



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Moises Adán Reyes Herrera

Asesorado por el MSc. Ing. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

Guatemala, octubre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

MOISES ADÁN REYES HERRERA

ASESORADO POR EL MSC. ING. JÉSER ESAÚ DE JESÚS NIJ PATZÁN

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Rudaman Miranda Castañón
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Hernandez Canales
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 6 de julio de 2011.



Moises Adán Reyes Herrera

Guatemala 08 de julio del año 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ing. Montenegro:

El motivo de la presente es para informarle que he realizado la revisión final del trabajo de graduación titulado "MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA" desarrollado por el estudiante universitario Moisés Adán Reyes Herrera, el cual llena los requisitos establecidos en la propuesta hecha por el sustentante, por lo que me permito aprobarlo en mi calidad de asesor del mismo.

Atentamente,



Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO No. 9826

Ingeniero Civil

Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán

MSc. Recursos Hidráulicos, Opción Hidrología

Colegiado No. 9826



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,
09 de septiembre de 2015

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Moisés Adán Reyes Herrera, quien contó con la asesoría del Ing. Jéser Esaú de Jesús Nij Patzán.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

Ing. Claudio César Castañón Contreras
Jefe del Departamento de Hidráulica

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua
/bbdeb.





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Jeser Esaú de Jesús Nij Patzán y del Coordinador del Departamento de Hidráulica, Ing. Claudio César Castañón Contreras, al trabajo de graduación del estudiante Moisés Adán Reyes Herrera, titulado **MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

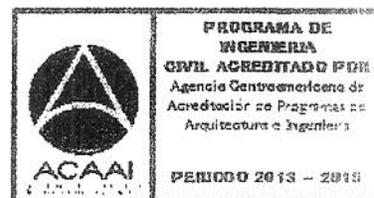

 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre 2015

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEDICIÓN Y COMPARACIÓN DE CAUDALES UTILIZANDO LOS MÉTODOS DEL TUBO DE PRANDTL Y TRAZADOR EN EL CANAL DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Moises Adán Reyes Herrera**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, octubre de 2015



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por el don de la vida y las bendiciones recibidas en el día a día.
Virgen María	Por sus intercesiones y protección.
Mis padres	Moisés Darío Reyes y Herika Herrera de Reyes, por su apoyo y amor.
Mi esposa	Por ser el eje de mi vida y mi complemento.
Mis hijos	Víctor Hugo y Edgar Estuardo Barrios, Jamie Fernanda Reyes Barrios.
Mis hermanos	Elvis Darío y Karin Emilia Reyes Herrera.
Familia	Por su cariño.
Mis suegros	Por ser como mis segundos padres y por su apoyo incondicional.
Ingeniero	Jorge David Illescas Cruz, por sus enseñanzas, confianza y sobre todo el cariño que siempre me ha manifestado.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por mi formación académica.

Mi asesor

MSc. Ing. Jéser Esaú Nij Patzán, por su tiempo
y dedicación.

Facultad de Ingeniería

Por mi formación académica.

Amigos de promoción

Por todo lo vivido durante la época de
estudiantes.

Los ingenieros

Omar Emilio Borrayo López, Rolando Illescas,
Luis Castellanos, Guillermo Passarelli, Guido
Meng e Ismael Tahuite Arana.

Transac

Por la confianza y la oportunidad de desarrollo
de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. FUNDAMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES PARA LOS MÉTODOS UTILIZADOS	1
1.1. Definición de caudal	1
1.2. Principio de funcionamiento de un vertedero.....	1
1.3. Tubo de Prandtl	5
1.4. Longitud de mezcla y balance de masa	11
1.4.1. Longitud de mezcla.....	11
1.4.2. Balance de masa	11
1.5. Medición de caudal por aforo volumétrico	12
1.6. Medición de caudal con el tubo de Prandtl	13
1.7. Medición de caudal por trazadores.....	16
2. TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS	27
2.1. Procedimiento de toma de datos	27
2.2. Aforo volumétrico.....	33
2.3. Aforo por vertedero.....	37
2.4. Aforo por medición de velocidades puntuales con el tubo de Prandtl	42

2.5.	Aforo por trazador	47
2.5.1.	Aforo por inyección constante	48
2.5.2.	Aforo por inyección puntual	59
2.6.	Procesamiento de datos y determinación de caudales por los diferentes métodos	62
2.6.1.	Aforo volumétrico	63
2.6.2.	Aforo por vertedero	64
2.6.3.	Aforo por medición de velocidades con tubo de Prandtl.....	65
2.6.4.	Aforo por inyección constante	69
2.6.5.	Aforo por inyección puntual	74
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
3.1.	Análisis de resultados	81
3.1.1.	Análisis de prueba 1	84
3.1.2.	Análisis de prueba 2	85
3.1.3.	Análisis de prueba 3	86
3.1.4.	Análisis de prueba 4	89
3.1.5.	Análisis de prueba 5	91
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97
	APÉNDICES.....	99

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada	3
2.	Tubo de Pitot.....	6
3.	Tubos de Pitot combinados.....	8
4.	Tubo de Pitot estático.....	9
5.	Medición de caudal por aforo volumétrico.....	12
6.	Perfil de velocidades para un canal.....	13
7.	Método de los seis puntos para la determinación de la velocidad media en una vertical	14
8.	Verticales y distribución de velocidades en un canal rectangular	15
9.	Determinación del caudal para diferentes verticales	16
10.	Aforo con trazadores	17
11.	Inyección constante y puntual	19
12.	Aforo por inyección constante	20
13.	Frasco Mariotte	21
14.	Aforo por inyección puntual.....	23
15.	Prueba 1.....	28
16.	Prueba 2.....	29
17.	Prueba 3.....	30
18.	Prueba 4.....	31
19.	Prueba 5.....	32
20.	Tanque para aforo volumétrico	33
21.	Puesta en marcha del equipo	34
22.	Compuerta para desviar flujo hacia el tanque	35

23.	Inicio de toma de tiempo de llenado de tanque	35
24.	Piezómetro lateral del tanque para determinación de volumen de agua contenido	36
25.	Vertedero rectangular	38
26.	Vertedero rectangular en el laboratorio.....	38
27.	Vertedero trapezoidal.....	39
28.	Vertedero trapezoidal en el laboratorio	40
29.	Longitud de la solera del vertedero.....	41
30.	Tubo de Prandtl	42
31.	Diferencia de alturas para el tubo de Prandtl.....	43
32.	Diferencia de alturas para el tubo de Prandtl en el laboratorio	44
33.	Toma de velocidades puntuales con tubo de Prandtl	45
34.	Toma de velocidades puntuales con tubo de Prandtl a diferentes distancias.....	46
35.	Frasco Mariotte.....	48
36.	Aforo del frasco Mariotte para determinar el valor del caudal inyectado “q”	49
37.	Esquema del aforo del frasco Mariotte para determinar el valor del caudal inyectado “q”.....	50
38.	Sal común a mezclar con el agua para utilizar como trazador.....	51
39.	Recipiente para realizar mezcla de agua con sal (salmuera)	51
40.	Sonda para medir concentraciones	52
41.	Disposición del frasco Mariotte para inyección constante.....	54
42.	Turbulencia en canal en el punto de inyección del trazador	55
43.	Cronómetro.....	56
44.	Comportamiento de la concentración para prueba constante 3.1.....	58
45.	Frasco para inyección puntual	59
46.	Comportamiento de la concentración para prueba puntal 3.1	62

47.	Esquema de velocidades puntuales obtenidas al procesar los datos del tubo de Prandtl	66
48.	Esquema de cálculos de áreas entre concentraciones	75
49.	Esquema de disposición del tubo de Prandtl en una sección del canal y distribuciones de velocidad horizontal y vertical para las pruebas 1, 2 y 3	88
50.	Distribución horizontal de velocidades	90

TABLAS

I.	Datos obtenidos con aforo volumétrico para la prueba 3	37
II.	Datos obtenidos para aforo con vertedero trapezoidal para la prueba 3.....	41
III.	Valores de parámetros obtenidos para prueba 3.1 con tubo de Prandtl.....	47
IV.	Datos para aforo del frasco Mariotte	50
V.	Valores de concentraciones para prueba constante 3.1	53
VI.	Datos tomados para prueba de inyección constante 3.1	57
VII.	Valores de concentraciones para prueba puntual 3.1	60
VIII.	Datos tomados para prueba de inyección puntual 3.1	61
IX.	Caudales obtenidos con aforo volumétrico para la prueba 3	64
X.	Caudal obtenido con aforo por vertedero de pared trapezoidal para la prueba 3.....	64
XI.	Caudal obtenido con aforo por vertedero de pared trapezoidal para la prueba 3 con ecuación alterna.....	65
XII.	Determinación de caudal con datos de tubo de Prandtl para sección 3.1 para prueba 3.....	68

XIII.	Valores de caudales con medición de velocidades con tubo de Prandtl para diferentes secciones del canal para prueba 3	69
XIV.	Procesamiento de datos para obtener caudal inyectado con frasco Mariotte para inyección constante 3.1 de la prueba 3.....	70
XV.	Datos medidos y procesados antes de inyección constante 3.1	71
XVI.	Datos tomados y procesados para prueba de inyección constante 3.1	72
XVII.	Caudales obtenidos con inyección constante para prueba 3.....	73
XVIII.	Datos medidos antes de inyección puntual 3.1	74
XIX.	Datos tomados y procesados para prueba de inyección puntual 3.1.....	76
XX.	Caudales obtenidos con inyección puntual para prueba 3	78
XXI.	Resumen de caudales obtenidos para prueba 3	79
XXII.	Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 1	84
XXIII.	Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 2	85
XXIV.	Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 3	86
XXV.	Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 4	89
XXVI.	Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 5	91

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
q	Caudal relacionado a una vertical determinada
Q	Caudal total circulante por una sección
t	Tiempo en segundos
V_m	Velocidad media para una vertical
\bar{V}	Velocidad media para una vertical (V_m)
V	Volumen inyectado de solución de trazador

GLOSARIO

Aforar	Medición de la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.
Aforo	Acción y efecto de aforar.
Concentración	Proporción o relación que hay entre la cantidad de soluto y la cantidad de disolvente.
Disolvente	Sustancia que se disuelve.
Soluto	Sustancia que disuelve al soluto.
Trazador	Producto químico añadido o naturalmente presente en el agua que permite conocer su concentración.
Viscosidad	Oposición de un fluido a las fuerzas tangenciales.

RESUMEN

La información del presente trabajo de graduación consiste en la recopilación de teoría relacionada con algunos métodos utilizados para el aforo de corrientes y su aplicación práctica, para la determinación de caudales en condiciones de laboratorio. En el primer capítulo se trata la teoría básica en la cual se basan los métodos de aforo estudiados, en el segundo capítulo se indica la forma en la cual se llevaron a cabo las pruebas y en el tercero se realiza el análisis de los resultados obtenidos.

Para su elaboración se procedió primero a determinar qué tipos de aforos son los más utilizados o mencionados en los cursos de hidrología e hidráulica y que fueran factibles de ser realizados en el canal del laboratorio de hidráulica, se estudió literatura y trabajos de graduación relacionados con el tema, para el caso del aforo con tubo de Pitot se decidió utilizarlo para tener un método similar a la medición de velocidades con molinete (método de velocidades).

Posterior a ello se determinó la forma en la cual se llevarían a cabo las pruebas de laboratorio y se realizaron ensayos preliminares para probar el equipo de medición utilizado. Una vez hecho esto se procedió a la realización de los ensayos y recopilación de la información obtenida, esta información obtenida se procesó y graficó obteniendo resultados que luego se analizaron. La forma en la cual se llevaron a cabo las diferentes pruebas se explican con el mayor detalle posible con el apoyo de esquemas, de tal forma que puedan ser replicadas o realizadas en condiciones de campo. Al final del informe se muestran los datos obtenidos sin procesar, previo a la obtención de caudales y los valores de caudales, junto con las gráficas que indican el comportamiento

de los parámetros medidos con ayuda del equipo y que sirvieron para calcularlos.

OBJETIVOS

General

Presentar un documento que recopile información básica respecto a los métodos de aforo realizados, la forma de llevarlos a cabo y sus ventajas y desventajas.

Específicos

1. Analizar los valores de caudal determinados para las diferentes metodologías estudiadas y verificar si diferentes aforos proveen valores de caudales similares en condiciones de laboratorio.
2. Proveer al estudiante y profesional de la ingeniería de un documento que además de indicar la información básica de métodos de aforo de canales, contenga pruebas de laboratorio que puedan ser replicadas si así se desea con fines didácticos u otros relacionados.

INTRODUCCIÓN

Dada la variedad existente de métodos de aforo de corrientes, la mayoría de las veces algunos de estos métodos se conocen únicamente de manera teórica; aunado a ello existe poca literatura que explique paso a paso como estos ensayos se realizan; es por ello que a lo largo de los diferentes capítulos del trabajo se tratan temas como los principios en los cuales se fundamentan los métodos estudiados, se indica la disposición del equipo para las pruebas realizadas de tal forma que se ensayaran diferentes condiciones.

Tal y como se menciona en los objetivos, se pretende lograr que tanto los estudiantes como profesionales de la ingeniería tengan acceso a material bibliográfico que les sirva de guía para llevar a cabo las pruebas de manera demostrativa o para aplicarlo en condiciones de campo.

En cuanto a las metodologías empleadas se abarcan desde las más simples como el aforo volumétrico hasta las que utilizan trazadores y la ecuación del balance de masas. Inicialmente se iban a efectuar únicamente los métodos del tubo de Prandtl y trazadores. Sin embargo, se decidió complementar con el uso de vertederos de sección rectangular y trapezoidal, a su vez en el uso de los trazadores se decidió utilizar la inyección constante y la puntual, cada una de ellas y sus diferencias se explica con mayor detalle en el documento.

1. FUNDAMENTOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES PARA LOS MÉTODOS UTILIZADOS

1.1. Definición de caudal

El caudal es la cantidad de fluido, en unidades de volumen, que pasa por determinada sección por unidad de tiempo. Esto significa que el caudal depende del área de la sección y de la velocidad de flujo. Así para una misma superficie, si el fluido va a mayor velocidad, será atravesado por un mayor caudal y viceversa. Para una misma velocidad cuanto mayor es la superficie mayor es el caudal. Existen diversas metodologías para determinar el valor del caudal (conocidas como aforos), entre los métodos de medición de caudal se encuentran: método volumétrico, aforo por medio de vertederos, aforo por medio de trazadores y método de área-velocidad con el del molinete.

1.2. Principio de funcionamiento de un vertedero

Un vertedero o aliviadero es una estructura hidráulica con el borde superior horizontal o con una cierta forma regular que descarga libremente. Las principales funciones de los vertederos son: aforo o medición de caudales, elevar el nivel del agua, evacuación de crecientes o derivación de un determinado caudal, control de nivel en embalses, canales, depósitos, estanques, entre otros.

Cuando la descarga se realiza sobre una arista aguda, el vertedero se llama de pared delgada; cuando la descarga se realiza sobre un borde grueso, el vertedero se llama de pared gruesa o cresta ancha. Tanto el vertedero de

pared delgada como el de pared gruesa pueden utilizarse en canales u obras de laboratorio o en canales pequeños que por lo general no transportan sedimentos.

Cuando un vertedero se utiliza para determinar el caudal, la relación entre caudal y carga o altura sobre la cresta del vertedero puede determinarse aplicando el análisis dimensional, para el caso de los vertederos de pared delgada el caudal se determina de la siguiente forma:

- Aguas arriba del vertedero, el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad de acuerdo con la variación hidrostática de las presiones, es decir, $p = \rho gh$.

En donde:

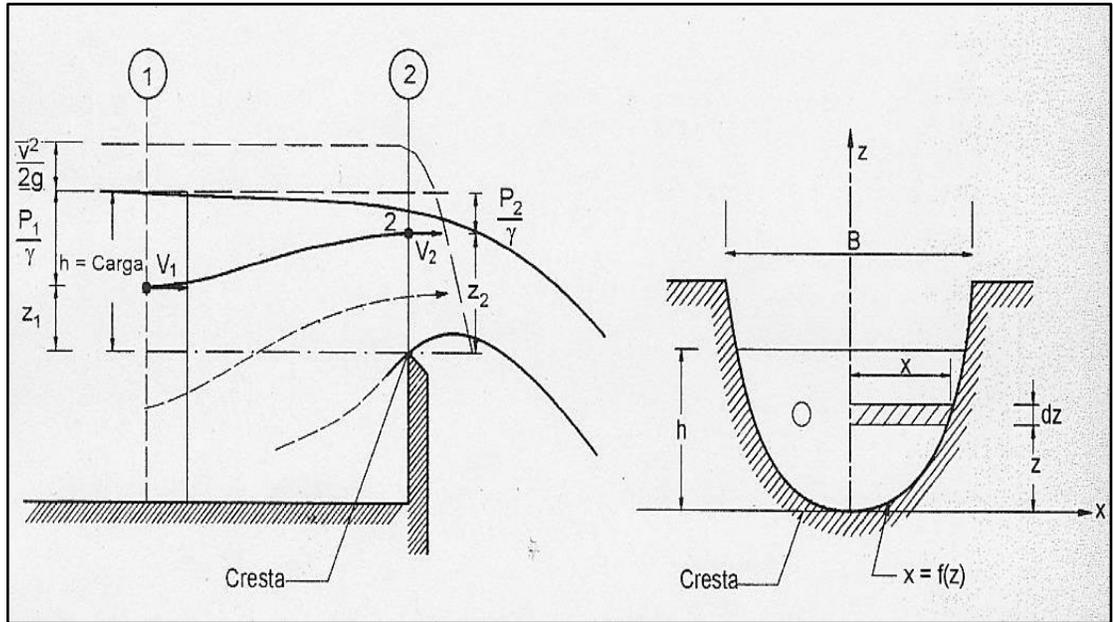
ρ = densidad de la sustancia

g = aceleración de la gravedad

h = profundidad bajo la superficie del fluido

- La superficie permanece horizontal junto a la cresta del vertedero y las partículas pasan sobre esta horizontalmente (en la realidad se presenta una contracción y la superficie libre cae junto a la cresta del vertedero).
- La presión en cualquier punto de la sección transversal por la cresta del vertedero es la presión atmosférica.
- Se desprecian los efectos de la viscosidad y de tensión superficial.

Figura 1. Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada



Fuente: DÍAZ RODRÍGUEZ, Héctor Alfonso. *Hidráulica experimental*. p. 274.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones 1 y 2, de la figura 1, se tiene:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

En donde:

Z = energía potencial o de altura

P = presión ejercida por el agua en la sección del canal

ρ = densidad del agua

g = aceleración de la gravedad

v = velocidad media del flujo

Si:

$$\frac{P_2}{\rho g} = 0 \quad Y \quad Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} = h$$

La ecuación de Bernoulli queda expresada así:

$$h + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Y entonces la velocidad de una partícula en la cresta del vertedero es:

$$v_2 = \left[2g \left(h - Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \right]^{0.5}$$

El caudal teórico a través de un área elemental de espesor dz es:

$$dQ = 2x \left[2g \left(h - Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \right]^{0.5} dz$$

Y el caudal teórico total será:

$$Q_t = \int_0^h 2x \left[2g \left(h - Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \right]^{0.5} dz$$

Para determinar el caudal, es necesario incluir en la expresión anterior un coeficiente que se determina experimentalmente, este coeficiente se conoce como coeficiente de descarga, entonces, la expresión general para el caudal real a través de un vertedero es:

$$Q_t = C \int_0^h 2x \left[2g \left(h - Z_2 + \frac{v_1^2}{2g} \right) \right]^{0.5} dz$$

En la práctica el término $v_1^2/2g$ no se tiene en cuenta, ya que es un valor demasiado pequeño.

La magnitud del coeficiente de descarga también dependerá entre muchas otras variables, de la velocidad de aproximación, de las contracciones laterales, es decir, del ancho del vertedero con respecto al ancho del canal, de la altura de la cresta con respecto al fondo del canal y de la inclinación de la pared del vertedero y de la forma o sección del vertedero.

1.3. Tubo de Prandtl

Si un tubo doblado es colocado en una corriente de líquido con su entrada de tal forma que el flujo de aguas arriba ingrese en él, el agua en el tubo se elevará una altura h (no se toma en cuenta el efecto por capilaridad o se asume ausente) como se ve en la figura 2a. La ecuación de Bernoulli escrita para un punto aguas arriba del final de la parte sumergida y el final del tubo mismo es la siguiente:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = p_0$$

En donde:

P_1 = presión en la entrada de tubo

P_0 = presión estática

ρ = densidad del agua

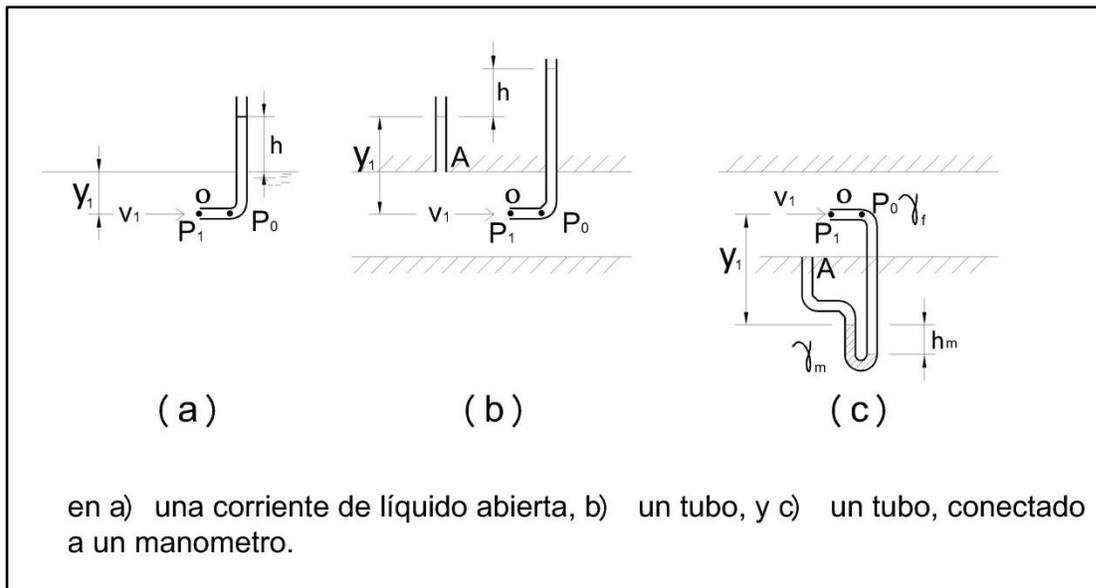
g = aceleración de la gravedad

v = velocidad media del flujo

Ya que existe una condición de estancamiento en el tubo y dado que $p_1 = \gamma y_1$ y que $p_0 = \gamma \cdot (y_1 + h)$, la ecuación puede ser resuelta de la siguiente forma:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\gamma h}{\rho}} = \sqrt{2gh}$$

Figura 2. **Tubo de Pitot**



Fuente: OLSON, Reuben. *Engineering fluid mechanics*. p. 343.

Si la velocidad de corriente en un punto en una tubería va a ser medida (ver figura 2b) se obtiene la misma ecuación. Si la presión estática es alta, y_1 tiene un valor grande y la lectura de los valores de y_1 y $(y_1 + h)$ puede ser difícil.

