementa las pérdidas por fricción. El hecho de tener una revisión del concepto de “constancia” para E y la propia existencia de componentes “nuevas” de “rugosidad” abren un campo interesante para la medición objetiva del número de Manning.

4.2. NOVIEMBRE 15

Como ya pudimos ver el procesamiento que se debe realizar a los datos obtenidos con el IDF, ahora veremos cómo se pueden presentar algunas gráficas, ya que para los aforos realizados para esta fecha se vieron algunas perturbaciones en los datos, las cuales iremos explicando.

4.2.1. Recopilación de datos

La Tabla 4 nos muestra el resumen de los datos obtenidos en los diferentes aforos.

Tabla 4 Recopilación de datos

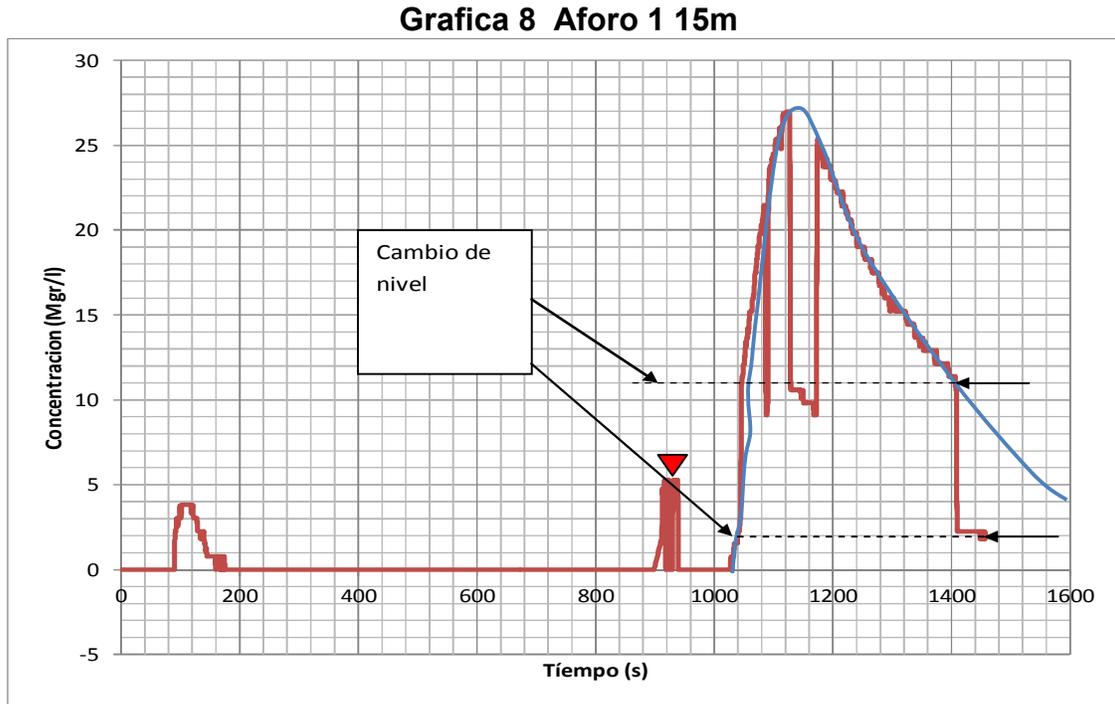
Vertimiento	Distancia a (m)	Masa (g)	Tiempo del pico (s)	Velocidad media (m/s)	Caudal Q (l/s)	Caudal Qa (l/s)	Concentración picoCp (Mgr/l)	φ	Tiempo primeras partículas Tp (s)
1	X=15	132.4	200	0.075	32.5	28.1	18.3	1.30	105.9
2	X=15	132.4	196	0.077	53.1	55.4	10.6	0.96	98.6
Estimación mejor	X=15	132.4	196	0.077	53.1	55.4	10.6	0.96	98.6
3	X=30	132.4	244	0.123	31.4	35.7	23.6	0.53	123.1
4	X=30	132.4	240	0.125	78.0	52.6	9.24	0.66	93.3
Estimación mejor	X=30	132.4	240	0.125	31.4	35.7	9.24	0.66	123.1

4.2.1. Curvas aforos

Como se llevaron a cabo diferentes aforos, se mostraran los resultados de cada uno.