Los tubos mostrados en la figura 2b pueden ser conectados a un manómetro simple como se muestra en la figura 2c para ser un sistema más conveniente. La diferencia entre la presión por estancamiento y la estática (presión para flujo libre) es:

$$p_0 - p_1 = h_m \cdot (\gamma_m - \gamma_f)$$

Donde h_m es la diferencia de alturas en el manómetro, y γ_m y γ_f son los pesos específicos del líquido que fluye y el que está contenido en el manómetro respectivamente. La velocidad de corriente por lo tanto se obtiene como:

$$v_1 = \sqrt{2gh_m \frac{\gamma_m - \gamma_f}{\gamma_f}} = \sqrt{2 \frac{(p_0 - p_s)}{\rho}}$$

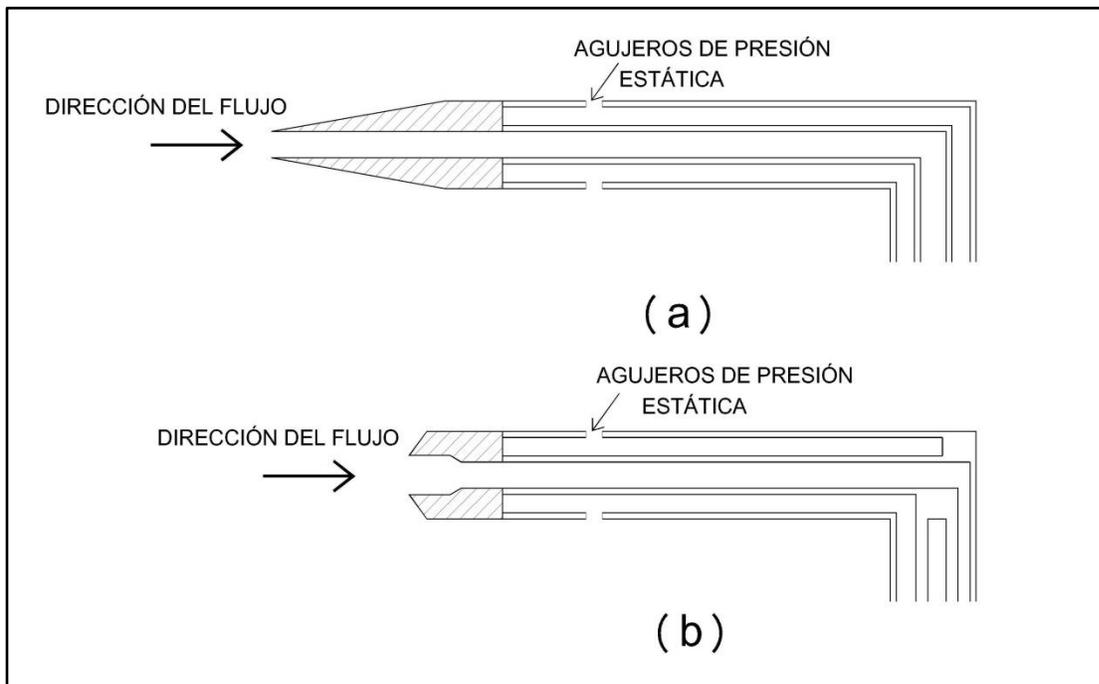
Los orificios del dispositivo deben ser tan pequeños como sea posible con el objetivo de medir la velocidad puntual. Si $Re = ur/\nu < 50$ (r es el radio de la apertura del tubo) los efectos del tubo laminar alrededor del tubo causarán que la presión de estancamiento indicada sea errónea.

El sistema mostrado en la figura 2c puede ser incorporado en un solo instrumento conocido como tubo de Pitot combinado. Este tubo consiste en dos cilindros concéntricos en forma de "L" y con varias formas en la punta, tales que el cilindro interno se encuentra a presión de estancamiento y la región anular se encuentra a una presión de flujo libre. Esquemas de las dos formas más comunes de punta para este dispositivo se muestran en la figura 3. La presión estática indicada es objeto de incerteza, porque los orificios para medirla pueden estar sometidos a una presión ligeramente diferente a la que existe en el flujo libre. Si el flujo es turbulento, la velocidad de alta frecuencia y

variaciones de presión tienen el efecto de indicar una velocidad mayor que la velocidad media y es común utilizar un coeficiente C_v de tal forma que:

$$v_1 = C_v \sqrt{2gh_m \frac{\gamma_m - \gamma_f}{\gamma_f}}$$

Figura 3. **Tubos de Pitot combinados**

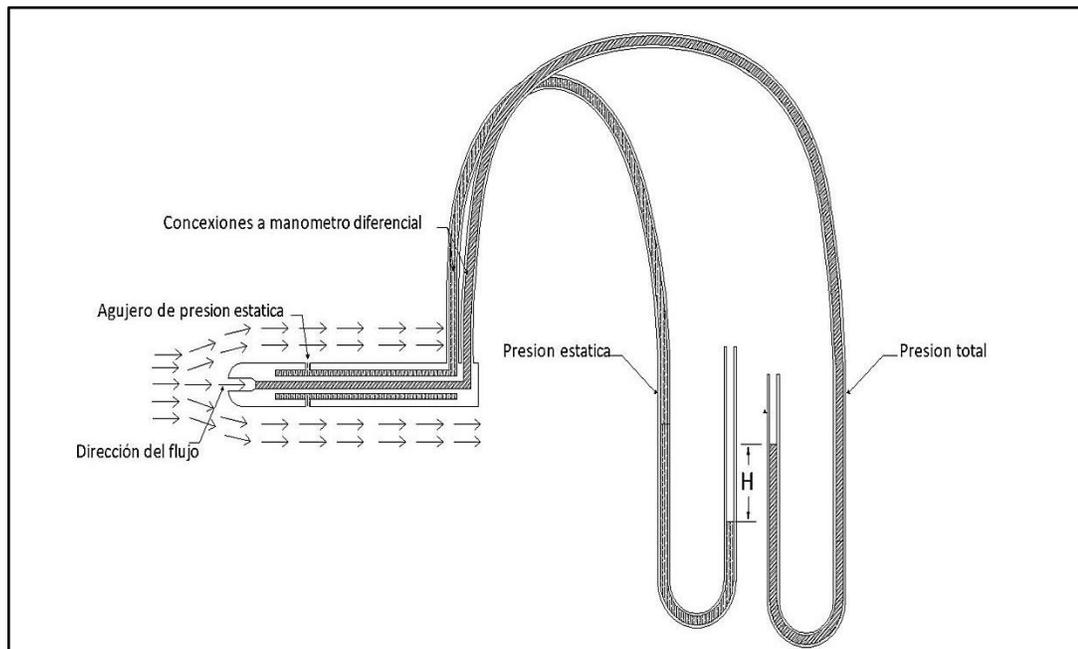


Nota: (a) El diseño Brabbee, (b) Prandtl's diseño. Diseño Prandtl es exacto sobre un mayor rango de orientación que el diseño de Brabbee.

Fuente: OLSON, Reuben. *Engineering fluid mechanics*. p. 347.

A menos que el instrumento esté debidamente calibrado, este coeficiente se toma como igual a la unidad. Es de hacer notar que las variaciones de velocidad se manifiestan como variaciones en la presión.

Figura 4. **Tubo de Pitot estático**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

El tubo de Pitot combinado es también conocido como tubo de Pitot estático o tubo de Prandtl; a continuación se muestra otro análisis para determinar la velocidad puntual con el tubo de Prandtl en una corriente de agua (ver figura 4).

Presión estática + presión dinámica = presión total

$$\left(P_s + \rho \frac{v^2}{2} \right) = P_t$$

$$v^2 = 2 \frac{(P_t - P_s)}{\rho}$$

En donde:

P_s = presión estática

P_t = presión total

ρ = densidad del agua

Utilizando la definición de presión se pueden sustituir la presión estática y la total por medio de las igualdades:

$$P_s = \gamma_w \cdot h_s$$

$$P_t = \gamma_w \cdot h_t$$

Donde h_s y h_t son la altura estática y total respectivamente, γ_w el peso específico del agua el cual es igual también a ρg , quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$v = \sqrt{2g(h_t - h_s)}$$

Si $\Delta h = h_t - h_s$ se toma como el valor de la diferencia de alturas alcanzadas, entonces:

$$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

1.4. Longitud de mezcla y balance de masa

Son utilizadas para las mediciones de los caudales por medio de trazador, a continuación se realiza una breve descripción de ambas.

1.4.1. Longitud de mezcla

La longitud de mezcla se define como aquella distancia en la cual la difusión lateral se ha cumplido significativamente y por lo tanto la concentración de un trazador en la sección transversal es casi homogénea. Un trazador es aquella sustancia que se introduce en un sistema con el fin de evaluar su comportamiento o presencia en el tiempo, para el caso de medición de caudales el trazador es aquella sustancia cuya concentración puede ser medible al ser inyectada en un cuerpo receptor, en el caso de las pruebas llevadas a cabo se utilizó sal común disuelta en agua.

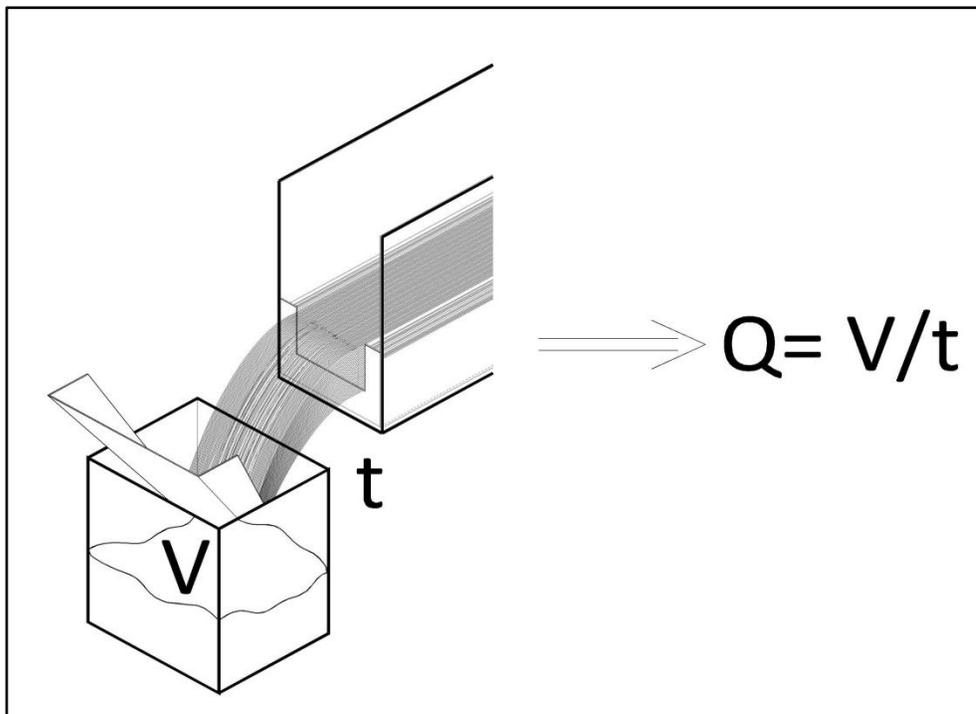
1.4.2. Balance de masa

También conocido como balance de materia. El balance de masa es una expresión de la conservación de la materia. La transferencia de masa se produce en mezclas que contienen diferentes concentraciones locales, como cuando se aplica una gota de tinta en un recipiente con agua, la transferencia de materia es el responsable del movimiento de las moléculas de tinta a través del agua hasta alcanzar el equilibrio y conseguir una concentración uniforme. La materia se mueve de un lado a otro debido a la influencia de una diferencia o gradiente de concentración en el sistema.

1.5. Medición de caudal por aforo volumétrico

Dado que el caudal se mide en unidades de volumen entre unidades de tiempo, una de las formas más sencillas de determinar caudales pequeños es por medio de la medición del tiempo que tarda en llenarse un recipiente con volumen conocido, posteriormente el volumen llenado se divide entre el tiempo o promedio de tiempos de llenado para obtener el valor de caudal medio de la corriente analizada. El tiempo que tarde el recipiente en ser llenado deberá ser medido con precisión, especialmente cuando sea de solo unos pocos segundos. La variación entre diversas mediciones efectuadas sucesivamente dará una indicación de la precisión de los resultados (ver figura 5).

Figura 5. Medición de caudal por aforo volumétrico

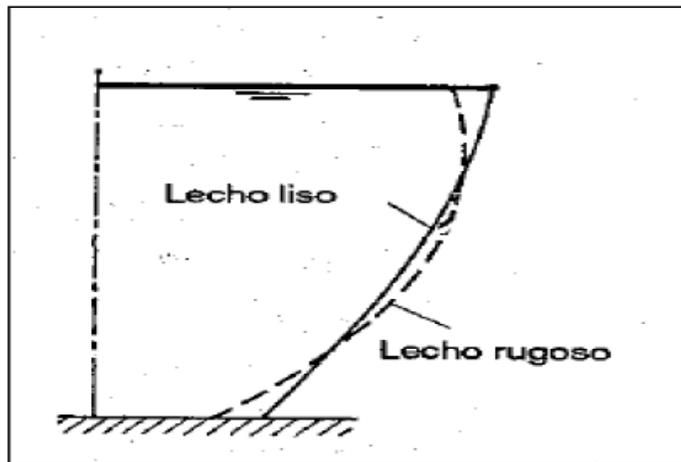


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

1.6. Medición de caudal con el tubo de Prandtl

Para la medición con tubo de Prandtl se tomó como base la curva o perfil de velocidades para el flujo en un canal rectangular, dado que el tubo de Prandtl sirve para determinar la velocidad puntual, al variar la profundidad del orificio de entrada pueden conocerse las velocidades y notarse la variación de las mismas a lo largo del tirante (profundidad del agua) desde la superficie hasta cerca del fondo del canal (ver figura 6).

Figura 6. Perfil de velocidades para un canal

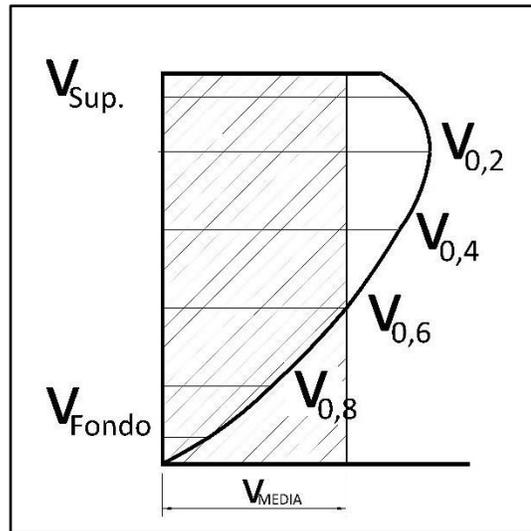


Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 25.

La velocidad media representativa de la curva de velocidades (ver figura 7) verticales se determina por medio de la ecuación:

$$\bar{v} = v_{superficie} + 2 \cdot v_{0,2} + 2 \cdot v_{0,4} + 2 \cdot v_{0,6} + 2 \cdot v_{0,8} + v_{fondo}$$

Figura 7. **Método de los seis puntos para la determinación de la velocidad media en una vertical**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

En donde:

\bar{v} = velocidad media de la curva de distribución de velocidades.

$v_{superficie}$ = velocidad cercana a la superficie del agua.

$v_{0,2}$ = velocidad a una altura de 0,2 veces la profundidad del agua de la superficie hacia el fondo o lecho del canal.

$v_{0,4}$ = velocidad a una altura de 0,4 veces la profundidad del agua de la superficie hacia el fondo o lecho del canal.

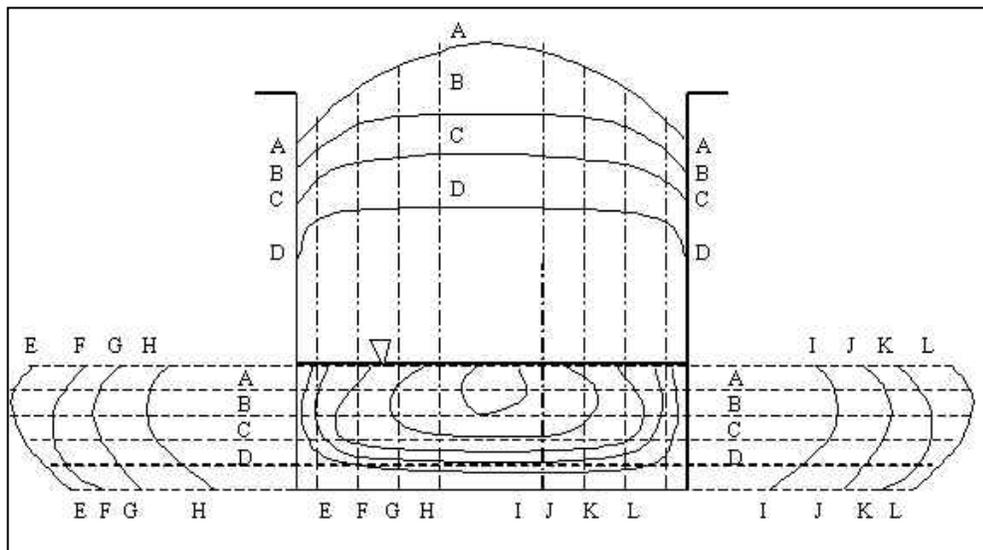
$v_{0,6}$ = velocidad a una altura de 0,6 veces la profundidad del agua de la superficie hacia el fondo o lecho del canal.

$v_{0,8}$ = velocidad a una altura de 0,8 veces la profundidad del agua de la superficie hacia el fondo o lecho del canal.

v_{fondo} = velocidad cercana al lecho o fondo del canal.

La toma de estas velocidades a sus respectivas alturas se basa en las profundidades definidas por la Organización Meteorológica Mundial en su *Manual de prácticas hidrológicas*. Esta velocidad media se calcula entonces para cada distancia desde una orilla del canal hacia la otra, cada punto donde se determina la curva de velocidades se conoce comúnmente como vertical. Si todos los puntos representando sus velocidades se plotearán para un canal, natural o artificial, se podría observar el comportamiento de las curvas de igual velocidad o isotacas (ver figura 8, las letras E, F, G, H, I, J, K, y L representan las diferentes verticales y curvas verticales de distribución de velocidades; las letras A, B, C, y D representan la distribución de horizontal de velocidades para diferentes profundidades).

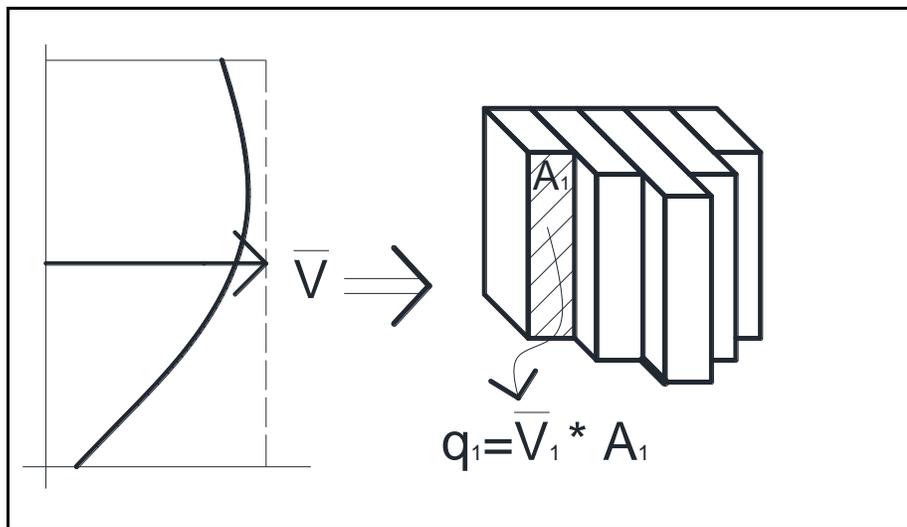
Figura 8. **Verticales y distribución de velocidades en un canal rectangular**



Fuente: CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. p. 24.

Finalmente cada vertical tendrá una velocidad media (\bar{V}_i) y un área de influencia (A_i) que abarca desde la distancia media de la vertical que tiene a su derecha y a su izquierda. Si se multiplica cada velocidad media por su correspondiente área de influencia se tiene una serie de caudales unitarios (q_i) cuya suma es igual al caudal total que fluye por la sección (ver figura 9).

Figura 9. **Determinación del caudal para diferentes verticales**



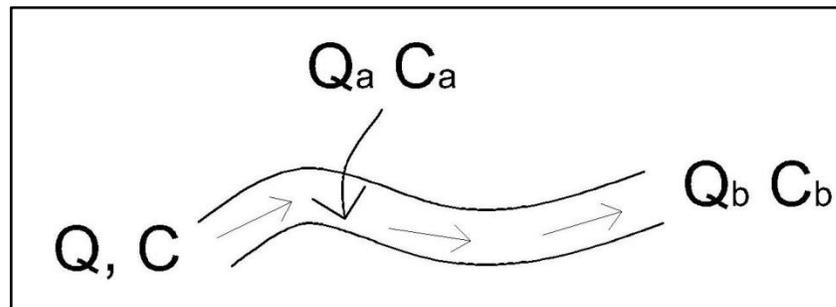
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

1.7. **Medición de caudal por trazadores**

Los aforos por medio de trazadores se basan en la medición y análisis de la variación de la concentración de una sustancia conservativa inyectada en una corriente. La figura 10 muestra un esquema de aforo con trazadores, se tienen los datos de concentración natural o existente (C) de determinada sustancia utilizada como trazador en el cauce, posteriormente se inyectaría a determinado ritmo o caudal (Q_a) el trazador o una dilución del mismo con una concentración

distinta (C_a), para determinar luego de la longitud de mezcla los valores de concentración final (C_b) en el tiempo, obtenidos y analizados estos datos puede determinarse el valor del caudal circulante (Q).

Figura 10. **Aforo con trazadores**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Para determinar la longitud de mezcla existen varias ecuaciones, estando entre ellas la ecuación empírica:

$$L = b \cdot Q^{1/3}$$

En donde:

L = longitud de mezcla.

b = coeficiente empírico (14 si la inyección es en el centro del canal, 60 si es al lado del mismo).

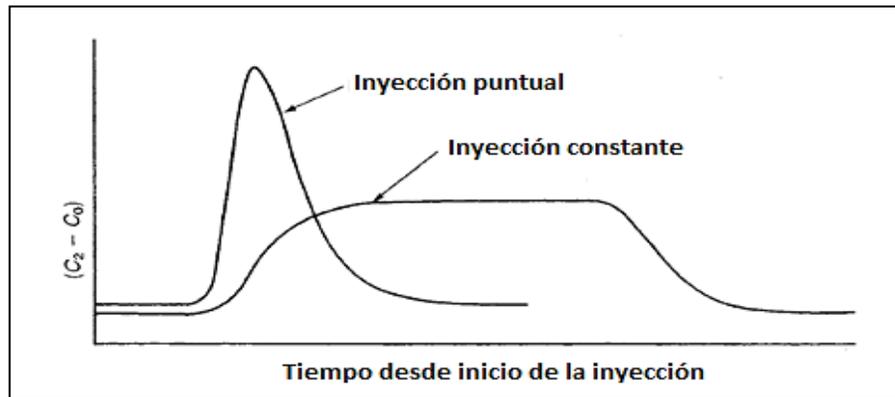
Q = valor aproximado del caudal del cauce.

Como trazador puede utilizarse una sustancia que tenga las siguientes características:

- Debe disolverse rápidamente en el agua de la corriente a temperaturas normales.
- No debe estar presente en el agua o debe estar en cantidades mínimas.
- No debe descomponerse en el agua, ser retenida o absorbida por sedimentos, organismos, recipientes o el perímetro de la sección transversal del canal natural o artificial.
- No debe reaccionar químicamente con las superficies.
- Su concentración debe medirse en forma exacta con métodos sencillos.
- No debe ser dañina para el medio ambiente durante períodos prolongados.
- No debe alterar las propiedades y condiciones del agua como la densidad, viscosidad y temperatura.
- Debe ser fácilmente soluble en agua y no debe precipitarse, permitiendo marcar grandes cantidades de fluido con una pequeña cantidad del mismo.
- Debe de poderse medir *in situ*.
- Debe de ser económico.

La sustancia que reúne la mayoría de estas características es la sal común, de preferencia de grano fino.

Figura 11. **Inyección constante y puntual**



Fuente: HERSCHY, Reginald W. *Streamflow measurement*. p. 396.

Existen dos tipos de aforo por medio de trazadores, el aforo por inyección constante y el aforo por inyección puntual, la figura 11 muestra un esquema del comportamiento de la concentración natural de determinada sustancia en una corriente (C_0) y como esta varía en el tiempo (C_2) al inyectarse el trazador.

En el caso de la inyección constante, el objetivo es determinar el valor del caudal circulante en el canal (Q_1), el cual tiene una concentración (C_0) de una sustancia química. En un punto del cauce se inyecta a caudal constante (q) una solución con una concentración conocida (C_1) del trazador, en el caso de las pruebas llevadas a cabo agua con sal o salmuera; al mantener la inyección durante un período de tiempo la concentración que lleva el agua que fluye variará hasta que alcance un valor constante (C_2), como se observa en la figura 12 hasta el punto en el cual la inyección se detenga, instante en el cual la concentración comenzará a disminuir hasta alcanzar su valor inicial (C_0). El análisis para determinar el caudal circulante es el siguiente, a un caudal Q_1 con una concentración C_0 se le inyecta un caudal constante q con una concentración C_1 :

$$Q_1 \cdot C_0 + q \cdot C_1$$

Dando como lugar un valor de caudal y concentración diferentes luego de la longitud de mezcla:

$$Q_1 \cdot C_0 + q \cdot C_1 = Q_2 \cdot C_2$$

En donde:

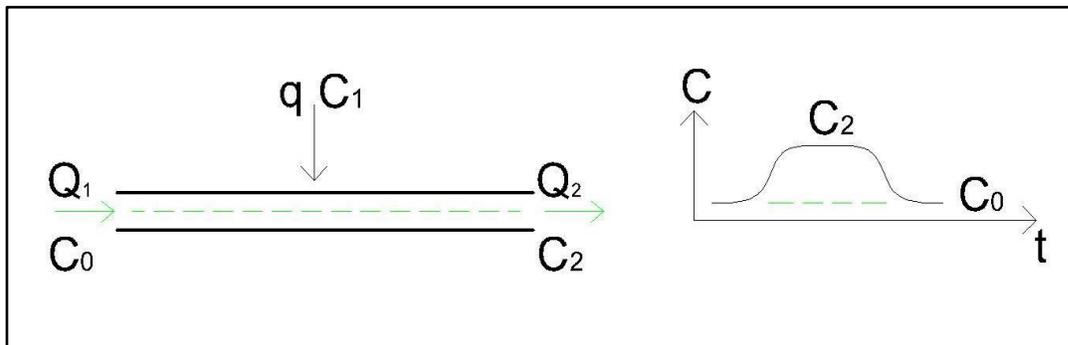
$$Q_2 = Q_1 + q$$

C_2 = concentración del trazador luego de que se ha alcanzado una mezcla homogénea del mismo.

Despejando el valor correspondiente, el caudal circulante se obtiene como:

$$Q_1 = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

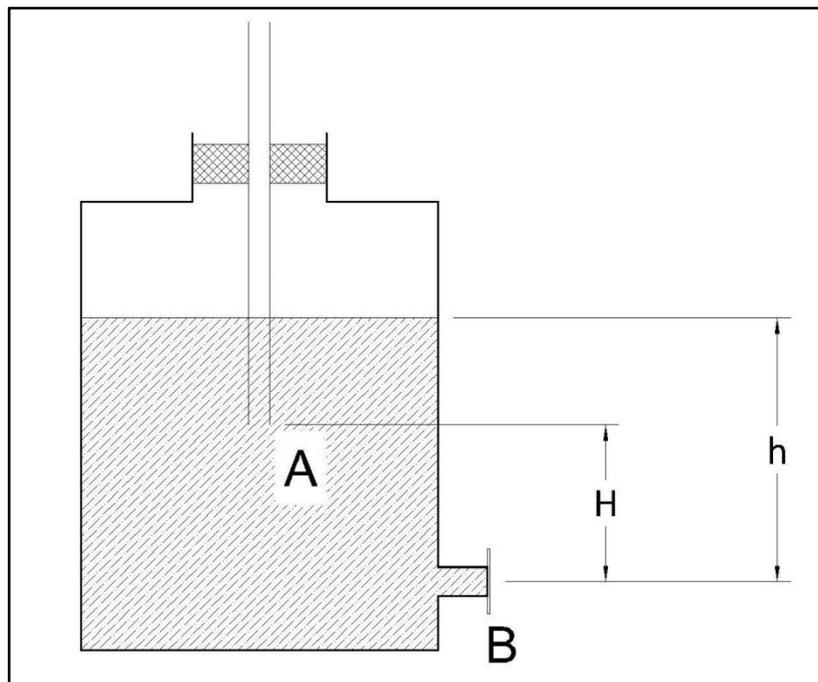
Figura 12. **Aforo por inyección constante**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Para la inyección constante puede utilizarse un dispositivo conocido como frasco Mariotte (ver figura 13), consiste en un recipiente lleno de líquido hasta una altura (h), este se encuentra cerrado por un tapón atravesado por un tubo abierto por ambos extremos, cuyo extremo inferior (A) se encuentra sumergido en el líquido contenido en el frasco; el líquido sale del frasco por un orificio (B) ubicado en la pared lateral del recipiente, de tal modo que la altura entre el extremo inferior del tubo A y el orificio de salida B sea H .

Figura 13. **Frasco Mariotte**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Si el orificio B se encuentra inicialmente cerrado, al comenzar la salida del líquido el volumen en la parte superior del frasco aumenta, disminuyendo por lo tanto su presión. Como dicha presión es menor que la atmosférica, el líquido desciende más rápido a través del tubo ya que este comunica directamente con

la atmósfera, al llegar el nivel del líquido en el tubo al extremo inferior A el aire que ingresa por él asciende en burbujas a través del líquido en el frasco alojándose en la parte superior del mismo.

Conforme se vacía el frasco, la presión en la parte inferior del tubo es la atmosférica, ya que entra aire por el tubo a medida que sale líquido por el orificio lateral; de igual forma la presión en el orificio de salida es la atmosférica. Si se aplica la ecuación de Bernoulli entre los puntos A y B se tiene lo siguiente:

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gH = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho g \cdot 0$$

Dado que la presión en A y en B es la atmosférica, ambas se pueden anular al igual que la velocidad en A que puede considerarse aproximadamente igual a cero; quedando únicamente:

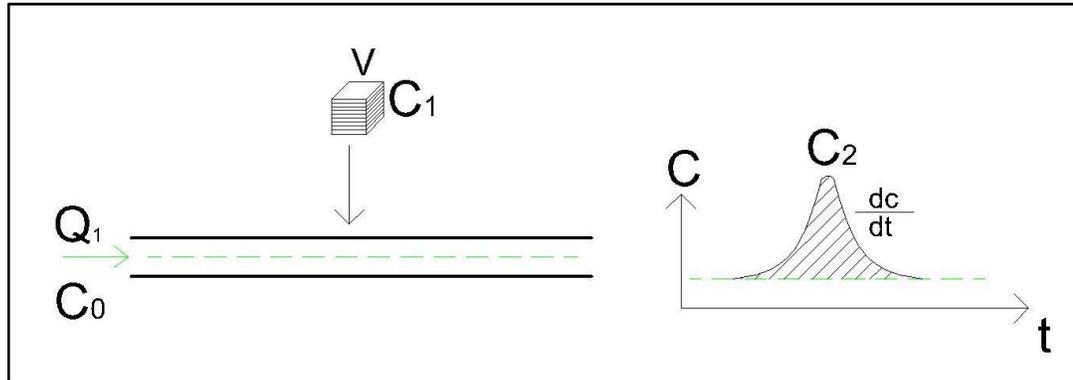
$$\rho gH = \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

Siendo la velocidad de salida:

$$v_B = \sqrt{2gH}$$

Se tiene entonces que la velocidad de salida va a depender de la altura H entre A y B; esta velocidad se mantendrá constante hasta que el nivel del líquido sea más bajo que el punto A, al disminuir entonces H también lo hará progresivamente la velocidad de salida. El caudal que proporciona el frasco Mariotte es proporcional a la velocidad por lo que también es constante.

Figura 14. **Aforo por inyección puntual**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Para el aforo por inyección puntual debe conocerse el peso inyectado de trazador y cómo la concentración en el cauce o canal natural se comporta en el tiempo; si se vierte un volumen (V) conocido que contenga una concentración (C_1) con un peso (P) de una sustancia química disuelta ($P = C_1 \cdot V_1$), este volumen será arrastrado aguas abajo como una nube expansiva hasta una distancia a la cual se logre una mezcla homogénea con el agua del cauce que puede o no tener una concentración de trazador existente (C_0). Si se toman mediciones de la concentración en este punto a intervalos de tiempo regulares se verá un comportamiento particular en la concentración de trazador en la corriente (ver figura 14) formando un gráfico en forma de campana.

A partir del momento en que inicia la inyección, existirá un punto en el cual la concentración de trazador en el canal natural o artificial comenzará a aumentar hasta un valor máximo, luego del cual comenzará a decrecer hasta recuperar su condición de concentración inicial. Los valores de concentraciones medidos en el tiempo serán los valores de concentración C_2 , es decir la concentración luego de la longitud de mezcla.

Para calcular el caudal circulante (Q) se parte de la determinación del peso de trazador vertido en la corriente, calculando el área bajo la curva de concentración *versus* tiempo; en el caso que no haya concentración existente (C_0) la ecuación de continuidad se plantea como:

$$V \cdot C_1 = P = \left[Q + \frac{V}{T} \right] \cdot \int_0^T C_2 dt$$

En donde:

V = volumen de solución vertido en la corriente.

C_1 = concentración de trazador en el volumen vertido.

P = peso del trazador vertido.

Q = caudal circulante en la corriente.

T = tiempo que abarca la campana que se forma en el gráfico de concentración *versus* tiempo (cuando comienza a aumentar la concentración, alcanza su valor máximo y vuelve a su valor de concentración inicial).

C_2 = valor de la concentración luego de la longitud de mezcla (este valor es variable como puede observarse en el gráfico con forma de campana).

En el caso que la corriente contenga una concentración inicial del trazador (C_0) la ecuación de continuidad se plantea de la siguiente forma:

$$V \cdot (C_1 - C_0) = P = \left[Q + \frac{V}{T} \right] \cdot \left[\int_0^T (C_2 - C_0) dt \right]$$

Si se toma la relación V/T como despreciable:

$$V \cdot (C_1 - C_0) = Q \cdot \left[\int_0^T (C_2 - C_0) dt \right]$$

Despejando el caudal se tiene:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\int_0^T (C_2 - C_0) dt}$$

Al tenerse mediciones de intervalos de tiempo regulares Δt la ecuación puede simplificarse:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\sum (C_2 - C_0) \cdot \Delta t}$$

Quedando finalmente como:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_0)}$$

En donde:

$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_0)$ = área entre la curva de concentración versus tiempo con forma de campana y la línea que representa la concentración natural de trazador existente.

Esta área también puede ser determinada por medio de trapecios, que fue el método empleado en las pruebas realizadas.

2. TOMA Y PROCESAMIENTO DE DATOS

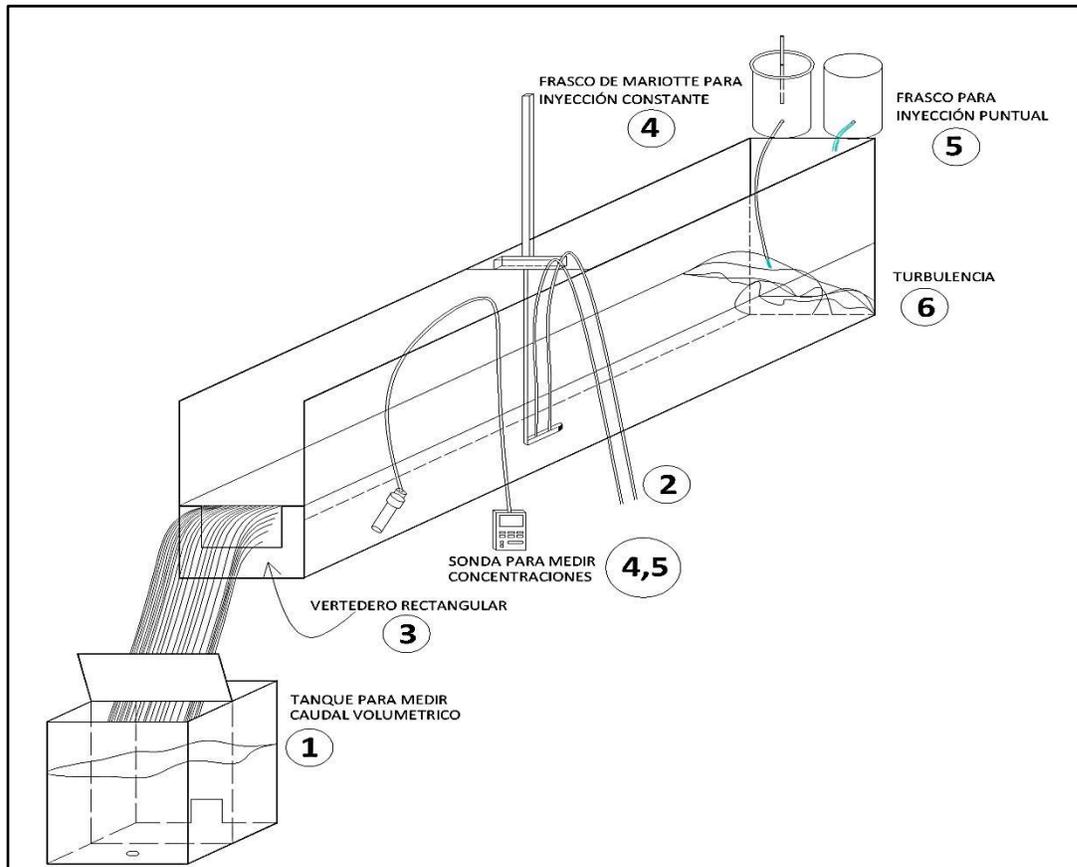
2.1. Procedimiento de toma de datos

Las mediciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Las pruebas llevadas a cabo fueron las siguientes (se adjuntan figuras esquemáticas de la disposición de los dispositivos en el canal).

Prueba 1 (ver figura 15):

- 1) Aforo volumétrico con cinco tomas de datos de volúmenes y tiempos.
- 2) Aforo por medio de mediciones con tubo de Prandtl en cinco secciones del canal.
- 3) Aforo con vertedero de sección rectangular.
- 4) Aforo con trazador por inyección constante, se realizaron cinco inyecciones.
- 5) Aforo con trazador por inyección o descarga puntual, se realizaron cinco descargas.
- 6) Se creó una pequeña turbulencia en el canal.

Figura 15. Prueba 1



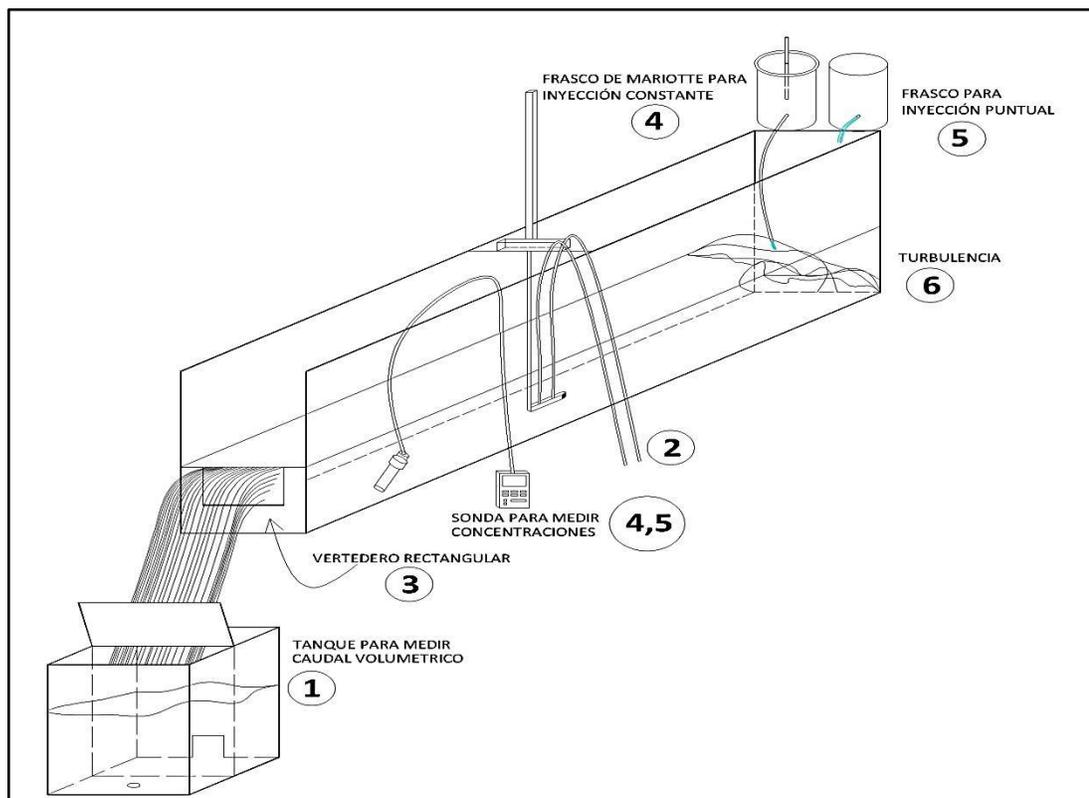
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Prueba 2 (ver figura 16):

- 1) Aforo volumétrico con cinco tomas de datos de volúmenes y tiempos.
- 2) Aforo por medio de mediciones con tubo de Prandtl en cinco secciones del canal.
- 3) Aforo con vertedero de sección rectangular.
- 4) Aforo con trazador por inyección constante, se realizaron cinco inyecciones.

- 5) Aforo con trazador por inyección o descarga puntual, se realizaron cinco descargas.
- 6) Se creó una pequeña turbulencia en el canal.

Figura 16. Prueba 2



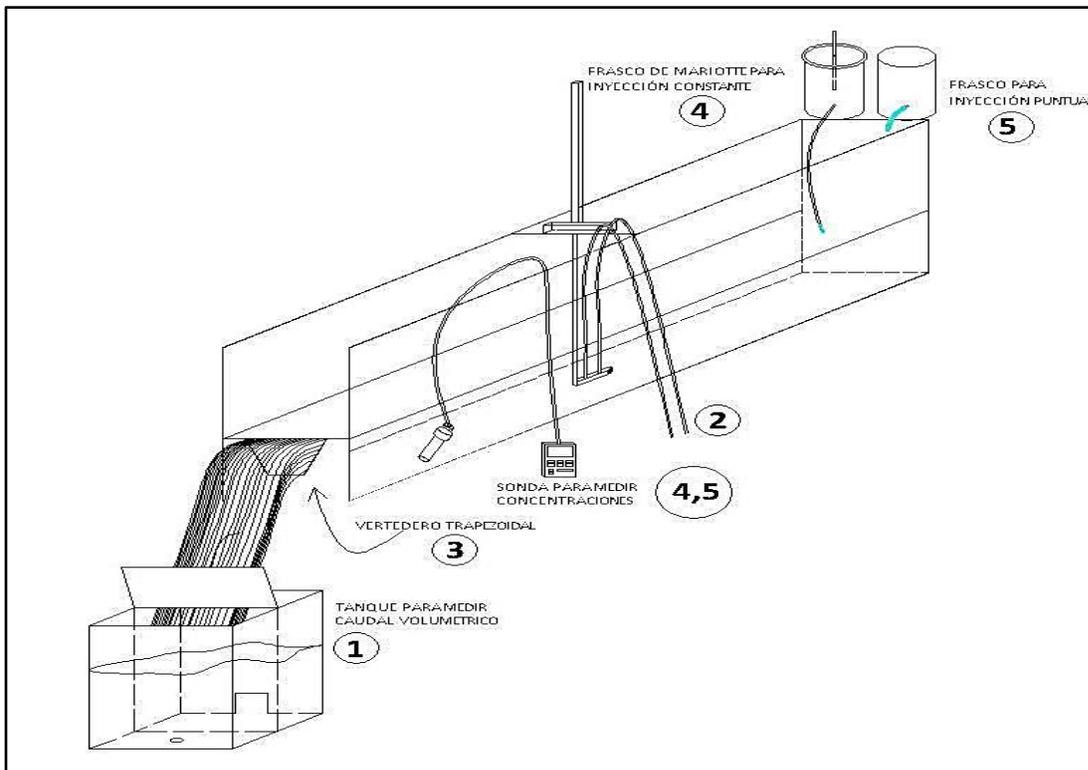
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Prueba 3 (ver figura 17):

- 1) Aforo volumétrico con cinco tomas de datos de volúmenes y tiempos.
- 2) Aforo por medio de mediciones con tubo de Prandtl en cinco secciones del canal.
- 3) Aforo por vertedero de sección trapezoidal.

- 4) Aforo con trazador por inyección constante, se realizaron cinco inyecciones.
- 5) Aforo con trazador por inyección o descarga puntual, se realizaron cinco descargas.
- 6) No se creó turbulencia en el canal.