4.2.1.1. Vertimiento 1 (X=15m)

Para este primer vertimiento podemos ver que la gráfica está bastante afectada debido a la transmisión de datos de la interfaz digital, lo cual se puede asegurar debido a que los datos registrados no son congruentes, además de poder ver espigas de ruido. Ver grafica8

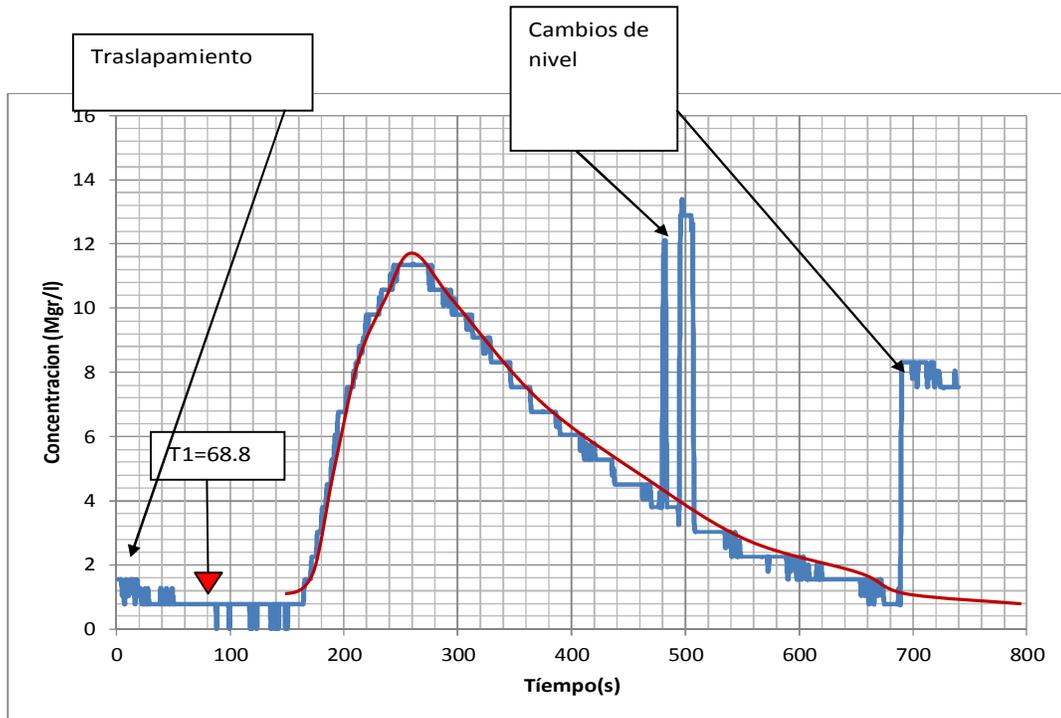


Hay una duda fundamental sobre la “altura” de la curva (C_p) pues se puede ver un aumento brusco (flechas). Hay también un truncamiento brusco de la toma de datos por el software. Se muestra en rojo una curva asintótica sobre la curva experimental con ruido. Se muestra en azul una curva asintótica sobre el experimento.

4.2.1.2. Vertimiento 2 (X=15m)

Este vertimiento nos muestra el ruido que se presentó al momento de la toma de información, aunque los picos que se ven en la Grafica 9 se pueden generar por taponamiento del sensor, también puede ser que por la distancia a la que se vertió el trazador, él se agrupó en una zona con velocidad de flujo baja y por esa razón llega en grandes cantidades en un corto periodo de tiempo

Grafica 9 Aforo 2 15m



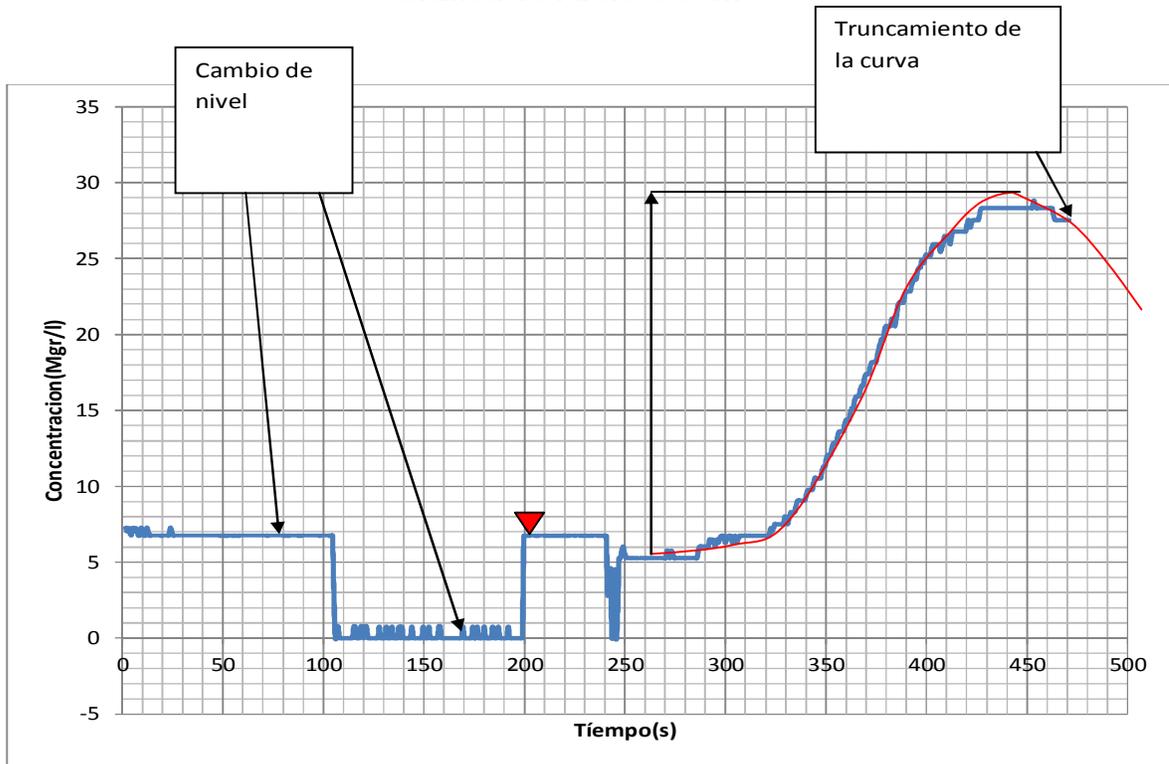
En esta segunda curva se nota un traslapamiento con la curva anterior. Así mismo unas espigas de ruido que modifican en nivel de medición (al final). El origen de esta inestabilidad probablemente se deba a una transmisión deficiente de los datos seriales desde la interfaz hasta la PDA (es necesario revisar el sistema de alimentación de poder, en especial el grupo de baterías utilizadas). La forma acampanada es sin embargo correcta permitiendo hacer cálculos confiables.

4.2.1.3. Vertimiento 3 (X=30m)

Se evidencia probablemente algunos problemas de estabilidad del sensor (cambios bruscos del nivel) por lo cual se cambia la ubicación en el sitio del cauce. Así mismo se observa un corte súbito de la señal del trazador. Sin embargo la información gráfica es suficiente para inferir y calcular los datos básicos del vertimiento. Esto debido a la naturaleza “robusta” del método IDF. Lo mismo que en las curvas anteriores se debe revisar el sistema de hardware del instrumento para revisar la transmisión serial de datos desde la interfaz que soporta el sensor de conductividad.

Se muestra en rojo una curva asintótica sobre la curva experimental con ruido.
Grafica 10