Figura 17. Prueba 3



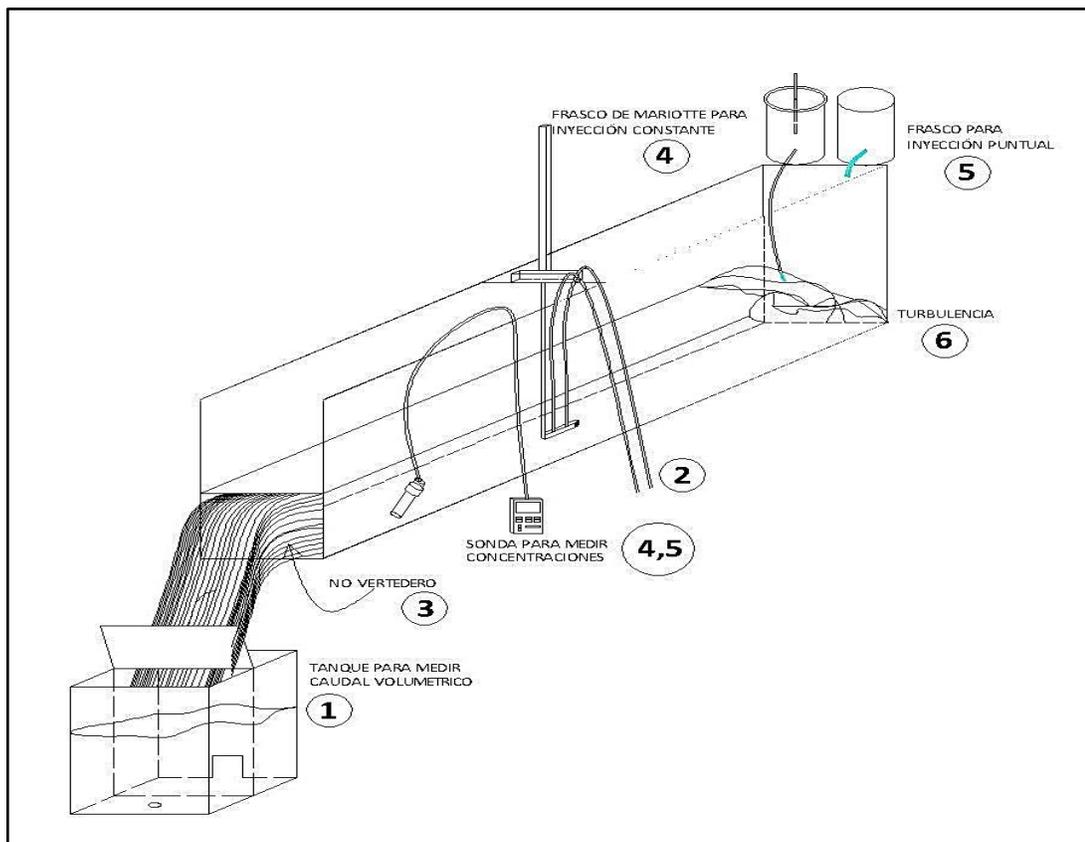
Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Prueba 4 (ver figura 18):

- 1) Aforo volumétrico con cinco tomas de datos de volúmenes y tiempos.

- 2) Aforo por medio de mediciones con tubo de Prandtl en cinco secciones del canal.
- 3) No se realizó aforo con vertedero.
- 4) Aforo con trazador por inyección constante, se realizaron cinco inyecciones.
- 5) Aforo con trazador por inyección o descarga puntual, se realizaron cinco descargas.
- 6) Se creó una turbulencia en el canal para realizar la inyección del trazador.

Figura 18. Prueba 4

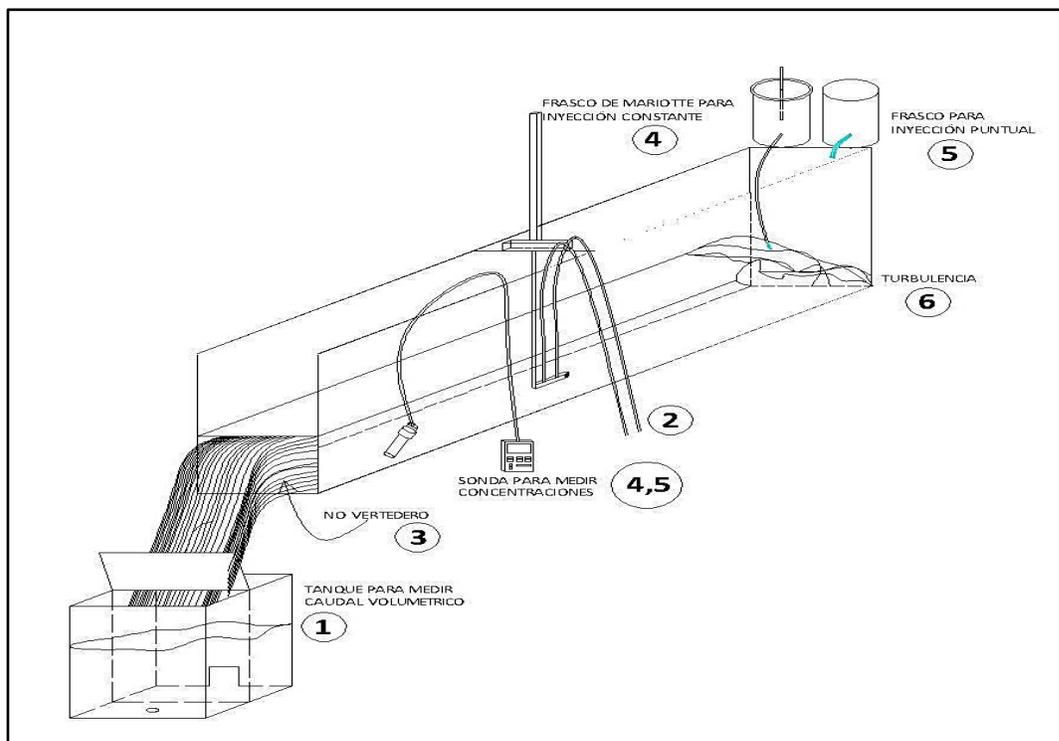


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Prueba 5 (ver figura 19):

- 1) Aforo volumétrico con cinco tomas de datos de volúmenes y tiempos.
- 2) Aforo por medio de mediciones con tubo de Prandtl en cinco secciones del canal.
- 3) No se realizó aforo con vertedero.
- 4) Aforo con trazador por inyección constante, se realizaron cinco inyecciones.
- 5) Aforo con trazador por inyección o descarga puntual, se realizaron cinco descargas.
- 6) Se creó turbulencia en el canal para realizar la inyección del trazador.

Figura 19. Prueba 5



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Se utiliza a continuación la prueba 3 como ejemplo de toma de datos para cada tipo de aforo, los datos obtenidos, valores y caudales calculados para cada prueba se adjuntan en las tablas y figuras del anexo 3.

Nota: las pruebas 4 y 5 fueron las primeras en llevarse a cabo para probar el equipo y establecer el procedimiento para las pruebas reales. Sin embargo, se decidió incluirlas para determinar si al llevar a cabo su análisis proveerían valores de caudales similares para los distintos métodos de aforo, con excepción del uso de vertederos los cuales no se incluyeron para ambos.

2.2. Aforo volumétrico

Para el aforo volumétrico se utilizó el tanque ubicado en el laboratorio (ver figura 20); el principio empleado fue el de medir el tiempo de llenado para diferentes volúmenes.

Figura 20. **Tanque para aforo volumétrico**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Es parte del encendido del equipo de laboratorio para hacer circular un caudal no determinado cuyo valor se planea encontrar (ver figura 21).

Figura 21. Puesta en marcha del equipo



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

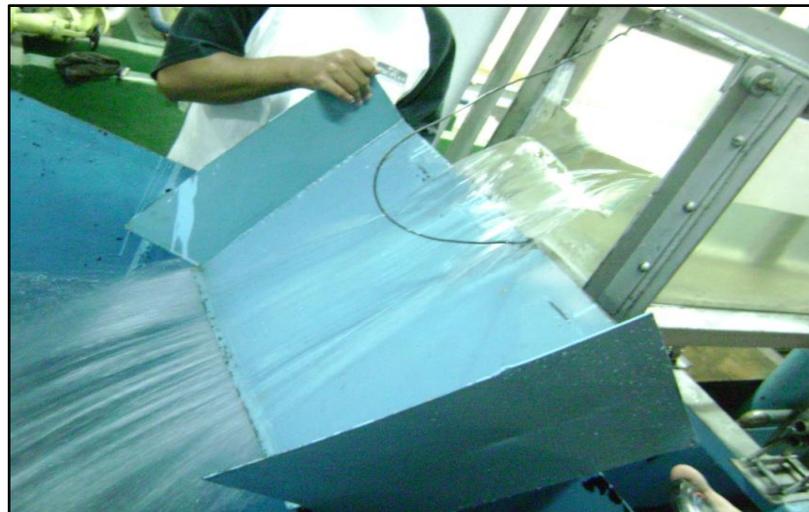
Se desvía el flujo del canal hacia el tanque con la ayuda de una compuerta ubicada en el mismo (ver figura 22).

Figura 22. **Compuerta para desviar flujo hacia el tanque**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Figura 23. **Inicio de toma de tiempo de llenado de tanque**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Al instante que el agua comienza a caer en el tanque (ver figura 23) un colaborador con ayuda de un cronómetro mide el tiempo que tarda esta en alcanzar una altura considerable, al alcanzarse dicha altura se mueve la compuerta para que el agua deje de caer dentro del tanque y se detiene el cronómetro, se anota entonces el tiempo transcurrido o de llenado.

Se esperan de tres a cinco minutos para que se estabilice el agua en el tanque, luego se toma la lectura del piezómetro ubicado en el exterior (ver figura 24) y se anota la altura observada en centímetros.

Figura 24. **Piezómetro lateral del tanque para determinación de volumen de agua contenido**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Utilizando la tabla proporcionada en el área de hidráulica (ver tabla 5.18 del apéndice 5), se determina el volumen dependiendo de la altura tomada. La tabla I muestra los datos de tiempos y volúmenes obtenidos para la prueba 3.

Tabla I. **Datos obtenidos con aforo volumétrico para la prueba 3**

Aforo volumétrico	Tiempo (s)	Volumen (l)
3.1	43,05	496,70
3.2	45,00	516,40
3.3	43,63	504,20
3.4	42,33	492,20
3.5	42,99	493,70

Fuente: elaboración propia.

2.3. Aforo por vertedero

Utilizando dos tipos de vertederos de pared delgada, de sección rectangular y de sección trapezoidal (ver figuras 25 a 29), se determinó el caudal con sus ecuaciones de descarga, dichas ecuaciones fueron proporcionadas en el Laboratorio de Hidráulica ya que se calibraron en la tesis *Medidores de flujo en canales abiertos* de Manuel Agustín Lux Monroy.

Para el vertedero rectangular la ecuación de descarga era:

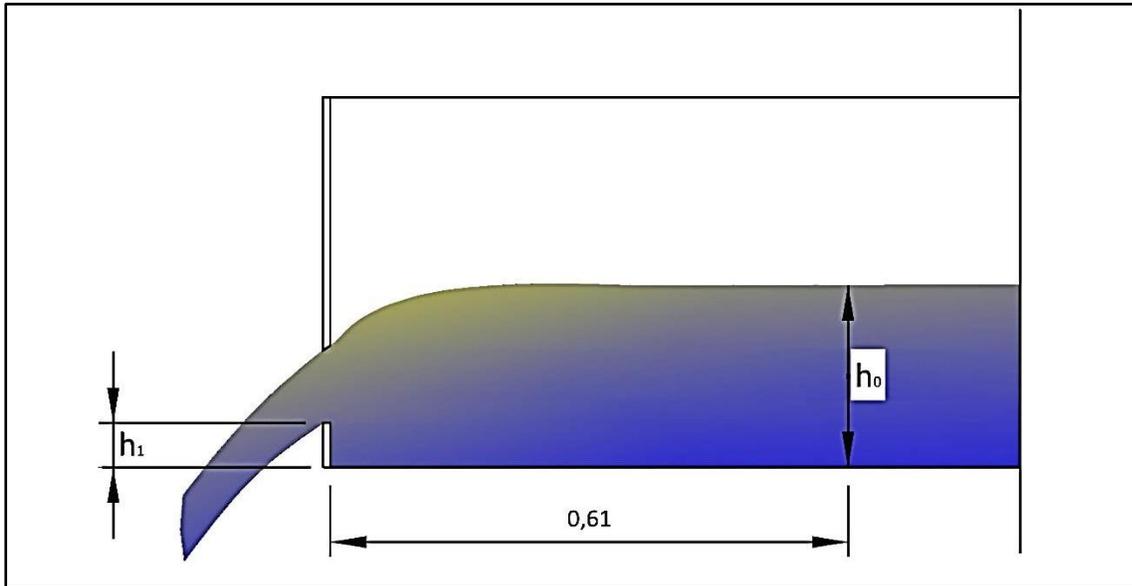
$$Q = 0,306 * H^{1,659}$$

En donde:

H = diferencial de altura ($h_0 - h_1$) en centímetros

Q = caudal en litros/segundo

Figura 25. **Vertedero rectangular**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 26. **Vertedero rectangular en el laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Para el vertedero trapezoidal el caudal se determinó como:

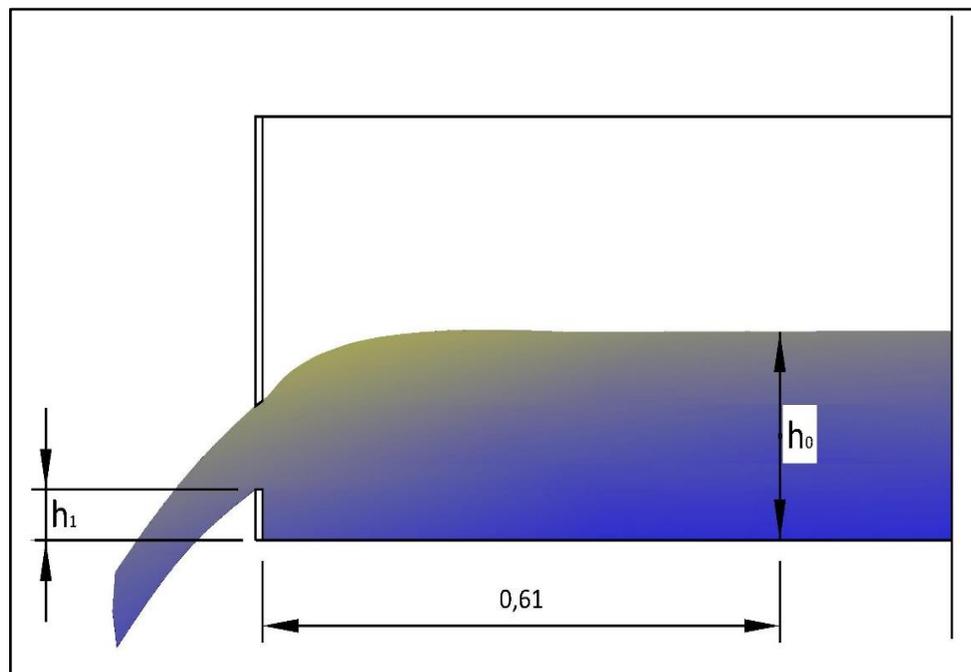
$$Q = 0,217 * H^{1,745}$$

En donde:

H = diferencial de altura ($h_0 - h_1$) en centímetros

Q = caudal en litros/segundo

Figura 27. **Vertedero trapezoidal**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Figura 28. **Vertedero trapezoidal en el laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

La altura h_0 se midió a 61 centímetros del sitio donde se ubicaba el vertedero, tanto para el vertedero de sección rectangular como para el de sección trapezoidal.

Para el vertedero rectangular y trapezoidal se utilizaron adicionalmente otras ecuaciones obtenidas en el trabajo de graduación con el título *Medidores de flujo en canales abiertos* de Manuel Agustín Lux Monroy las cuales son:

Para vertedero rectangular:

$$Q = (1,197) * (0,0184) * (L - 0,2*H) * H^{3/2}$$

Para vertedero trapezoidal:

$$Q = (1,268) * (0,01859) * L * H^{3/2}$$

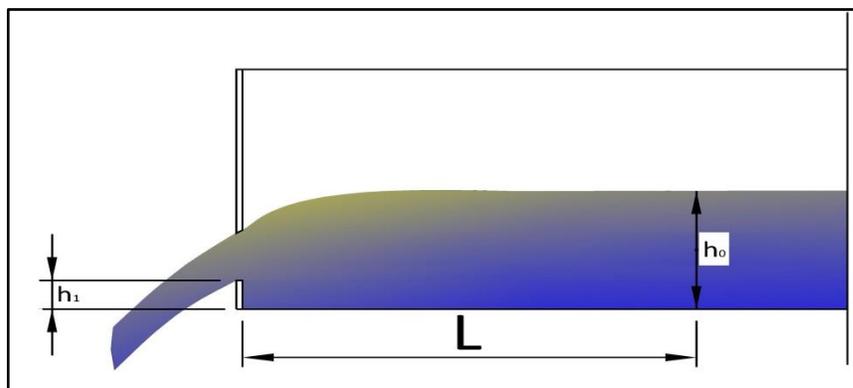
En donde:

H = diferencial de altura ($h_0 - h_1$) en centímetros

L = longitud de la solera del vertedero en m (figura 29)

Q = caudal en litros/segundo

Figura 29. Longitud de la solera del vertedero



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Para el caso de la prueba 3 se utilizó el vertedero de sección trapezoidal, para el cual se obtuvieron las mediciones mostradas en la tabla II.

Tabla II. Datos obtenidos para aforo con vertedero trapezoidal para la prueba 3

	Valor medido (cm)
h_0	20,3
h_1	10,2
L	17,3

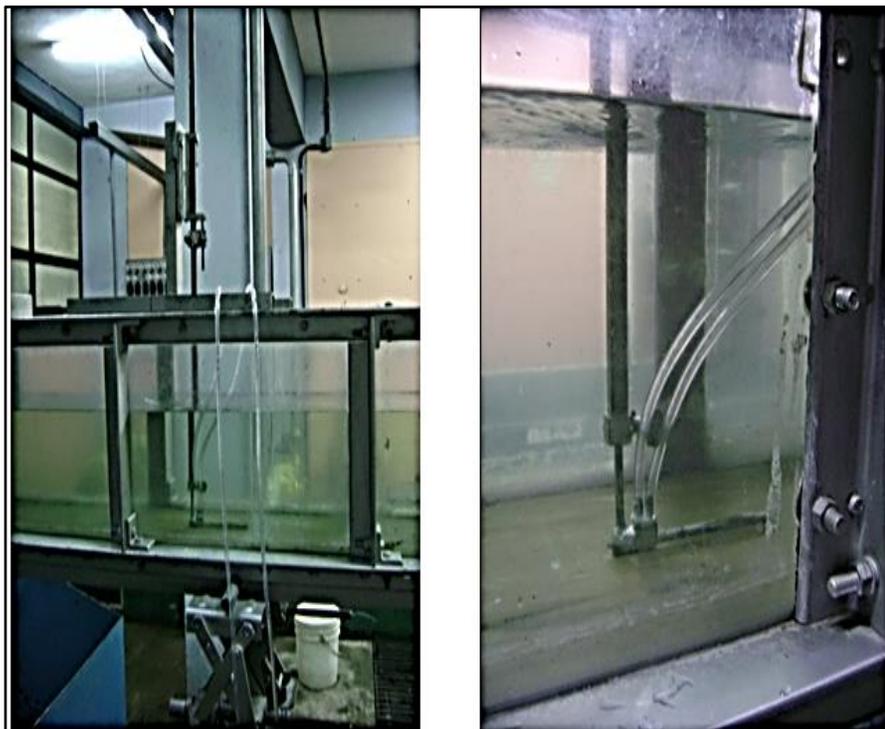
Fuente: elaboración propia.

Nótese que también se determinó el valor L para la ecuación de descarga alterna del vertedero.

2.4. Aforo por medición de velocidades puntuales con el tubo de Prandtl

Se utilizó el tubo de Prandtl del laboratorio de hidráulica, este dispositivo tiene la capacidad de variar su altura para calcular velocidades puntuales a diferentes profundidades a la mitad del canal (ver figura 30).

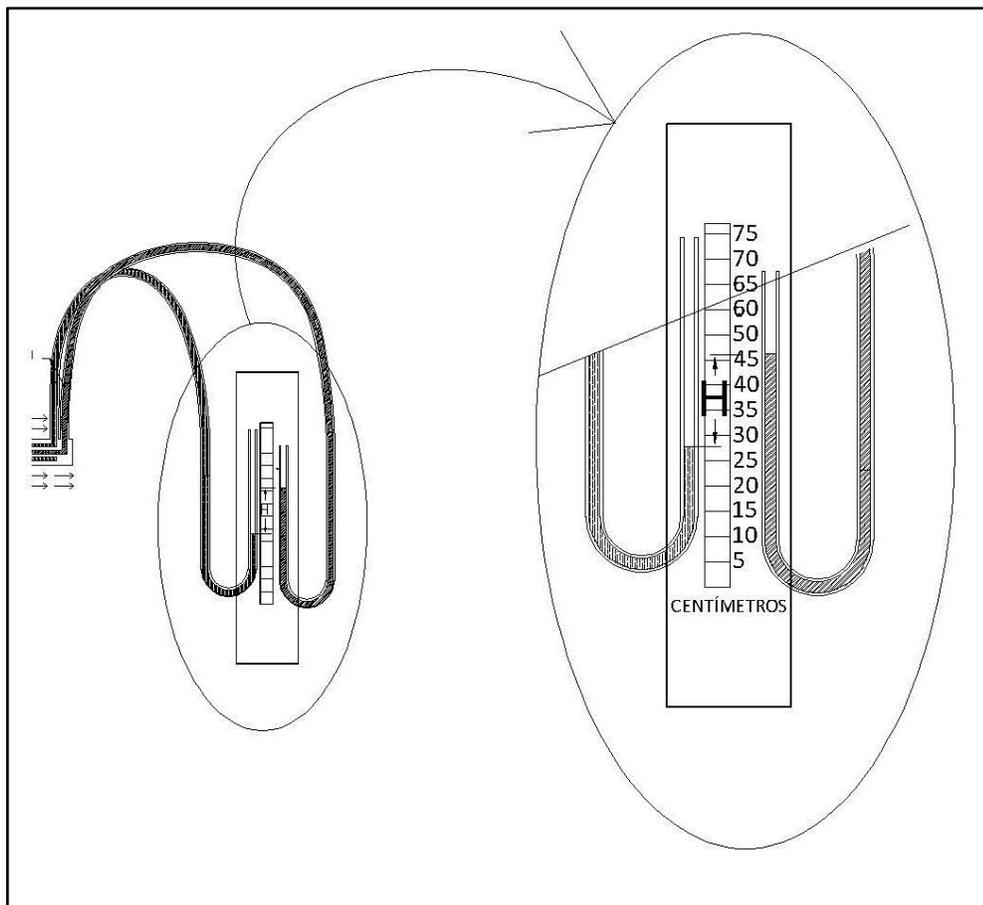
Figura 30. Tubo de Prandtl



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

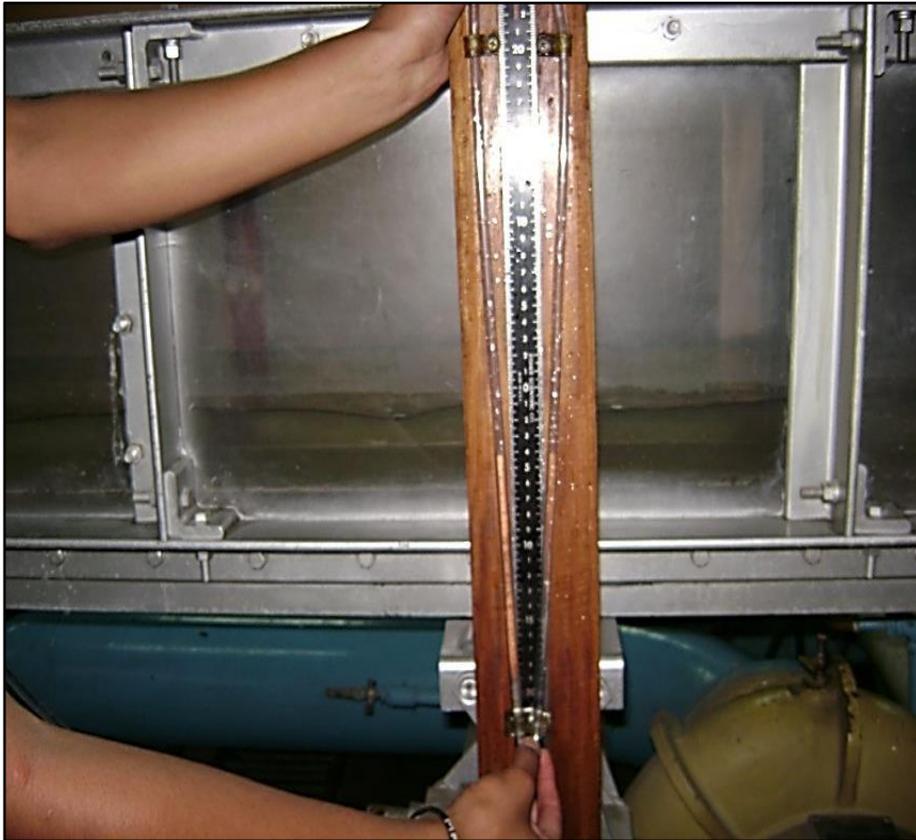
Se procedió colocando el dispositivo a una profundidad cercana al fondo del canal y por medio del manómetro diferencial se determinó la diferencia de alturas (Δh en centímetros, ver figuras 31 y 32), diferencia que luego fue ingresada a la ecuación $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$ para determinar el valor de la velocidad puntual, donde g es el valor de la aceleración de la gravedad (981 cm/s^2) y la velocidad se encuentra en centímetros/segundos.