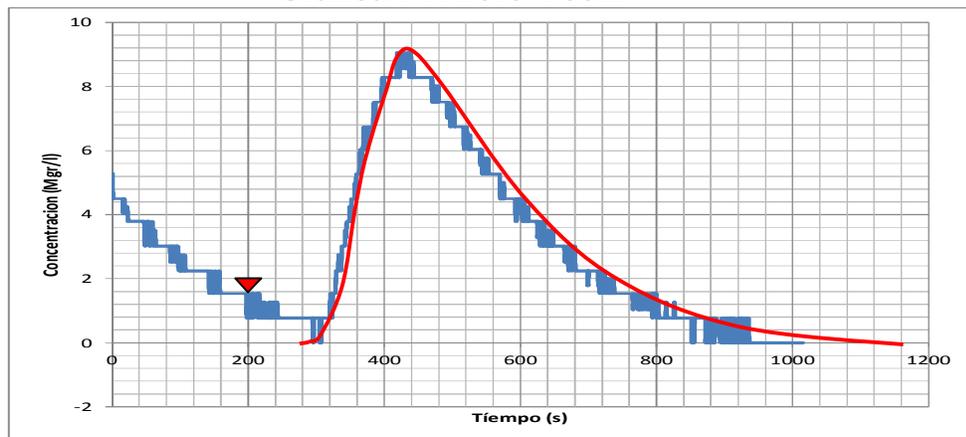
Grafica 10 Aforo 3 30m



4.2.1.4. Vertimiento 4 (X=30m)

Se puede ver que hay traslapamiento entre la curva de trazador actual y la anterior. No se observa en esta curva un cambio brusco de nivel ni truncamiento de la continuidad de la curva, indicando una transmisión serial sin problemas en el hardware del equipo. Se muestra en rojo una curva asintótica sobre la curva experimental con ruido. Grafica11.

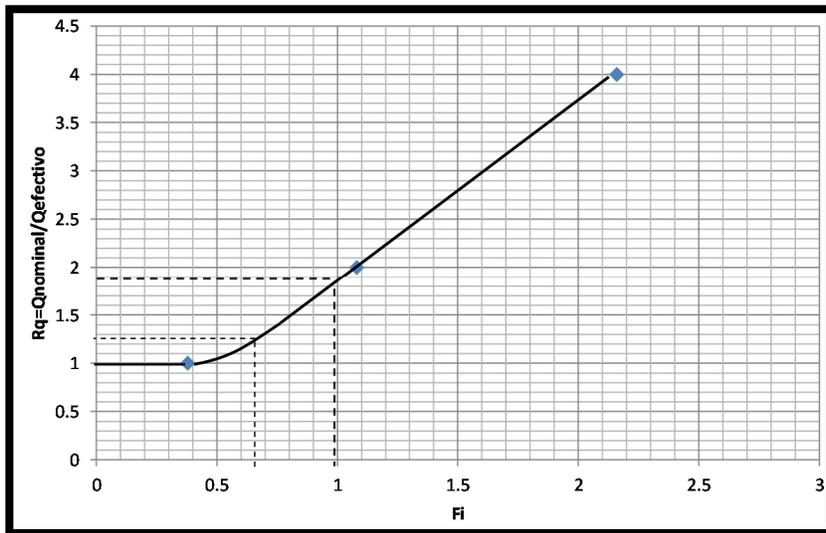
Grafica 11 Aforo 4 30m



4.2.2. Corrección de caudal

Para poder hacer una corrección de caudal se muestra la relación entre Q_f y Q_n en la Grafica 12.

Grafica 12 vs .



En el caso que se estudia, Q_n es:

Ec. (26)

a) Para $Q_n = 1$ →

Por lo tanto:

b) Para $Q_n = 0.66$ →

Por lo tanto:

Se tiene entonces que el valor más aceptable para el caudal es de

A partir de estas consideraciones se tiene en la Tabla 5 los datos básicos para la 2ª. Medición en la quebrada "La vieja":

Tabla 5 Corrección caudal

Vertimiento	Velocidad media (m/s)	Caudal Q (l/s)
Estimación mejor en el tramo considerado	0.101	29.0

4.2.3. Curva de tendencia: Cp(t)

Se plantea una ecuación de tendencia del tipo

$$C_p(t) = \alpha t^{-\frac{2}{3}} \approx \alpha t^{-0.7}$$

Donde

$$\alpha_i = \frac{C_{pi}}{t_i^{-\frac{2}{3}}}$$

Se usa en primera instancia un promedio de todos estos resultados:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_i \alpha_i$$

Su graficación en Excel con los 2 valores experimentales se muestra en seguida, no solo aproximada por tener un número limitado de experimentos y además por los problemas de ajuste en las gráficas.