Figura 31. **Diferencia de alturas para el tubo de Prandtl**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

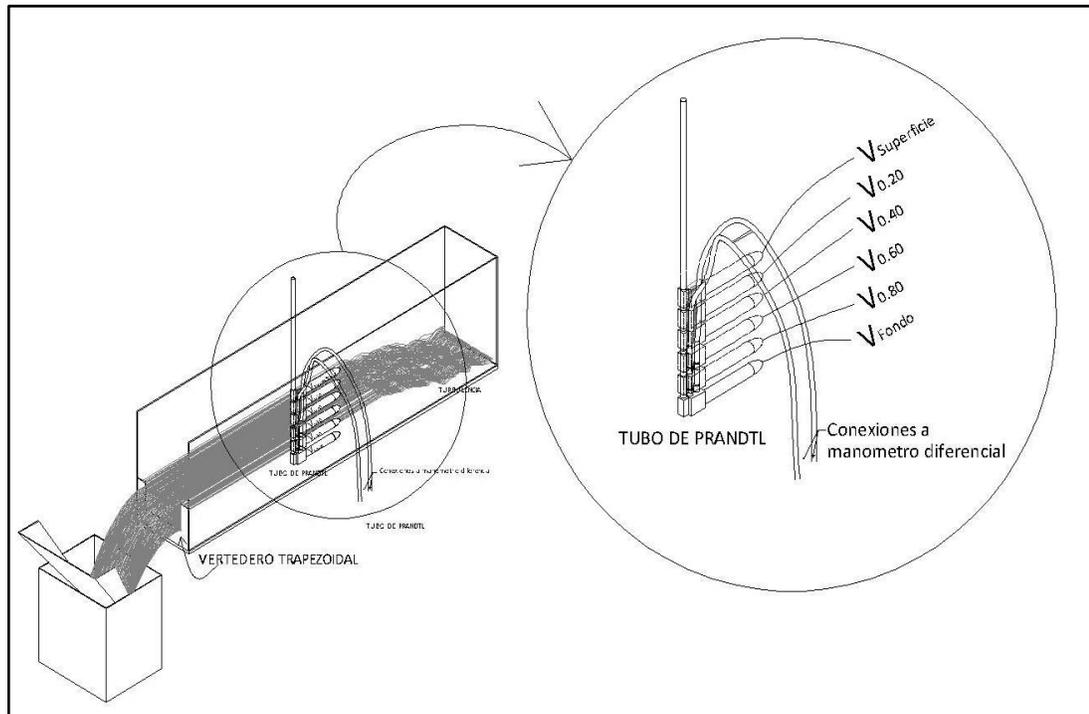
Figura 32. **Diferencia de alturas para el tubo de Prandtl en el laboratorio**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Luego se varió la altura del tubo de Prandtl a profundidades de 0,8, 0,6, 0,4, y 0,2 del tirante medido de la superficie del agua al fondo del canal y una medida cercana a la superficie anotándose los valores Δh correspondientes (ver figura 33).

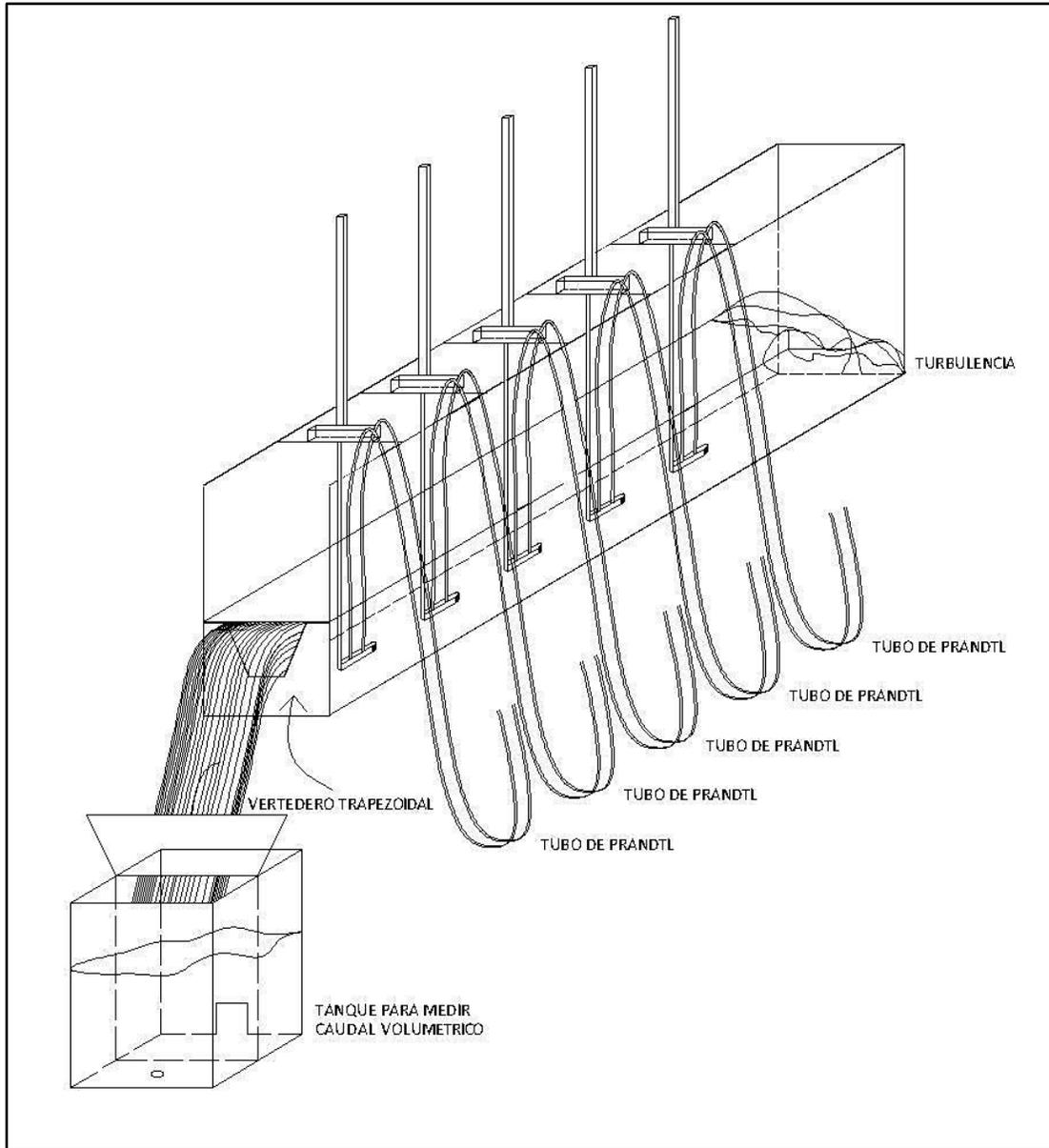
Figura 33. Toma de velocidades puntuales con tubo de Prandtl



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Esto se realizó para cinco diferentes secciones cada una a diferente distancia (ver figura 34). Se anotaron también los valores del ancho del canal y la distancia del fondo a la superficie del agua (tirante) para cada toma de datos. Para el caso de la primera toma de velocidades de la prueba 3 se tuvieron los valores de ancho del canal, tirante y diferencias de altura " Δh " mostrados en la tabla III.

Figura 34. Toma de velocidades puntuales con tubo de Prandtl a diferentes distancias



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Tabla III. **Valores de parámetros obtenidos para prueba 3.1 con tubo de Prandtl**

B (ancho del canal)	30 cm
H (tirante)	20,3 cm
Ubicación del tubo de Prandtl	
Diferencia de alturas, Δh (cm)	
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,5
0,2·H = 4,06 cm	0,7
0,4·H = 8,12 cm	0,6
0,6·H = 12,18 cm	0,6
0,8·H = 16,24 cm	0,5
Cercano al fondo del canal $\approx 20,3$ cm	0,4

Fuente: elaboración propia.

Como puede observarse la menor diferencia de alturas se encuentra cercana al fondo del canal y aumenta conforme se sube hacia la superficie, por lo que puede inferirse que las velocidades tendrán un comportamiento proporcional a las mismas y que las curvas de velocidad serán como se describen teóricamente.

2.5. Aforo por trazador

Para el aforo por medio de trazador se realizó la inyección constante y la inyección puntual.

2.5.1. Aforo por inyección constante

Para el caso de la inyección constante se utilizó un frasco Mariotte fabricado artesanalmente (ver figura 35), el cual fue aforado para obtener el valor del caudal de inyección (q). Puede notarse que se le agregó una manguera a la salida del frasco para proveer una inyección más cercana a la superficie del agua circulante en el canal.

Figura 35. Frasco Mariotte

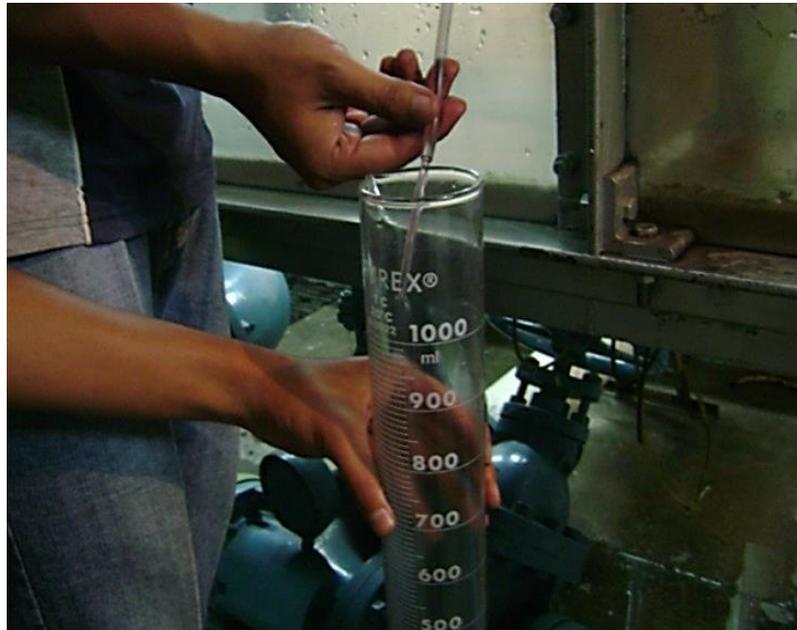


Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Para determinar el caudal inyectado (q) se tomaron cinco mediciones del tiempo que tardaba el frasco en llenar un volumen de 1 litro (ver figuras 36 y 37 y tabla IV) para cada prueba de inyección constante. En este caso no se utilizó el trazador sino agua que circulaba por el sistema, ya que el objetivo era conocer el caudal inyectado.

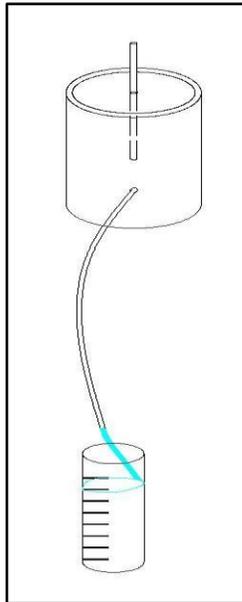
Para aforar el frasco, este se colocó en el sitio donde se dispondría para realizar la inyección, ya que la velocidad de salida del agua del frasco es función de la altura y dicha altura debía ser la misma que al momento de estar realizando la inyección.

Figura 36. **Aforo del frasco Mariotte para determinar el valor del caudal inyectado “q”**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Figura 37. **Esquema del aforo del frasco Mariotte para determinar el valor del caudal inyectado “q”**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Tabla IV. **Datos para aforo del frasco Mariotte**

Tiempo (s)	Volumen (l)
45,96	1,00
46,16	1,00
46,54	1,00
47,04	1,00
47,70	1,00

Fuente: elaboración propia.

Aforado el frasco Mariotte se vació para que quedara dispuesto para ser llenado con la mezcla de trazador. Se procedió a realizar la mezcla de agua

con sal (ver figura 38) o salmuera a utilizar como trazador en un recipiente (ver figura 39).

Figura 38. **Sal común a mezclar con el agua para utilizar como trazador**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

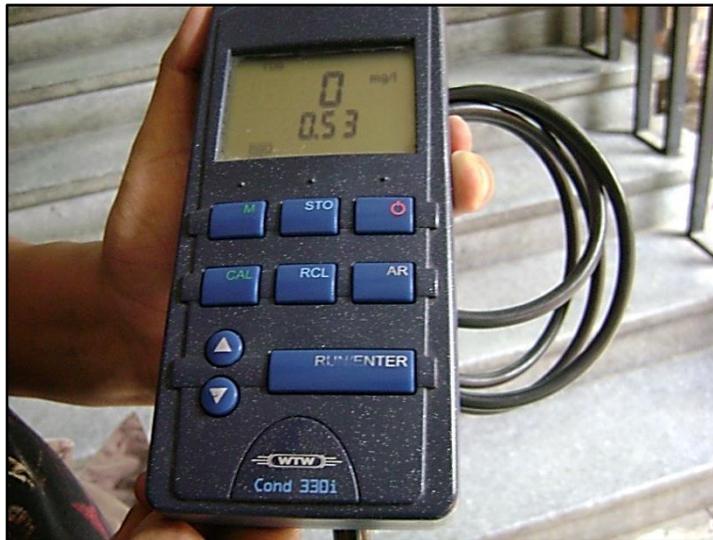
Figura 39. **Recipiente para realizar mezcla de agua con sal (salmuera)**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Con ayuda de una sonda, conductímetro portátil marca COND 330i WTW con una exactitud de conductividad de +/- 0,5 % de valor medido; en la modalidad para medir concentraciones de sólidos disueltos totales (SST por sus siglas en inglés, ver figura 40) en miligramos/litro se agregó sal al agua y se mezcló hasta que el valor de la concentración en la salmuera (C_1) a utilizar como trazador alcanzase un valor cercano a los 2 000 miligramos/litro.

Figura 40. **Sonda para medir concentraciones**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Se midió adicionalmente el valor de concentración natural en el agua circulante en el canal (C_0) en el punto donde se tomarían datos de concentración al realizarse la inyección constante; la tabla V muestra los valores de concentraciones medidos para la primer inyección constante (prueba constante 3.1) de trazador para la prueba 3.

Tabla V. **Valores de concentraciones para prueba constante 3.1**

	Concentración (mg/l)	
C_1	1 937	Concentración de sólidos disueltos totales en la mezcla de salmuera utilizada como trazador.
C_0	184	Concentración de sólidos disueltos totales existente en el canal antes de inyección.

Fuente: elaboración propia.

Se llenó el frasco Mariotte con la mezcla de trazador y se dispuso en el punto del canal donde se ubica la compuerta para regular el flujo (ver figura 41). Como una manera de asegurar la fiabilidad de los datos se tomó el valor de la concentración C_1 en el recipiente donde se realizó la mezcla y también cuando el trazador estaba dentro del frasco Mariotte, el valor proporcionado en las diferentes pruebas y tablas corresponde al medido en el frasco.

Figura 41. **Disposición del frasco Mariotte para inyección constante**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

En algunos casos se creó una turbulencia en el punto de inyección para favorecer la mezcla del trazador con el agua circulante en el canal (ver figura 42), especialmente en las pruebas en las que no se utilizó vertedero. Para el caso de la prueba 3 dicha turbulencia no se provocó para ver su efecto en la medición del caudal.

Figura 42. **Turbulencia en canal en el punto de inyección del trazador**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

Se utilizaron dos cronómetros (ver figura 43), uno para controlar el tiempo de duración de la inyección y que era activado al mismo tiempo que la inyección comenzaba y era detenido al cerrar el dispositivo para dejar de inyectar trazador, este tiempo de abertura y cierre para la inyección con el frasco Mariotte se estableció en un minuto y treinta segundos (noventa segundos) para todos los aforos a inyección constante.

Figura 43. **Cronómetro**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería.

El segundo cronómetro se activaba al mismo tiempo que comenzaba la inyección y se utilizaba para medir y anotar a cada cinco segundos la concentración observada por medio de la sonda, teniéndose entonces parejas de datos de intervalos de tiempo a cada cinco segundos y de concentración en el punto de medición en miligramos/litro. La tabla VI muestra los datos del comportamiento de la concentración anotados para la primera inyección constante (prueba constante 3.1) de la prueba 3, en total para cada prueba de inyección constante se realizaron cinco inyecciones de trazador.

Tabla VI. Datos tomados para prueba de inyección constante 3.1

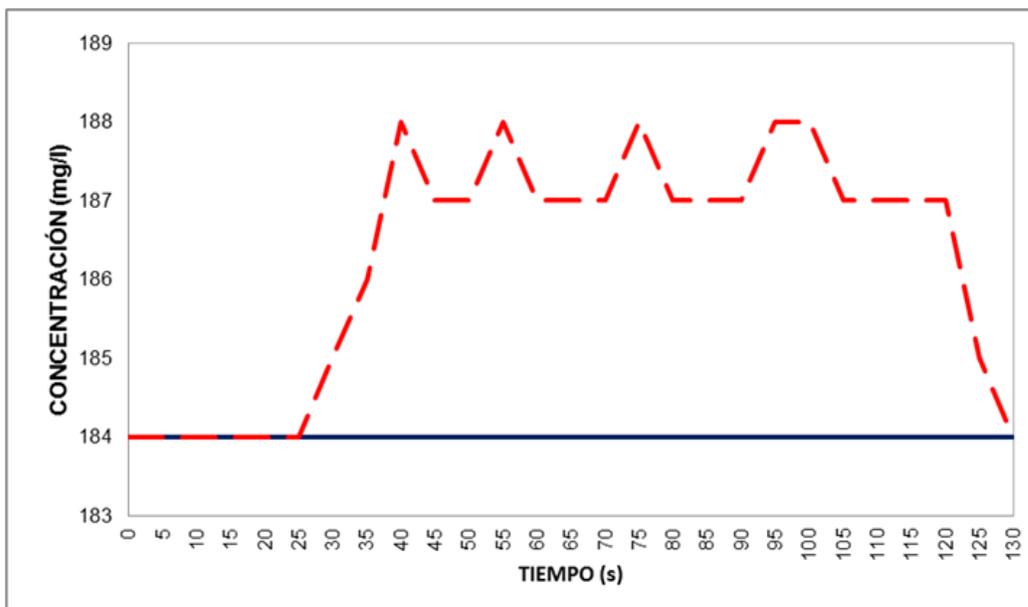
$C_0 =$	184	mg/l
$C_1 =$	1 937	mg/l

Tiempo (s)	Concentración natural en el canal, C_0 (mg/l)	Concentración C_2 (mg/l)
0 (inicio de la inyección)	184	184
5	184	184
10	184	184
15	184	184
20	184	184
25	184	184
30	184	185
35	184	186
40	184	188
45	184	187
50	184	187
55	184	188
60	184	187
65	184	187
70	184	187
75	184	188
80	184	187
85	184	187
90 (fin de la inyección)	184	187
95	184	188
100	184	188
105	184	187
110	184	187
115	184	187
120	184	187
125	184	185
130	184	184

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la prueba 3 y específicamente la prueba constante 3.1, puede observarse en la tabla VI que la concentración (C_2) no comienza a variar en el instante que comienza la inyección, sino a los 30 segundos y no decae al momento de detenerla, motivo por el cual se tomaron tiempos y concentraciones hasta que el valor de la concentración volviese a su valor original (C_0) o cercano (en este caso hasta los 130 segundos o dos minutos y treinta segundos). La figura 44 muestra un gráfico del comportamiento de la concentración medida (C_2 , línea discontinua) respecto a la concentración natural (C_0 , línea continua).

Figura 44. **Comportamiento de la concentración para prueba constante 3.1**



Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Aforo por inyección puntual

La disposición del equipo para este tipo de aforo fue básicamente la misma que para la inyección a caudal constante, con la diferencia que para la inyección puntual se removió la tapa hermética del dispositivo o frasco Mariotte junto con la llave de paso y la manguera por lo que el caudal inyectado no fue constante, dejando un recipiente con un único orificio (ver figura 45), se midió adicionalmente el volumen a inyectar (V) el cual se determinó era de 12 litros para las pruebas 1, 2, 3 y 5. Este volumen inyectado varió para la prueba 4.

Figura 45. **Frasco para inyección puntual**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Se preparó la mezcla a utilizar como trazador de igual forma que para la inyección puntual. Se midió el valor de la concentración de sólidos disueltos totales en el trazador (C_1) cuando este se encontraba dentro del frasco Mariotte, y el valor de concentración natural en el agua circulante en el canal (C_0) en el punto donde se tomarían datos de concentración al realizarse la inyección

puntual; la tabla VII muestra los valores de concentraciones medidos para la primer inyección puntual (prueba puntual 3.1) de trazador para la prueba 3.

Tabla VII. **Valores de concentraciones para prueba puntual 3.1**

	Concentración (mg/l)	
C_1	1 691	Concentración de sólidos disueltos totales en la mezcla de salmuera utilizada como trazador.
C_0	187	Concentración de sólidos disueltos totales existente en el canal antes de inyección.

Fuente: elaboración propia.

Para la inyección o descarga puntual se utilizó solo un cronómetro, el que sirvió para medir y anotar a cada cinco segundos el valor de la concentración C_2 observado por medio de la sonda, el cronómetro se activó al momento de destapar el orificio para la descarga puntual, y se dejaron de tomar tiempos cuando la concentración en el agua circulante en el canal volvió a su valor original (C_0) o cercano. La tabla VIII muestra los valores de concentración obtenidos para la prueba puntual 3.1, es decir la primera descarga puntual realizada para la prueba 3.

Tabla VIII. Datos tomados para prueba de inyección puntual 3.1

$C_0 =$	187	mg/l
$C_1 =$	1 691	mg/l

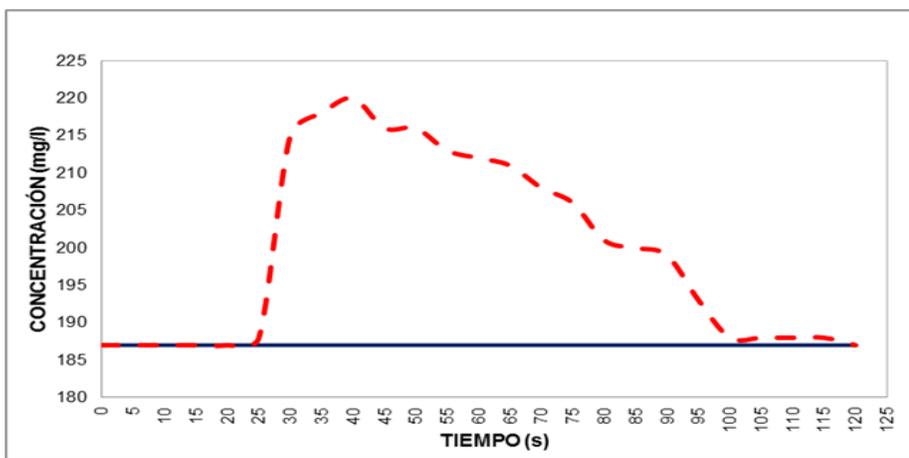
Tiempo (s)	Concentración natural en el canal, C_0 (mg/l)	Concentración C_2 (mg/l)
0 (inicio de la inyección)	187	187
5	187	187
10	187	187
15	187	187
20	187	187
25	187	188
30	187	215
35	187	218
40	187	220
45	187	216
50	187	216
55	187	213
60	187	212
65	187	211
70	187	208
75	187	206
80	187	201
85	187	200
90	187	199
95	187	193
100	187	188
105	187	188
110	187	188
115	187	188
120	187	187

Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la inyección constante, la concentración en el canal no varía en el instante del inicio de la inyección sino tiempo después, en este caso a los 25 segundos, segundos después alcanza un valor máximo y comienza a decrecer hasta el punto en el cual vuelve a su concentración original como se

muestra en la figura 46. La línea discontinua representa los valores de concentración medidos (C_2) y la línea continua representa el valor de concentración natural u original previo a la inyección (C_0).

Figura 46. **Comportamiento de la concentración para prueba puntual 3.1**



Fuente: elaboración propia.

En otras pruebas de inyección puntual realizadas el comportamiento de la concentración no decreció de igual forma que para el ejemplo mostrado, el valor osciló entre máximos y mínimos locales hasta regresar a su valor original o cercano (ver anexos 2, 3 y 4).

2.6. **Procesamiento de datos y determinación de caudales por los diferentes métodos**

A continuación se muestra el procesamiento de datos para la determinación de caudales utilizando como ejemplo la prueba 3 (ver anexo 3).

2.6.1. Aforo volumétrico

Para el aforo volumétrico, como se mostró en el apartado de toma de datos, se obtuvieron cinco parejas de datos de tiempos de llenado y volúmenes, estos se utilizaron para determinar cinco valores de caudal por medio de la relación:

$$Q = V/t$$

En donde:

V = volumen medido en litros

t = tiempo de llenado

Q = caudal en litros/segundo

Posteriormente se calculó el valor de caudal promedio para el aforo volumétrico:

$$Q_{vol_prom} = \frac{Q_{vol1} + Q_{vol2} + Q_{vol3} + Q_{vol4} + Q_{vol5}}{5}$$

Los valores obtenidos para los caudales individuales y el caudal promedio se muestran en la tabla IX.

Tabla IX. **Caudales obtenidos con aforo volumétrico para la prueba 3**

Aforo volumétrico	Tiempo (s)	Volumen (l)	Q (l/s)
3.1	43,05	496,70	11,538
3.2	45,00	516,40	11,476
3.3	43,63	504,20	11,556
3.4	42,33	492,20	11,628
3.5	42,99	493,70	11,484

$$Q_{vol\ prom} = 11,536$$

Fuente: elaboración propia.

Por lo que en promedio el valor del caudal medido por medio del aforo volumétrico es de 11,536 litros/segundo para la prueba 3.

2.6.2. Aforo por vertedero

Para la prueba 3 se utilizó el vertedero de sección trapezoidal. Obtenidos los datos correspondientes a las alturas h_1 y h_0 , se calculó H y se ingresó su valor a la ecuación de descarga del vertedero proporcionada obteniendo los datos mostrados en la tabla X.

Tabla X. **Caudal obtenido con aforo por vertedero de pared trapezoidal para la prueba 3**

	Valor medido (cm)		Q (l/s)
h_0	20,3	$Q = 0,217 \cdot H^{1.745}$	12,274
h_1	10,2		
$H = h_0 - h_1$	10,1		

Fuente: elaboración propia.

Utilizando la ecuación alterna se obtuvieron los datos proporcionados en la tabla XI.

Tabla XI. **Caudal obtenido con aforo por vertedero de pared trapezoidal para la prueba 3 con ecuación alterna**

	Valor medido (cm)		Q (l/s)
h₀	20,3	$Q = (1\ 268) * (0,01859) * L * H^{3/2}$	13,090
h₁	10,2		
L	17,3		
H = h₀ - h₁	10,1		

Fuente: elaboración propia.

Si se calcula el valor de caudal promedio:

$$Q_{\text{vert_trap_prom}} = (12,274 + 13,090)/2 = 12,682 \text{ l/s}$$

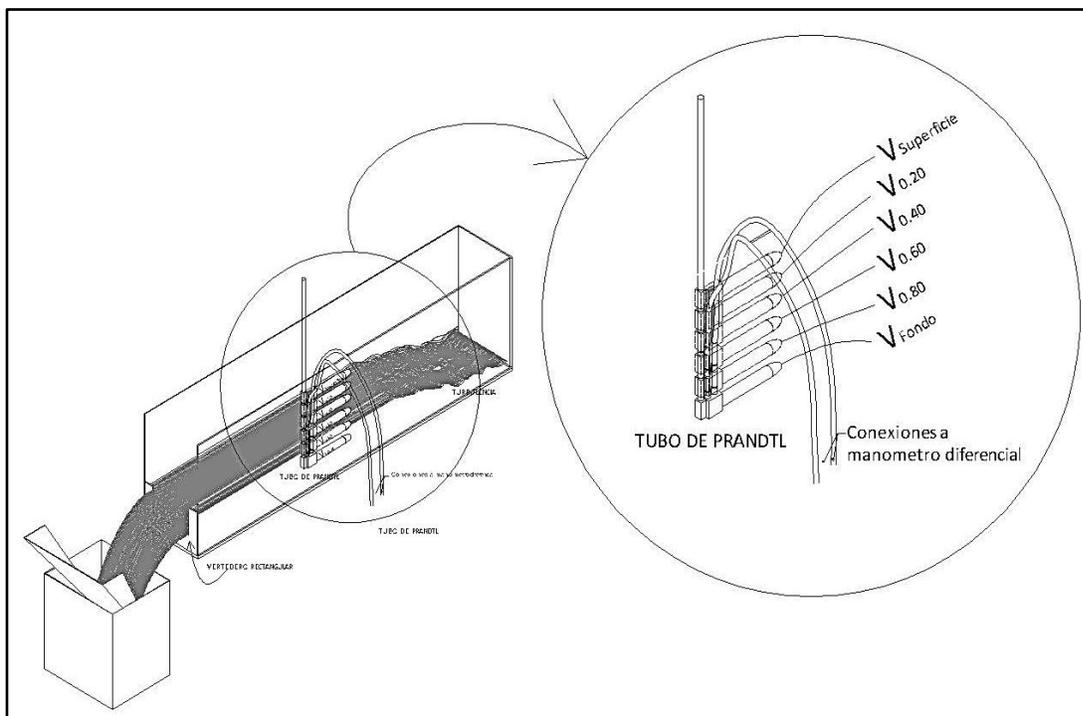
Por lo tanto el valor de caudal promedio con vertedero trapezoidal para la prueba 3 es de 12,682 litros/segundo.

2.6.3. Aforo por medio de medición de velocidades con tubo de Prandtl

Se muestran los resultados obtenidos por medio del procesamiento de los datos de diferencias de altura, medidas con el tubo de Prandtl para la sección 3.1 del canal para la prueba 3. Como se explica en el apartado de toma de datos, se obtuvieron series de datos de profundidades de ubicación del tubo de Prandtl y sus diferencias de altura (Δh) correspondientes en el manómetro

diferencial; estas diferencias se ingresaron en la ecuación $v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ para obtener el valor de la velocidad puntual (en centímetros/segundo) a cada profundidad (ver figura 47).

Figura 47. **Esquema de velocidades puntuales obtenidas al procesar los datos del tubo de Prandtl**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Las velocidades puntuales para la sección 3.1 se calcularon de la siguiente forma:

$$v_{superficie} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,5 \text{ cm})} = 31,32 \text{ cm/s}$$

$$v_{0,2} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,7 \text{ cm})} = 37,06 \text{ cm/s}$$

$$v_{0,4} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,6 \text{ cm})} = 34,31 \text{ cm/s}$$

$$v_{0,6} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,6 \text{ cm})} = 34,31 \text{ cm/s}$$

$$v_{0,8} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,5 \text{ cm})} = 31,32 \text{ cm/s}$$

$$v_{fondo} = \sqrt{2g \cdot \Delta h} = \sqrt{2 * (981 \text{ cm/s}^2) * (0,4 \text{ cm})} = 28,01 \text{ cm/s}$$

Como puede observarse la velocidad aumenta conforme el dispositivo se aleja del fondo del canal. Por medio de la siguiente ecuación se determinó la velocidad media correspondiente:

$$\bar{v} = v_{superficie} + 2 \cdot v_{0,2} + 2 \cdot v_{0,4} + 2 \cdot v_{0,6} + 2 \cdot v_{0,8} + v_{fondo}$$

$$\bar{v} = 31,32 + 2 * (37,06) + 2 * (34,31) + 2 * (34,31) + 2 * (31,32) + 28,01$$

Siendo la velocidad media:

$$\bar{v} = 33,33 \text{ cm/s}$$

Dado que se tienen el ancho (B) y el tirante (H) del canal para esta sección, se puede encontrar el área transversal del flujo en el canal:

$$A = BH = (30 \text{ cm})(20,3 \text{ cm}) = 609 \text{ cm}^2$$

Multiplicando la velocidad media por el área se obtiene entonces el valor del caudal circulante:

$$Q = (33,33 \text{ cm/s})(609 \text{ cm}^2) = 20,300 \text{ cm}^3/\text{s}$$

Que transformado a litros es un valor de caudal de 20,300 l/s, el cual es el valor del caudal circulante obtenido para la sección 3.1. La tabla XII muestra el resumen de datos medidos y procesados anteriormente.

Tabla XII. **Determinación de caudal con datos de tubo de Prandtl para sección 3.1 para prueba 3**

B (ancho del canal)	30 cm
H (tirante)	20,3 cm
Área de la sección = B·H	609 cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,5	31,32
0,2·H = 4,06 cm	0,7	37,06
0,4·H = 8,12 cm	0,6	34,31
0,6·H = 12,18 cm	0,6	34,31
0,8·H = 16,24 cm	0,5	31,32
Cercano al fondo del canal ≈ 20,3 cm	0,4	28,01

\bar{v} (cm/s)	33,33
Q (l/s)	20,300

Fuente: elaboración propia.

Este procedimiento se llevó a cabo para cuatro secciones más a lo largo del canal para las cuales se obtuvieron los caudales mostrados en la tabla XIII y con los cuales se calculó un valor promedio.

Tabla XIII. **Valores de caudales con medición de velocidades con tubo de Prandtl para diferentes secciones del canal para prueba 3**

Sección del canal	Q (l/s)
3.1	20,300
3.2	18,382
3.3	19,516
3.4	20,119
3.5	19,443
Q_{Prandtl_prom}	19,552

Fuente: elaboración propia.

El caudal por medio de determinación de velocidades puntuales con tubo de Prandtl para la prueba 3 tuvo un valor promedio de 19,552 l/s.

2.6.4. Aforo por inyección constante

Como se explicó en el apartado de toma de datos, se aforó el frasco Mariotte para determinar el valor del caudal inyectado (q), obteniéndose una serie de cinco valores de tiempo para un mismo volumen aforado (1 litro); este volumen se dividió entre los tiempos para determinar cinco caudales en litros por segundo. Para el caso de la primer inyección constante, inyección constante 3.1 de la prueba 3 se obtuvieron:

$$q_{iny1} = (1,00 \text{ l}) / (45,96 \text{ s}) = 0,0218 \text{ l/s}$$

$$q_{iny2} = (1,00 \text{ l}) / (46,16 \text{ s}) = 0,0217 \text{ l/s}$$

$$q_{iny3} = (1,00 \text{ l}) / (46,54 \text{ s}) = 0,0215 \text{ l/s}$$

$$q_{iny4} = (1,00 \text{ l}) / (47,04 \text{ s}) = 0,0213 \text{ l/s}$$

$$q_{iny5} = (1,00 \text{ l}) / (47,70 \text{ s}) = 0,0210 \text{ l/s}$$

Luego se determinó un valor de caudal inyectado promedio.

$$q_{iny_prom} = \frac{q_{iny1} + q_{iny2} + q_{iny3} + q_{iny4} + q_{iny5}}{5}$$

La tabla XIV muestra los resultados obtenidos.

Tabla XIV. **Procesamiento de datos para obtener caudal inyectado con frasco Mariotte para inyección constante 3.1 de la prueba 3**

Tiempo (s)	Volumen (l)	q_{iny} (l/s)
45,96	1,00	0,0218
46,16	1,00	0,0217
46,54	1,00	0,0215
47,04	1,00	0,0213
47,70	1,00	0,0210

q_{iny_prom}	0,0214
-----------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

El caudal inyectado es entonces $q = 0,0214 \text{ l/s}$.

Junto con el aforo del frasco Mariotte (caudal inyectado q) se midieron los valores de concentración existente de sólidos disueltos totales en el agua que transitaba en el canal (C_0) y la concentración en la mezcla de trazador a inyectar (C_1). Los datos recopilados previo a la inyección constante son los mostrados en la tabla XV.

Tabla XV. **Datos medidos y procesados antes de inyección constante 3.1**

C_0	184 mg/l	Concentración natural
C_1	1 937 mg/l	Concentración inyectada
q	0,0214 l/s	Caudal inyectado

Fuente: elaboración propia.

Los datos obtenidos por medio de la sonda se muestran en la tabla XVI, es por medio de ellos que se obtiene el valor de la concentración C_2 que luego se utiliza para determinar el valor del caudal Q en el canal.

El valor de C_2 a utilizar para el cálculo del caudal (Q) se determina como el promedio de los datos que aparecen resaltados en la tabla XVI, es decir los que van desde los 45 hasta los 120 segundos, que es cuando el valor se mantiene relativamente constante. El valor es entonces $C_2 = 187,25$ mg/l.

Tabla XVI. **Datos tomados y procesados para prueba de inyección constante 3.1**

$C_0 =$	184	mg/l
$C_1 =$	1 937	mg/l
$q =$	0,0214	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	184	184
5	184	184
10	184	184
15	184	184
20	184	184
25	184	18
30	184	185
35	184	186
40	184	188
45	184	187
50	184	187
55	184	188
60	184	187
65	184	187
70	184	187
75	184	188
80	184	187
85	184	187
90	184	187
95	184	188
100	184	188
105	184	187
110	184	187
115	184	187
120	184	187
125	184	185
130	184	184

C_2 (promedio, mg/l) =	187,25
--------------------------	--------

$Q_{iny\ C\ 3.1} =$	11,536 l/s
---------------------	------------

Fuente: elaboración propia.

El caudal que transita en el canal se obtiene como:

$$Q_1 = q \cdot \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}$$

$$Q_1 = (0,0214) \cdot \frac{1\,937 - 187,25}{187,25 - 184}$$

$$Q_{\text{iny}_C_{3.1}} = 11,536 \text{ l/s}$$

Para la primer inyección a caudal constante de la prueba 3 se tiene un valor de caudal de 11,536 litros/segundo, en total se realizaron cinco descargas a caudal constante y se obtuvieron los valores mostrados en la tabla XVII, de estos valores de caudal se obtuvo un promedio el cual se tomó como el valor de caudal para el flujo que transitaba por el canal.

Tabla XVII. **Caudales obtenidos con inyección constante para prueba 3**

Inyección	Q (l/s)
3.1	11,536
3.2	11,776
3.3	11,735
3.4	12,126
3.5	11,670

Q_{iny_C_prom}	11,768
-------------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Se determina entonces que el valor promedio de caudal que fluye en el canal determinado por medio de inyección a caudal constante de trazador para la prueba 3 es de 11,768 litros/segundo.

2.6.5. Aforo por inyección puntual

Los datos previos a la primera inyección o descarga puntual para la prueba 3 se muestran en la tabla XVIII. Puede observarse que en este caso se midió el volumen inyectado ya que la ecuación para determinar el caudal circulante lo requiere:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\Delta t \cdot \sum(C_2 - C_0)}$$

En donde:

$\Delta t \cdot \sum(C_2 - C_0)$ = área entre la curva de concentración versus tiempo con forma de campana y la línea que representa la concentración natural de trazador existente.

Δt = intervalo de tiempo constante, para el caso de la toma de datos se utilizó un intervalo de 5 segundos.

Tabla XVIII. Datos medidos antes de inyección puntual 3.1

C₀	187 mg/l	Concentración natural
C₁	1 691 mg/l	Concentración inyectada
V	12 l	Volumen descargado de trazador

Fuente: elaboración propia.

La tabla XIX muestra los datos tomados y procesados para la primera inyección puntual de la prueba 3 (inyección puntual 3.1). Para determinar el valor de $\Delta t \cdot \sum(C_2 - C_0)$ se utilizaron dos procedimientos, el primero como puede observarse, restando los valores correspondientes de C_2 y C_0 para luego multiplicar la sumatoria por el intervalo de tiempo.

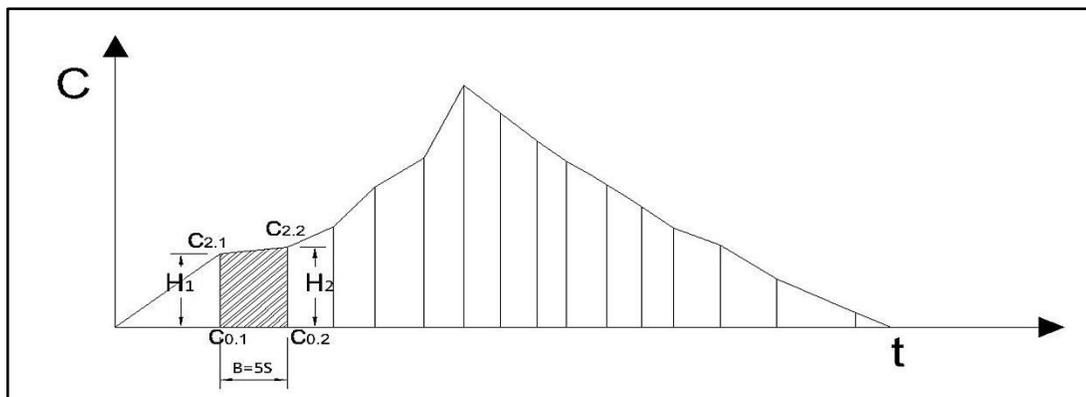
$$\sum(C_2 - C_0) = 315 \text{ mg/l}$$

Multiplicando por el intervalo de tiempo de cinco segundos se tiene:

$$\Delta t \cdot \sum(C_2 - C_0) = (5 \text{ s}) \cdot (315 \text{ mg/l}) = 1\,575 \text{ mg}\cdot\text{s/l}$$

El segundo procedimiento es el de encontrar el área entre la concentración C_2 medida y la concentración natural C_0 , representada por una línea horizontal por medio del uso de trapecios. Como puede verse en la figura 48, para calcular el área entre ambas curvas para el intervalo de 25 a 30 segundos se hace lo siguiente:

Figura 48. **Esquema de cálculos de áreas entre concentraciones**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

Se conoce la "base" del trapecio entre 25 y 30 segundos, ya que es el intervalo de tiempo $\Delta t = 5$ segundos, se conoce de igual forma la concentración medida a los 25 segundos que fue de 188 mg/l y la de los 30 segundos que fue de 215 mg/l, restando ambos valores de la concentración natural $C_0 = 187$ mg/l se tienen dos "alturas" del trapecio y por lo tanto puede efectuarse lo siguiente:

$$H_1 = 188 - 187 = 1 \text{ mg/l}$$

$$H_2 = 215 - 187 = 28 \text{ mg/l}$$

$$B = \Delta t = 5 \text{ s}$$

$$A_{\text{trap}} = \frac{1}{2} (5 \text{ s})(1 + 28) = 72,5 \text{ mg}\cdot\text{s/l}$$

Este procedimiento se realizó para todos los intervalos de tiempo, dando como resultado una serie de valores de áreas que al ser sumadas dieron como resultado el valor de 1 575 mg·s/l, esto se utilizó a manera de comprobación de resultados previo a calcular el caudal, ver tabla XIX.

Tabla XIX. **Datos tomados y procesados para prueba de inyección puntual 3.1**

$$C_0 = \begin{array}{|c|} \hline 187 \\ \hline \end{array} \text{ mg/l}$$

$$C_1 = \begin{array}{|c|} \hline 1\ 691 \\ \hline \end{array} \text{ mg/l}$$

$$V = \begin{array}{|c|} \hline 12 \\ \hline \end{array} \text{ l}$$

$$\Delta t = \begin{array}{|c|} \hline 5 \\ \hline \end{array} \text{ s}$$

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)	$C_2 - C_1$
0	187	187	0
5	187	187	0
10	187	187	0
15	187	187	0

A_{trap_i}
0
0
0
0

Continuación de la tabla XIX.

20	187	187	0	0
25	187	188	1	2,5
30	187	215	28	72,5
35	187	218	31	147,5
40	187	220	33	160
45	187	216	29	155
50	187	216	29	145
55	187	213	26	137,5
60	187	212	25	127,5
65	187	211	24	122,5
70	187	208	21	112,5
75	187	206	19	100
80	187	201	14	82,5
85	187	200	13	67,5
90	187	199	12	62,5
95	187	193	6	45
100	187	188	1	17,5
105	187	188	1	5
110	187	188	1	5
115	187	188	1	5
120	187	187	0	2,5
			$\Sigma(C_2 - C_1) =$	315
			$\Delta t \cdot \Sigma(C_2 - C_1) =$	1 575
			$Q_{iny_P_3.1} =$	11,459 l/s
			$\Sigma A_{trap_i} =$	1 575

Fuente: elaboración propia.

Para determinar el valor del caudal que transitaba en el canal para la prueba puntual 3.1 se calcula de la siguiente forma:

$$Q = \frac{V \cdot (C_1 - C_0)}{\Delta t \cdot \Sigma(C_2 - C_0)}$$

$$Q = \frac{(12) \cdot (1\,691 - 187)}{(5) \cdot (1\,575)}$$

$$Q_{\text{iny_P_3.1}} = 11,459 \text{ l/s}$$

En total para la prueba 3 se realizaron cinco inyecciones o descargas puntuales siendo los valores de caudales obtenidos los mostrados en la tabla XX. Al igual que para pruebas anteriores se calculó el valor de caudal promedio.