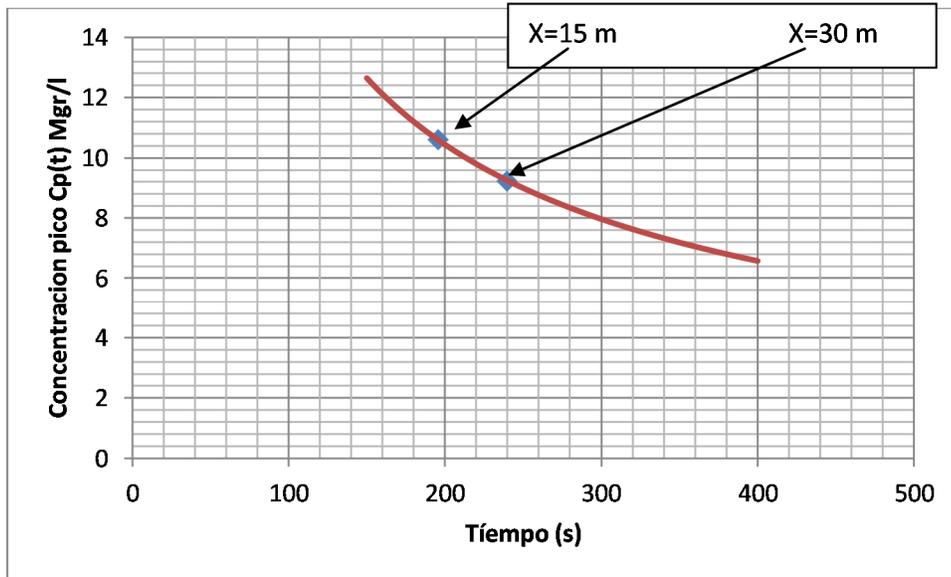
Tabla 6 Valores de curva Cp(t)

Vertimiento	Distancia (m)	Masa (g)	Tiempo del pico (s)	Concentración pico Cp (Mgr/l)	ϕ
Estimación mejor 1er vertimiento	X=15	132.4	196	10.6	0.96
Estimación mejor 2º vertimiento	X=30	132.4	240	9.24	0.66

$$\alpha_1 = \frac{C_{pi}}{t_i^{-\frac{2}{3}}} \approx \frac{10.6}{196^{-\frac{2}{3}}} \approx 358$$

Un valor aceptable para este parámetro es entonces: $\alpha \approx 357$, ver Grafica 13.

Grafica 13 Curva de tendencia $C_p(t)$



Se ve que la curva teórica cae bien sobre los 2 datos experimentales.

4.2.4. Curva de

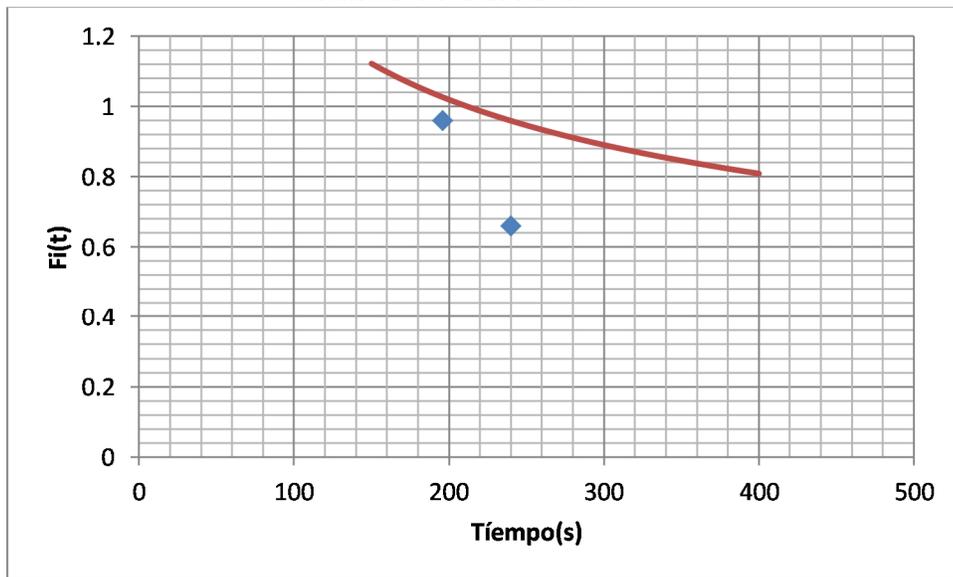
$$\text{-----} =$$

Ec. (27)

$$\text{-----} = \text{-----} = \text{-----}$$

Se expande en Excel sobre los dos datos experimentales, ver Grafica 14.

Grafica 14 Curva de



La correspondencia de la curva teórica con los datos experimentales no es aceptable. Esto indica que hay algún tipo de error en la estimación bien de C_p o bien de .