Tabla XX. **Caudales obtenidos con inyección puntual para prueba 3**

Inyección	Q (l/s)
3.1	11,459
3.2	10,789
3.3	11,545
3.4	11,795
3.5	11,324
Q_{iny_P_prom}	11,382

Fuente: elaboración propia.

Para inyección o descarga puntual de la prueba 3 se tiene un valor de caudal circulante en el canal de 11,382 litros por segundo. La tabla XXI muestra los valores de caudales obtenidos por medio de las diferentes metodologías para la prueba 3.

Tabla XXI. **Resumen de caudales obtenidos para prueba 3**

Método	Q_{promedio} (l/s)
Aforo volumétrico	11,536
Vertedero de sección trapezoidal	12,682
Tubo de Prandtl	19,552
Inyección de trazador constante	11,768
Inyección de trazador puntual	11,382

Fuente: elaboración propia.

Excepto por el valor de caudal obtenido por medio de la determinación de velocidades con el tubo de Prandtl, los métodos restantes proveyeron valores de caudales cercanos entre sí.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Análisis de resultados

Llevadas a cabo las cinco pruebas con sus diferentes condiciones y tipos de aforos realizados (ver anexos 1 al 5), el análisis de los resultados se llevó a cabo por medio de: la determinación de la media aritmética, la desviación estándar, el coeficiente de sesgo o asimetría y el coeficiente de variación de los caudales (en litros por segundo) obtenidos con las ecuaciones mostradas a continuación:

Media aritmética: el promedio o media aritmética es el valor equidistante entre el punto de mayor valor y el punto de menor valor de una serie de datos. Se calculó para cada tipo de aforo de las cinco pruebas de la siguiente forma:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=0}^n X_i}{N}$$

En donde:

\bar{X} = media aritmética

$\sum_{i=0}^n X_i$ = sumatoria de datos

N = número de datos

El valor obtenido se utilizó como valor de caudal (Q_{prom}) que se comparó entre las diferentes metodologías. El caudal promedio utilizado como referencia para comparar los diferentes aforos fue el obtenido por el método volumétrico, como se verá en el análisis respectivo de cada prueba.

Desviación estándar: es la raíz cuadrada de la varianza, la cual es la distancia media al cuadrado existente entre datos de una serie. Es la distancia media que tienen los valores de una serie, la diferencia promedio que existe de un valor respecto a otro, a mayor desviación estándar mayor será la dispersión de los datos.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

En donde:

S = desviación estándar

X_i = valor de cada dato

\bar{X} = media aritmética de los datos

N = número de datos

Coeficiente de sesgo o asimetría: el sesgo es el grado de asimetría o falta de simetría de una distribución o serie de datos. Si la curva de frecuencia tiene una “cola” más larga a la derecha del máximo central que a la izquierda, se dice que la distribución está sesgada a la derecha o que tiene “sesgo positivo”, si es a la izquierda se dice que tiene “sesgo negativo”. Se determina de la siguiente forma:

$$CS = \frac{\bar{X} - Mo}{S}$$

En donde:

CS = coeficiente de sesgo

\bar{X} = media aritmética de los datos

Mo = moda o valor que más de repite en la serie de datos

S = desviación estándar

Coeficiente de variación: es una medida para determinar la desviación de una serie con respecto a su promedio o media aritmética. Se utiliza para comparar dispersión cuando los instrumentos o unidades de medida son distintas, o cuando las medias de dos grupos son desiguales. Es una medida de dispersión relativa que se obtiene dividiendo la desviación estándar de la serie de datos, entre su media aritmética y se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}}$$

En donde:

CV = coeficiente de variación

S = desviación estándar

\bar{X} = media aritmética de los datos

Es un dato adimensional, puesto con que los datos con se calcula están expresados en sus dimensionales originales. Si el valor del coeficiente de variación es cercano a cero, significa que se trata de datos consistentes que no presentan una dispersión considerable respecto a la media. Caso contrario

cuando se acerca a uno, significaría que se trata de una serie de datos alejados de la media y poco confiable.

3.1.1. Análisis de prueba 1

Los datos que se muestran en la tabla XXII presentan los valores obtenidos en la prueba 1, es un resumen para comparar los resultados de cada una para lo cual se utilizó el vertedero rectangular.

Tabla XXII. Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 1

Núm.	Volumétrico		Vertedero rectangular	Tubo de Prandtl	Inyección constante	Inyección puntual
1.1	8,845	Ec.1	5,176	13,886	8,702	9,200
1.2	8,745	Ec.2	6,136	16,645	9,344	8,820
1.3	8,785			18,404	9,180	9,063
1.4	8,635			15,842	9,333	8,725
1.5	8,655			18,373	9,333	9,026
Q_{prom}	8,733		5,656	16,630	9,178	8,967
S	0,0881		0,6792	1,8935	0,2747	0,1920
CS	0,0773			-0,6308	-1,9285	-0,2114
CV	0,0101		0,1201	0,1139	0,0299	0,0214

Fuente: elaboración propia.

Para la prueba 1 se observa que la desviación estándar en el caso del aforo volumétrico es menor que para los demás aforos, influyendo asimismo en su coeficiente de variación al tener un valor más cercano a cero, comparado con los de los otros aforos. Asimismo, los valores de caudales obtenidos son consistentes por lo que fue respecto a él como se compararon los otros métodos. El aforo volumétrico también es el único con un coeficiente de asimetría positivo y menor si se comparan los valores absolutos.

Los valores de caudales obtenidos por medio de las inyecciones de trazadores constantes y puntuales se encuentran cercanos al valor del aforo volumétrico. Sin embargo, para esta prueba el valor absoluto del coeficiente de sesgo de la inyección constante fue el mayor comparado con los otros.

Por otro lado la mayor desviación estándar es la que tiene la serie de datos de caudales obtenidos por medio del tubo de Prandtl, proporcionando también valores de caudales alejados del valor del aforo volumétrico. Otro valor alejado del caudal promedio del aforo volumétrico es el proporcionado por el aforo con vertedero de sección rectangular.

3.1.2. Análisis de prueba 2

Los datos que se muestran en la tabla XXIII presentan los valores obtenidos en la prueba 2, es un resumen para comparar los resultados de cada una de ellas y se utilizó el vertedero rectangular.

Tabla XXIII. Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 2

Núm.	Volumétrico		Vertedero rectangular	Tubo de Prandtl	Inyección constante	Inyección puntual
2.1	17,952	Ec.1	13,95	26,052	18,718	17,959
2.2	18,158	Ec.2	14,42	27,637	18,268	19,899
2.3	17,942			24,767	17,684	18,160
2.4	18,049			26,866	17,477	17,758
2.5	18,137			24,818	29,014	17,580
Q_{prom}	18,048		14,186	26,028	20,232	18,271
S	0,1007		0,3270	1,2594	4,9335	0,9353
CS	0,0049			0,2039	2,1818	1,9422
CV	0,0056		0,0231	0,0484	0,2438	0,0512

Fuente: elaboración propia.

Al igual que para la prueba 1 el aforo volumétrico provee los valores de caudales más consistentes, el aforo por vertedero provee valores menores pero cercanos. El aforo por inyección puntual proporcionó en este caso valores cercanos al aforo volumétrico y el coeficiente de variación fue menor.

El aforo por inyección constante tuvo un valor de caudal promedio mayor al del aforo volumétrico, debido a que la prueba 2.5 dio un valor incluso mayor al promedio obtenido con los datos de caudal del tubo de Prandtl. Esto pudo deberse a que al momento de realizarse la prueba constante 2.5, la concentración existente de trazador en el canal era tal, que la concentración inyectada C1 y caudal (q) era tan pequeño que no provocó un cambio significativo que influyera en el cálculo del caudal circulante (ver apéndice 2, tablas 2.10 a 2.20).

3.1.3. Análisis de prueba 3

Los datos que se muestran en la tabla XXIV presentan los valores obtenidos en la prueba 3, es un resumen para comparar los resultados de cada una de ellas y para lo cual se utilizó un vertedero rectangular.

Tabla XXIV. Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 3

Núm.	Volumétrico		Vertedero trapezoidal	Tubo de Prandtl	Inyección constante	Inyección puntual
3.1	11,538	Ec.1	12,274	20,300	11,536	11,459
3.2	11,476	Ec.2	13,090	18,382	11,776	10,789
3.3	11,556			19,516	11,735	11,545
3.4	11,628			20,119	12,126	11,795
3.5	11,484			19,443	11,669	11,324

Continuación de la tabla XXIV.

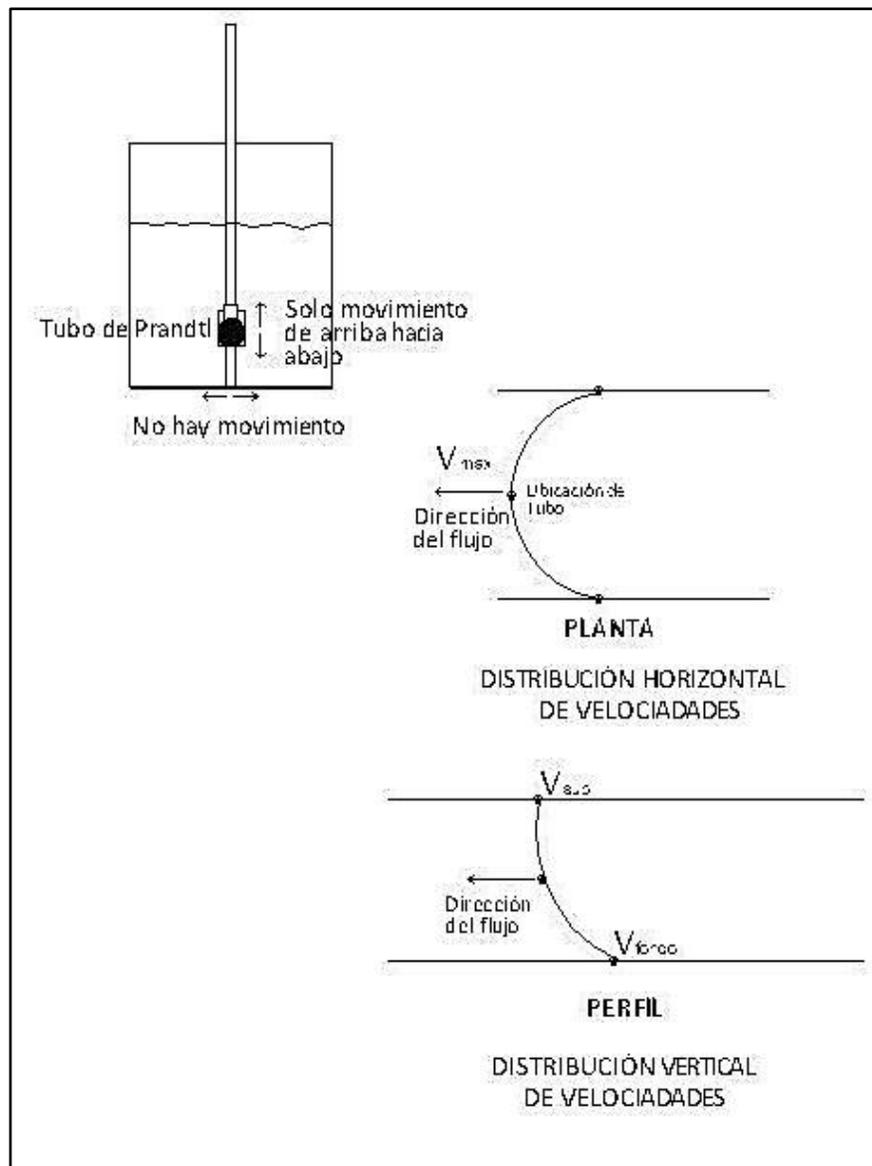
Q_{prom}	11,536	12,682	19,552	11,768	11,382
S	0,0616	0,5764	0,7524	0,2195	0,3733
CS	0,7245		-0,9802	1,2584	-1,0731
CV	0,0053	0,0455	0,0385	0,0187	0,0328

Fuente: elaboración propia.

El caudal calculado con los parámetros del vertedero trapezoidal en la prueba 3 y sus dos ecuaciones, tiene un valor más cercano al del aforo volumétrico que para las pruebas 1 y 2 (realizadas con vertedero rectangular). Los datos obtenidos para las inyecciones constantes y puntuales fueron más consistentes, pero para el caso de la prueba constante 3.4 el valor de caudal obtenido fue mayor al promedio del aforo volumétrico, mientras que para la prueba puntual 3.2 fue menor. Si estos valores se omitiesen el valor del caudal promedio sería más cercano al del aforo volumétrico.

En las pruebas 1, 2 y 3 el caudal promedio calculado con las mediciones obtenidas a partir del tubo de Prandtl estuvo alejado al determinado con los aforos volumétricos, pudo deberse a que la medición se efectuó únicamente de manera vertical en la mitad del canal debido a la disposición del equipo (este no permitía movimiento lateral sino únicamente de arriba hacia abajo). Por lo tanto las velocidades medidas y por consiguiente la velocidad media calculada era la velocidad máxima (ver figura 49).

Figura 49. Esquema de disposición del tubo de Prandtl en una sección del canal y distribuciones de velocidad horizontal y vertical para las pruebas 1, 2 y 3



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

3.1.4. Análisis de prueba 4

Los datos que se muestran a continuación, tabla XXV, presenta los valores obtenidos en la prueba 4, en la que no se utilizó ningún vertedero.

Tabla XXV. Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 4

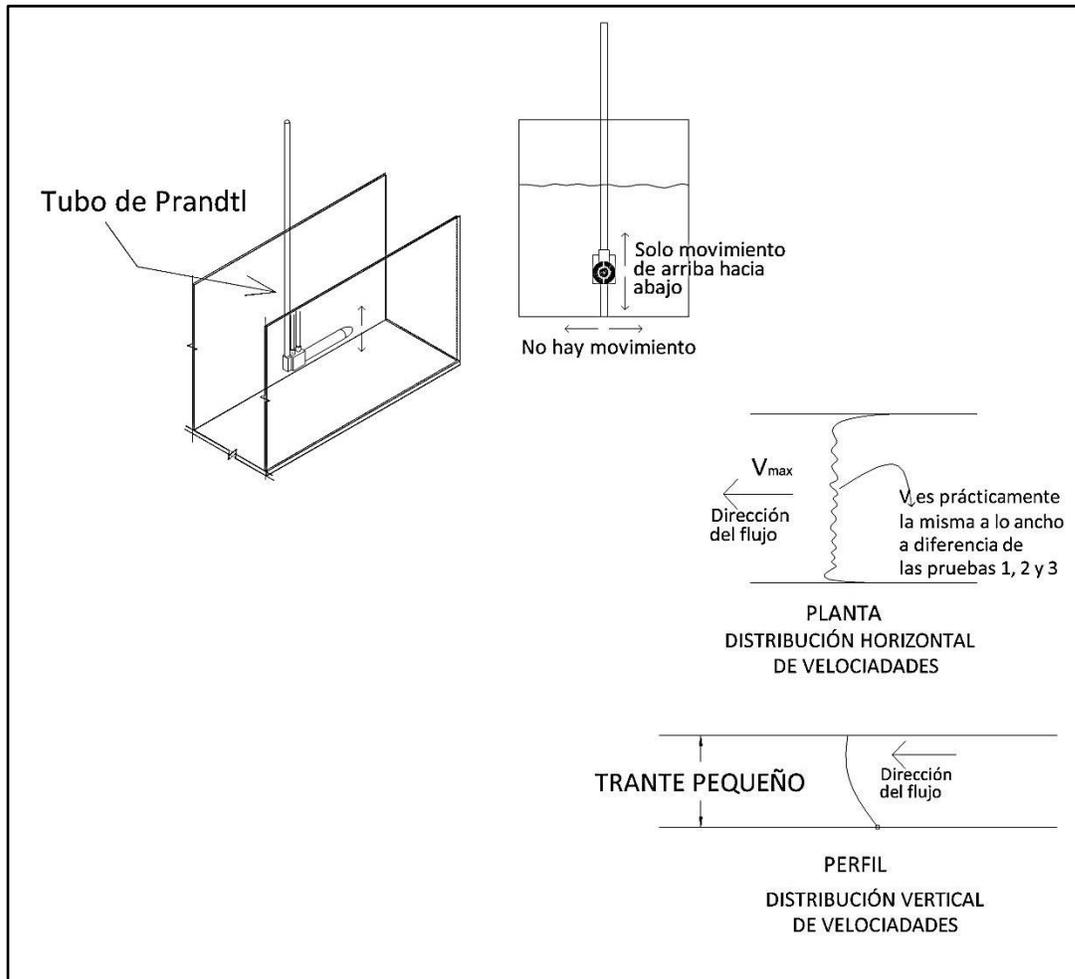
Núm.	Volumétrico	Tubo de Prandtl	Inyección constante	Inyección puntual
4.1	8,920	11,533	9,112	8,691
4.2	9,226	9,897	7,690	8,838
4.3	9,294	9,593	9,319	8,597
4.4	9,168	10,538	9,487	9,996
4.5	9,120	10,190	8,766	*****
Q_{prom}	9,145	10,350	8,875	9,031
S	0,1420	0,7480	0,7150	0,6511
CS	-1,1258	1,1252	-1,5224	1,8637
CV	0,0155	0,0723	0,0806	0,0721

Fuente: elaboración propia.

En la prueba 4 no se utilizó vertedero de ningún tipo y solo se realizaron 4 inyecciones o descargas puntuales, pero como puede observarse los coeficientes de variación indican que se obtuvieron datos consistentes.

En este caso el caudal obtenido por medio de velocidades calculadas con datos del tubo de Prandtl se acercó más al valor del caudal obtenido con el aforo volumétrico a pesar de tener el valor de desviación mayor para todas las series de datos de la prueba 4. Esto pudo deberse a que el caudal tenía un tirante menor y que había turbulencia que hizo que las velocidades medidas fueran similares a lo largo de la curva de distribución de velocidades horizontal y vertical (ver figura 50, Esta figura fue realizada con base en lo explicado por Chow Ven Te, en *Hidráulica de canales abiertos*).

Figura 50. **Distribución horizontal de velocidades**



Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la inyección puntual, debido a que las pruebas 4 y 5 eran para evaluar y calibrar el equipo, no se tuvo el cuidado inicial para proveer una descarga que diera una curva en forma de campana (ver apéndice 4). Sin embargo, los valores de caudal obtenidos fueron similares a los de los otros métodos de aforo; la razón puede ser que el caudal (Q) para la inyección puntual, está en función del área entre la curva de concentración natural C_0 y la

variación de la concentración, al realizarse la inyección C2 y del volumen inyectado V, no del ritmo al que se inyecta, como lo es en el caso de la inyección con caudal constante.

Para la prueba puntual 4.1 el volumen inyectado fue de 5 litros, y de 7 litros para las pruebas 4.2, 4.3 y 4.4 (ver apéndice 4, tablas 4.17 a 4.19 con sus respectivas figuras), las inyecciones 4.1 a 4.3 se caracterizaron porque sus gráficas (ver apéndice 4, tablas 4.14 a 4.16 con sus respectivas figuras) son irregulares, a diferencia de la 4.4 que fue cuando se logró definir la forma de llevar a cabo la inyección puntual, sin más interferencia humana que la de dejar salir el trazador del recipiente al quitar la obstrucción del orificio de salida.

3.1.5. Análisis de prueba 5

Los datos que se muestran a continuación, tabla XXVI, presenta los valores obtenidos en la prueba 5, con la cual se comparan los resultados de cada prueba y verificar cual fue la que se acercó más al valor real. Para esta prueba no se utilizó ningún vertedero.

Tabla XXVI. Análisis de caudales (l/s) obtenidos para prueba 5

Núm.	Volumétrico	Tubo de Prandtl	Inyección constante	Inyección puntual
5.1	9,135	10,633	8,863	10,270
5.2	9,127	10,134	8,070	9,786
5.3	9,163	10,021	9,091	9,961
5.4	9,129	8,470	9,845	9,404
5.5	9,119	9,836	9,380	*****
Q_{prom}	9,134	9,819	9,050	9,855

Continuación de la tabla XXVI.

S	0,0167	0,8096	0,6592	0,3615
CS	1,6246	-1,4708	-0,5956	-0,2805
CV	0,0018	0,0824	0,0728	0,0367

Fuente: elaboración propia.

Al igual que todas las pruebas el aforo por el método volumétrico proporcionó los valores de caudal con menor dispersión entre sí, puede observarse de igual forma que para la prueba 4 el valor de caudal para el aforo con tubo de Prandtl está cercano al de los otros métodos; se llevaron a cabo también cuatro inyecciones puntuales y no cinco como en las otras pruebas. Para el aforo por inyección puntual de esta prueba se comenzó a trabajar con el recipiente a su máxima capacidad por lo que el volumen inyectado fue mayor que para la prueba 4 (12 litros, ver apéndice 5).

CONCLUSIONES

1. Se presentaron cuatro métodos, de los cuales el aforo volumétrico fue el que presentó menor desviación estándar, por lo cual se consideró como el valor real y con el que se compararon los demás métodos.
2. De los dos vertederos utilizados, el trapezoidal proporcionó un caudal más apegado al valor real; tomando en cuenta el valor del caudal volumétrico como base.
3. Debido a que solo se podía tomar una medida a la mitad de la sección con el tubo de Prandtl en el canal, los valores medidos eran los máximos en algunos de los casos, por lo tanto el valor del caudal obtenido con este método era mucho mayor al obtenido con los demás.
4. Por ser un material económico y fácil de encontrar, la sal común es buena sustancia para poder utilizar el método de trazador.
5. En el aforo puntual no importa el ritmo de inyección sino el volumen inyectado, ya que este método utiliza como principal parámetro dicho volumen, tal como se observa en las gráficas de las pruebas 4 y 5; las cuales no tienen forma de campana, como la de las pruebas 1, 2 y 3.

RECOMENDACIONES

1. Si se requiere utilizar vertederos para el cálculo de caudales, considerar como primera opción el vertedero trapezoidal por ser el más exacto.
2. Utilizar un tubo de Prandtl que mida velocidades intermedias y no máximas, para tener un valor más cerca del real. Es decir que tenga movilidad a lo ancho y no únicamente de forma vertical.
3. De ser posible, comparar el caudal con el método volumétrico ya que es uno de los que tienen menor dispersión.
4. Utilizar el método de trazadores donde se dé una mezcla apropiada del trazador en la corriente.
5. En caso de poder usar el aforo volumétrico, utilizar el método de trazador teniendo cuidado de emplear la concentración adecuada.
6. Utilizar la sal común como trazador, por ser fácil de conseguir, económica y por tener una concentración fácil de medir.