CONCLUSIONES

- El equipo IDF permite la realización de diagnósticos de manera rápida y confiable de la calidad de agua.
- El equipo analiza diferentes variables del cauce, pero de igual manera es necesario realizar ensayos complementarios para lograr una modelación del cauce de una mejor manera, dichos ensayos son los referentes a calidades propias del agua como DBO, DQO, entre otros.
- Con base en la información recolectada en los diferentes aforos, vemos la necesidad de tener una mayor información para poder realizar un modelamiento más completo, puesto que no podemos realizar líneas de tendencia en el transporte de masa para este caso por contar con solo dos puntos por aforo.
- La necesidad de realizar aforos con longitudes mayores a las presentadas en el trabajo es de vital importancia, para poder determinar la longitud de mezcla de una manera acertada encontrando el valor para Phi de 0.38, (sección 1.3), realizando una regresión con base en los datos obtenidos.
- La reducción de costos para la realización de aforos con el equipo IDF es notoriamente baja, pues no se requieren de otros tipos de aforos para encontrar parámetros como caudal, velocidad y temperatura ya que estos parámetros son medidos por el equipo.
- Por la corta distancia entre los datos de los aforos no fue posible determinar la longitud de mezcla, ya que solo se tenían dos datos no se puede generar una regresión que nos permita modelar el valor de Phi. Por esto se recomienda realizar mediciones a corta distancia para verificar el funcionamiento del equipo, para posteriormente tomar datos a mayor distancia para poder realizar una mejor modelación. Es importante recordar que esta información se debe tomar en una misma jornada, ya que de un día para otro las características de transporte que son afectadas por la velocidad del flujo pueden variar.

GLOSARIO

Advección: La advección son los mecanismos de transporte de una sustancia o líquido. Ejemplos: transporte de contaminación por un río, transporte de calor por agua o aire u otro fluido

Disponible en: <http://www.alegsa.com.ar/Definicion/de/adveccion.php> Consultado el 25 de octubre de 2012.

Dispersión: Fenómeno por el cual un conjunto de partículas que se mueve en una dirección determinada rebota sucesivamente con las partículas del medio por el que se mueve hasta perder una dirección privilegiada de movimiento.

Disponible en: [http](http://www.alegsa.com.ar/Definicion/de/adveccion.php) Consultado el 01 de noviembre de 2012

Difusión Fenómeno por el cual las moléculas o iones de una sustancia se mezclan con las de alguna otra. Se debe a la perpetua agitación que anima a las moléculas de que están compuestos todos los cuerpos.

Disponible

en: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/difusion/difusion.htm> Consultado el 28 de noviembre de 2012

Longitud de mezcla: Distancia para la cual el soluto ha llenado uniformemente la sección transversal del flujo ya que el manejo del recurso hídrico requiere de herramientas que permitan realizar la labor de medición, control y seguimiento de manera práctica y confiable.

Mezcla completa: La LM se basa en el cumplimiento del estado de la mezcla de un trazador (o contaminante) en la totalidad de la sección transversal de un río o canal, condición conocida como Mezcla Completa (MC).

BIBLIOGRAFÍA

1. **J L, Martin and S C, McCutcheon.***Hydrodynamics and transport for water quality modeling*. s.l. : Lewis Publishers, 1998.
2. *Nuevo método de cálculo de la longitud de mezcla en cauces naturales con trazadores conservativos*. **Constain Aragón, Alfredo, et al., et al.** 2006, Ingeniería del Agua.
3. **Cardini, Julio.***Dispersión de contaminantes en cuerpos receptores (Aguas superficiales)*. s.l. : UTN - Regional concepción de Uruguay.
4. **IHOBE, S.A.** Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires. [Online] www.fi.uba.ar/archivos/05_2_MANUAL.
5. **Villamizar, Fabian and Mora, Flabio** .*Evaluación de la calidad del agua mediante el uso de trazadores*. 2012.
6. **H.B., Fischer.***Longitudinal Dispersion in laboratory and natural channels*. 1966.
7. *Una ecuación de la velocidad media del flujo en régimen no uniforme, su relación con el fenómeno de dispersión como función del tiempo y su aplicación a los estudios de calidad de aguas*. **Constain, Alfredo and R, Lemos**. 164, Madrid : CEDEX, 2011.
8. **Technologies, Amazonas.***Manual de operación INIRIDA DEEP FLOW*. Cali : ATINCO Editorial DigitalLtda, 2006.
9. *Medición precisa de caudales utilizando una función de evolución de solutos dispersivos en flujos naturales*. **Constain, Alfredo**. Medellín : DYNA, Considerar 2013.
10. *Metodología para estimar la resistencia al flujo en cauces de montaña*. **Vélez, Upegui**. Sao Paulo : XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2004.
11. *Extend Irreversible Thermodynamics*. **Jou, D, Casas Vásquez, J y Lebon, G**. 2001.
12. **Céspedes, D. y Camacho, L.***Metodología dela calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos de flujo no permanente*. Sao Pablo-Brasil : XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, 2004.
13. **Céspedes, D. and Camacho, L.***Calibracion y comparación de modelos*. Bogotá : UNIANDES, Trabajo de Grado, 2002.
14. *calibracion y comparacion de modelos de transporte de solutos en rios de montaña*. **L., Camacho**. Guayana- venezuela. : s.n., 2006. XXII congreso latinoamericano de hidraulica.
15. **Cespedes, D and Camacho, L.***calibracion, aplicacion y comparacion de modelos de flujo no permanente en la cuenca media del rio Bogotá*. Bogotá. : UNIANDES., 2002.
16. *Metodología de la calibración de modelos hidrológicos e hidráulicos de flujo no permanente*. **Céspedes, D and Camacho, L.** Sao Pablo- Brasil : s.n., 2004. XXI congreso Latinoamericano de Hidráulica.
17. **Jou, D, Casas Vásquez, J and Lebon, G.** *Extend Irreversible Thermodynamics*. 2001, p. 6.
18. **Prigogine.** *El nacimiento del tiempo*. Barcelona : Tusquets, 1991, p. 47.
19. *Dispersión Random Walk, irreversibilidad y velocidades de flujo en cauces turbulentos*. **Constain, Alfredo**. 1, Enero-Junio 2005, Revista científica Ockham, Vol. 3, pp. ISSN: 1794 - 192X.
20. *Metodología de calibración de modelos hidrológicos de flujom no permanente, aplicacion en la cuenca medio del río Bogotá (Colombia)*. **Céspedes, D and Camacho, L.** Sao Pedro, estado Sao Paulo, Brasil : s.n., 2004. XXI Congreso Latinoamericano de Hidraulica.
21. **Thoman, J and Mueller, A.***Principles of surfaces water quiality modeling and control*. New York : Harper Collings Publishers, 1987.
22. **Oyarzún L, Ricardo.***Transporte de contaminantes en aguas subterráneas*. [ed.] CEAZA. 2007.
23. *El residuo liquido de las curtiembres estudio de caso: cuenca alta del rio Bogota*. **Corredor, J. 2.,** Bogotá. : Ciencia e Ingeniería Neogranadina., 2006., Vol. 16.
24. *Metodologia para la obtencion de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en rio*. **M., Camacho L. Diaz Granados**. cartagena de indias. : s.n., 2003. la hidroinformatica en la gestion integrada de los recursos hidricos. pp. pp. 73-82.
25. **Fisher and Hugo.***Mixing in inland and coastalwaters* . New York : AcademicsPress, 1998, pp 478.

26. *Informe de Objetivos de Calidad del Recurso Hídrico en la jurisdicción de CORANTIOQUIA Base Para un Plan General de Ordenamiento, Subdirección de Recursos Naturales.* CORANQUIOQUIA. Medellín : s.n., 2005. Informe de Objetivos.
27. *Guía Metodológica para el establecimiento de objetivos de calidad de los cuerpos de agua.* **Mesoca.** 1, Enero - Junio 2005, Revista científica Ockham, Vol. 3, pp. ISSN:1794 - 192X.
28. **Murte Gallo, Leonardo and Constain, Alfredo.** *Informe tecnico aforos con trazador salino 1.- quebrada "La Vieja" noviembre 2012. (tecnologia IDF).* Bogotá : s.n., 2012.
29. —. *Informe tecnico aforos con trazador salino 2.-quebrada "la vieja" noviembre 2012. (tecnologia IDF).* Bogotá : s.n., 2012.