BIBLIOGRAFÍA

1. CHOW, Ven Te. *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill, 1994. 667 p.
2. HERSCHY, Reginal. W. *Streamflow measurement*. 3rd ed. USA: CRL Press, 2008. 510 p.
3. LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2010. 109 p.
4. OLSON, Reuben. *Engineering fluid mechanics*. 2nd ed. USA: Harpercollins College, 1990. 638 p.
5. Organización Meterológica Mundial. *Guía de prácticas hidrológicas*. 6a ed. Suiza: OMM, 2008. 324 p.
6. STREETER, Victor L. *Mecánica de fluidos*. 9a ed. Colombia: McGraw-Hill, 2000. 740 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos de la prueba 1

Tabla 1.1. Aforo volumétrico de la prueba 1

Aforo volumétrico	Tiempo (S)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
1.1	51,33	454,00	8,845
1.2	53,62	468,90	8,745
1.3	54,57	479,40	8,785
1.4	57,43	495,90	8,635
1.5	55,47	480,10	8,655

Qvol. promedio	8,733
-----------------------	--------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.2. Ensayo 1.1, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	17,3	cm
Area de la sección = B·H	519	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,6	34,31
0,2·H = 3,46 cm	0,5	31,32
0,4·H = 6,92 cm	0,5	31,32
0,6·H = 10,38 cm	0,3	24,26
0,8·H = 13,84 cm	0,2	19,81
Cercano al fondo del canal $\approx 17,3$ cm	0,2	19,81

\bar{v} (cm/s)	26,75
Q (l/s)	13,886

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.3. Ensayo 1.2, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	18	cm
Área de la sección = B·H	540	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,8	39,62
0,2·H = 3,6 cm	0,7	37,06
0,4·H = 7,2 cm	0,5	31,32
0,6·H = 10,8 cm	0,4	28,01
0,8·H = 14,4 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 18 cm	0,2	19,81

\bar{v} (cm/s)	30,82
Q (l/s)	16,645

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.4. Ensayo 1.3, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	18	cm
Área de la sección = B·H	540	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,7	37,06
0,2·H = 3,6 cm	0,6	34,31
0,4·H = 7,2 cm	0,7	37,06
0,6·H = 10,8 cm	0,7	37,06
0,8·H = 14,4 cm	0,5	31,32
Cercano al fondo del canal ≈ 18 cm	0,3	24,26

\bar{v} (cm/s)	34,08
Q (l/s)	18,404

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.5. Ensayo 1.4, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	18,5	cm
Área de la sección = B·H	555	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,7	37,06
0,2·H = 3,7 cm	0,4	28,01
0,4·H = 7,4 cm	0,4	28,01
0,6·H = 11,1 cm	0,4	28,01
0,8·H = 14,8 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal $\approx 18,5$ cm	0,3	24,26

\bar{v} (cm/s)	28,54
Q (l/s)	15,842

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.6. Ensayo 1.5, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	18,8	cm
Área de la sección = B·H	564	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,8	39,62
0,2·H = 3,76 cm	0,6	34,31
0,4·H = 7,52 cm	0,6	34,31
0,6·H = 11,28 cm	0,6	34,31
0,8·H = 15,04 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal $\approx 18,8$ cm	0,3	24,26

\bar{v} (cm/s)	32,58
Q (l/s)	18,373

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.7. **Resumen ensayo 1.0, tubo de Prandtl**

Qpromedio (l/s)	16,630
------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.8. **Prueba 1, vertedero rectangular**

	Valor medido (cm)	$Q = 0,306 \cdot H^{1,659}$	Q (l/s)
h ₀	17,4		5,176
h ₁	11,9		
H = h ₀ - h ₁	5,5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.9. **Prueba 1, vertedero rectangular (ecuación alterna)**

	Valor medido (cm)	$Q = (1,197) \cdot (0,0184) \cdot (L - 0,2H) \cdot H^{3/2}$	Q (l/s)
h ₀	17,4		6,136
h ₁	11,9		
L	22,7		
H = h ₀ - h ₁	5,5		

Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.10. Inyección constante 1.1

C0 =	188	mg/l
C1 =	1 903,00	mg/l
q =	0,021844	l/s

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)
0	188	188,00
5	188	188,00
10	188	188,00
15	188	188,00
20	188	188,00
25	188	188,00
30	188	189,00
35	188	190,00
40	188	192,00
45	188	191,00
50	188	192,00
55	188	192,00
60	188	193,00
65	188	193,00
70	188	193,00
75	188	193,00
80	188	192,00
85	188	192,00
90	188	192,00
95	188	192,00
100	188	192,00
105	188	192,00
110	188	193,00
115	188	193,00
120	188	192,00
125	188	191,00
130	188	190,00
135	188	190,00
140	188	189,00
145	188	189,00
150	188	189,00
155	188	188,00

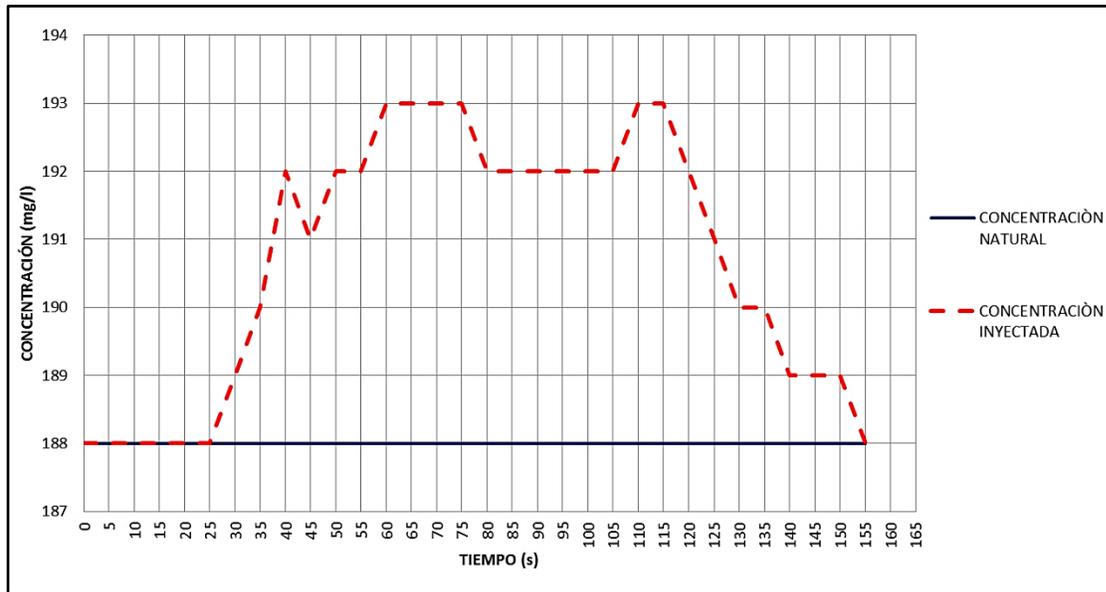
C2 (promedio, mg/l) =	192,2941
-----------------------	----------

Q _{iny_C_1.1} =	8,7024
--------------------------	--------

l/s

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.1. Inyección constante 1.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.11. Inyección constante 1.2

□

$C_0 =$	189	mg/l
$C_1 =$	1 904,00	mg/l
$q =$	0,0218	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	189	189,00
5	189	189,00
10	189	189,00
15	189	189,00
20	189	189,00
25	189	189,00
30	189	189,00

Continuación de la tabla 1.11.

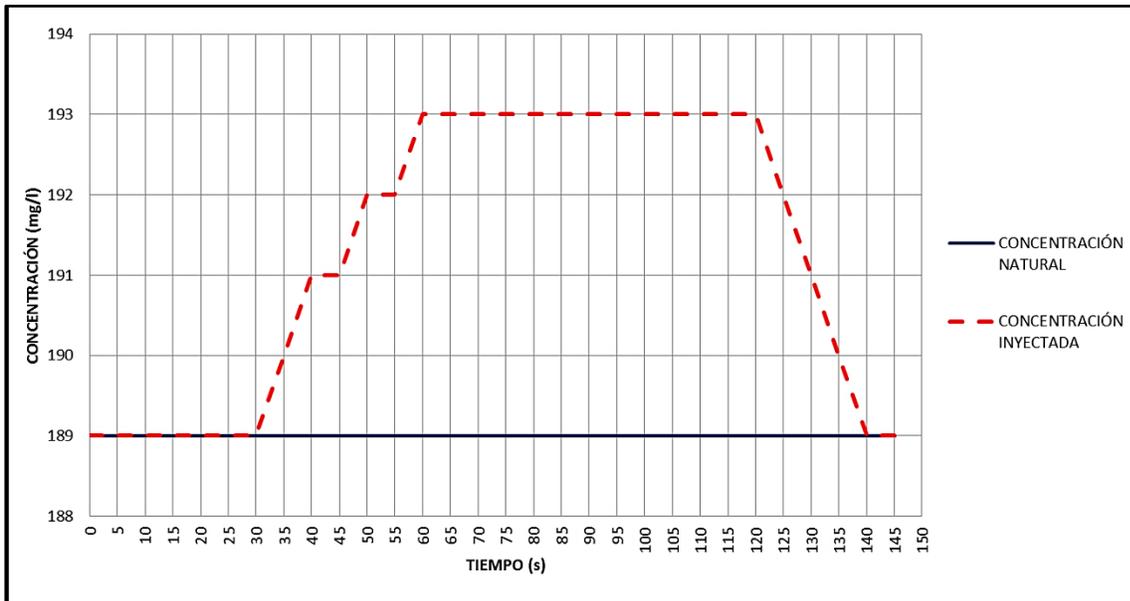
35	189	190,00
40	189	191,00
45	189	191,00
50	189	192,00
55	189	192,00
60	189	193,00
65	189	193,00
70	189	193,00
75	189	193,00
80	189	193,00
85	189	193,00
90	189	193,00
95	189	193,00
100	189	193,00
105	189	193,00
110	189	193,00
115	189	193,00
120	189	193,00
125	189	192,00
130	189	191,00
135	189	190,00
140	189	189,00
145	189	189,00

C₂ (promedio, mg/l) =	193,0000
---	-----------------

Q_{iny_C_1.2} =	9,3439	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.2. Inyección constante 1.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.12. Inyección constante 1.3

$C_0 =$	189	mg/l
$C_1 =$	1 904,00	mg/l
$q =$	0,0218	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	189	189,00
5	189	189,00
10	189	189,00
15	189	189,00
20	189	189,00
25	189	189,00
30	189	190,00

Continuación de la tabla 1.12.

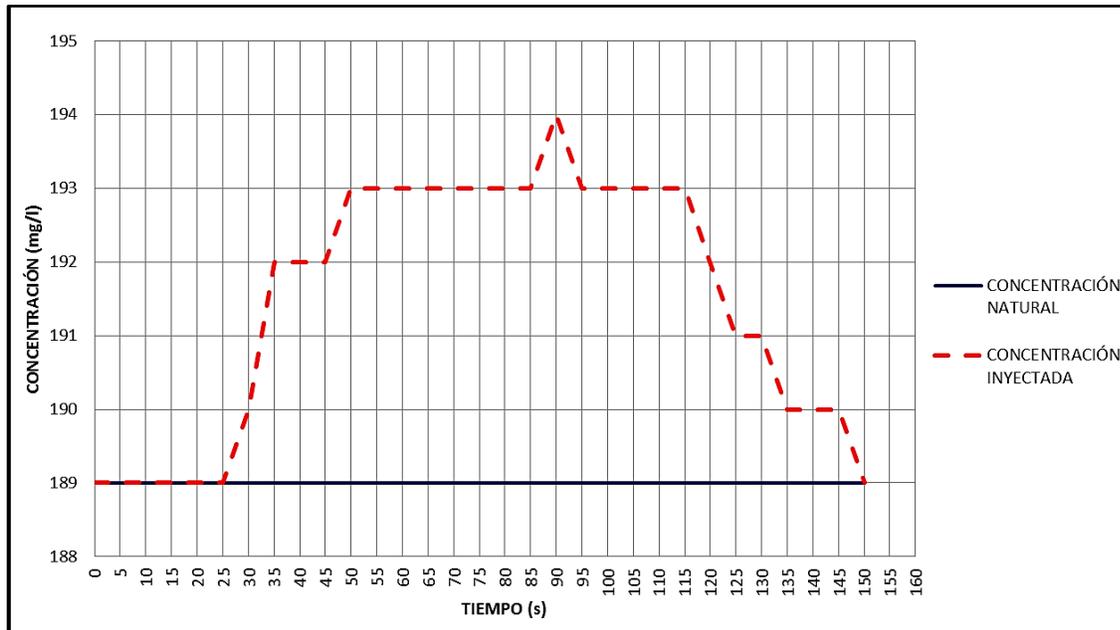
35	189	192,00
40	189	192,00
45	189	192,00
50	189	193,00
55	189	193,00
60	189	193,00
65	189	193,00
70	189	193,00
75	189	193,00
80	189	193,00
85	189	193,00
90	189	194,00
95	189	193,00
100	189	193,00
105	189	193,00
110	189	193,00
115	189	193,00
120	189	192,00
125	189	191,00
130	189	191,00
135	189	190,00
140	189	190,00
145	189	190,00
150	189	189,00

C2 (promedio, mg/l) =	193,0714
------------------------------	-----------------

Qiny_C_1.3 =	9,1796	l/s
---------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.3. Inyección constante 1.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.13. Inyección constante 1.4

$C_0 =$	190	mg/l
$C_1 =$	1 903,00	mg/l
$q =$	0,0218	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	190	190,00
5	190	190,00
10	190	190,00
15	190	190,00
20	190	190,00
25	190	190,00
30	190	190,00

Continuación de la tabla 1.13.

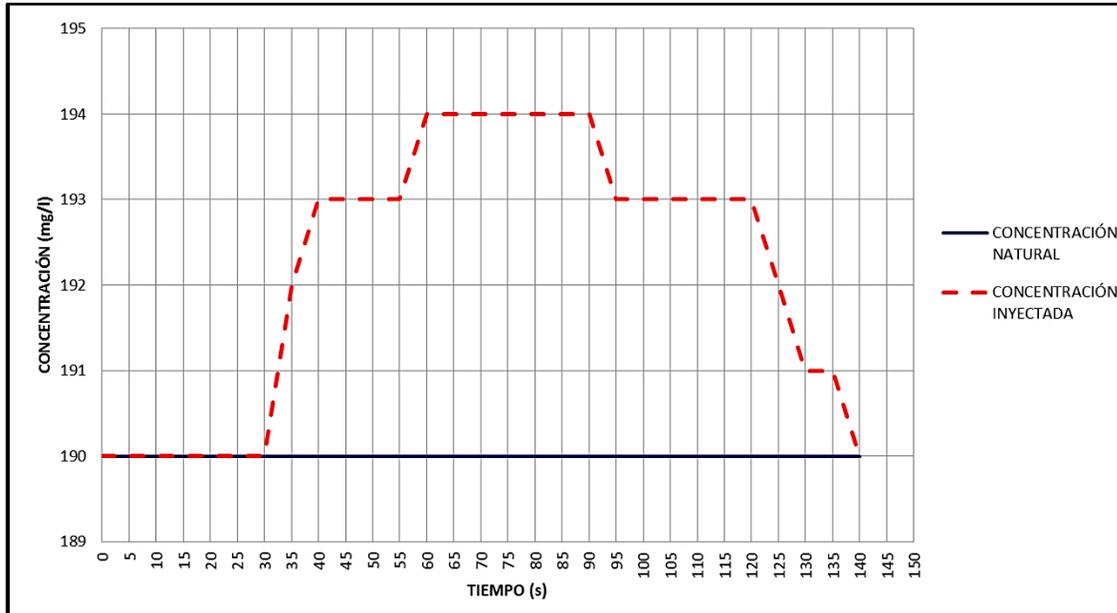
35	190	192,00
40	190	193,00
45	190	193,00
50	190	193,00
55	190	193,00
60	190	194,00
65	190	194,00
70	190	194,00
75	190	194,00
80	190	194,00
85	190	194,00
90	190	194,00
95	190	193,00
100	190	193,00
105	190	193,00
110	190	193,00
115	190	193,00
120	190	193,00
125	190	192,00
130	190	191,00
135	190	191,00
140	190	190,00

C₂ (promedio, mg/l) =	194,0000
---	-----------------

Q_{iny_C_1.4} =	9,3330	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.4. Inyección constante 1.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.14. Inyección constante 1.5

$C_0 =$	190	mg/l
$C_1 =$	1 903.00	mg/l
$q =$	0,0218	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	190	190,00
5	190	190,00
10	190	190,00
15	190	190,00
20	190	190,00
25	190	190,00
30	190	191,00

Continuación de la tabla 1.14.

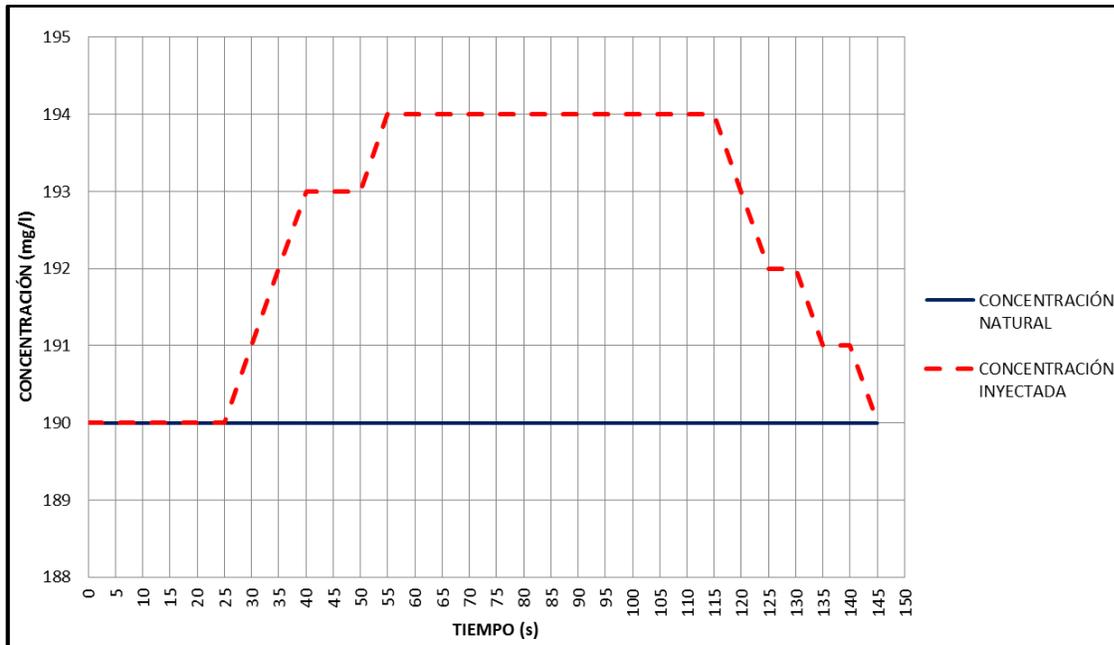
35	190	192,00
40	190	193,00
45	190	193,00
50	190	193,00
55	190	194,00
60	190	194,00
65	190	194,00
70	190	194,00
75	190	194,00
80	190	194,00
85	190	194,00
90	190	194,00
95	190	194,00
100	190	194,00
105	190	194,00
110	190	194,00
115	190	194,00
120	190	193,00
125	190	192,00
130	190	192,00
135	190	191,00
140	190	191,00
145	190	190,00

C₂ (promedio, mg/l) =	194,0000
---	-----------------

Q_{iny_C_1.5} =	9,3330	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.5. Inyección constante 1.5



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.15. Aforo para frasco de Mariotte para determinar el caudal “q” de la prueba 1

Tiempo (s)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
45,33	1,00	0,0221
45,74	1,00	0,0219
46,45	1,00	0,0215
45,41	1,00	0,0220
45,98	1,00	0,0217

q_{iny_prom}	0,0218	l/s
-----------------	--------	-----

Fuente: elaboración propia.

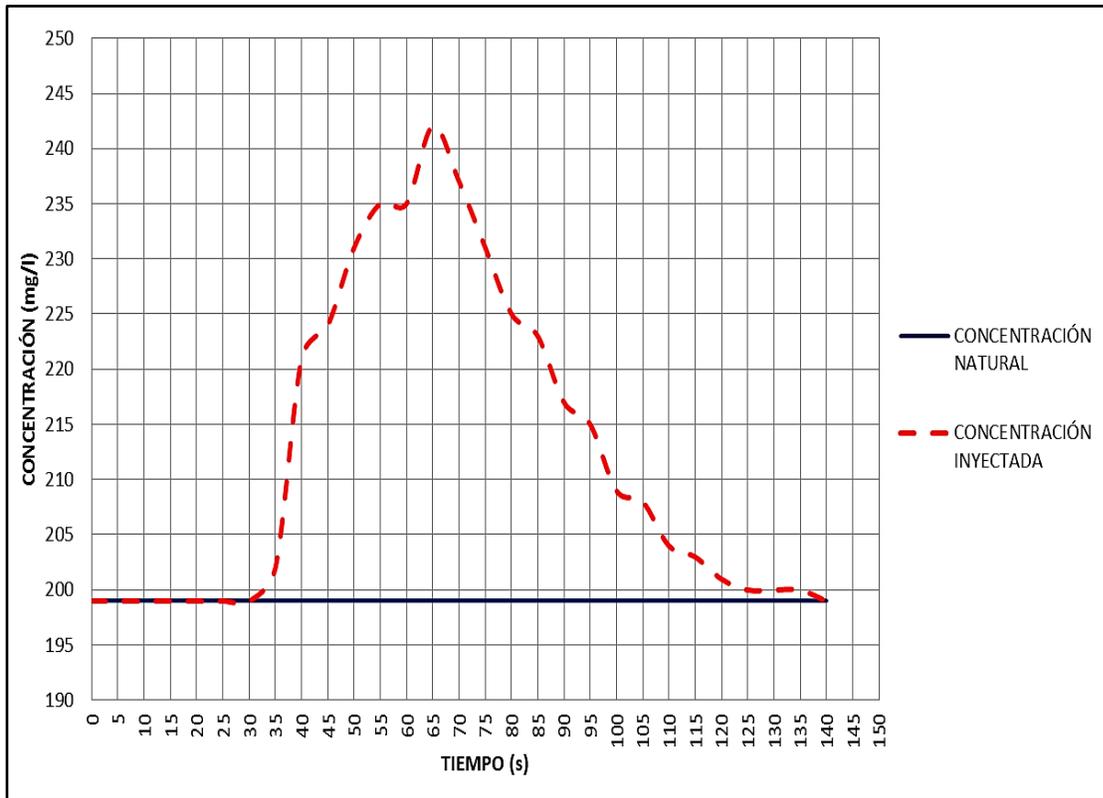
Tabla 1.16. Inyección puntual 1.1

$$C_0 = \begin{matrix} 199 \\ 1\ 671 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad V = \begin{matrix} 12 \\ 5 \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_I	
0	199	199	0	0	
5	199	199	0	0	
10	199	199	0	0	
15	199	199	0	0	
20	199	199	0	0	
25	199	199	0	0	
30	199	199	0	0	
35	199	202	3	7,5	
40	199	221	22	62,5	
45	199	224	25	117,5	
50	199	231	32	142,5	
55	199	235	36	170	
60	199	235	36	180	
65	199	242	43	197,5	
70	199	237	38	202,5	
75	199	231	32	175	
80	199	225	26	145	
85	199	223	24	125	
90	199	217	18	105	
95	199	215	16	85	
100	199	209	10	65	
105	199	208	9	47,5	
110	199	204	5	35	
115	199	203	4	22,5	
120	199	201	2	15	
125	199	200	1	7,5	
130	199	200	1	5	
135	199	200	1	5	
140	199	199	0	2,5	
$\sum (C_2 - C_1) =$			384	$\sum \text{Atrap}_I =$	1 920
$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$			1 920		
$Q_{iny_P_1.1} =$			9,200	l/s	

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.6. Inyección puntual 1.1



Fuente: elaboración propia.

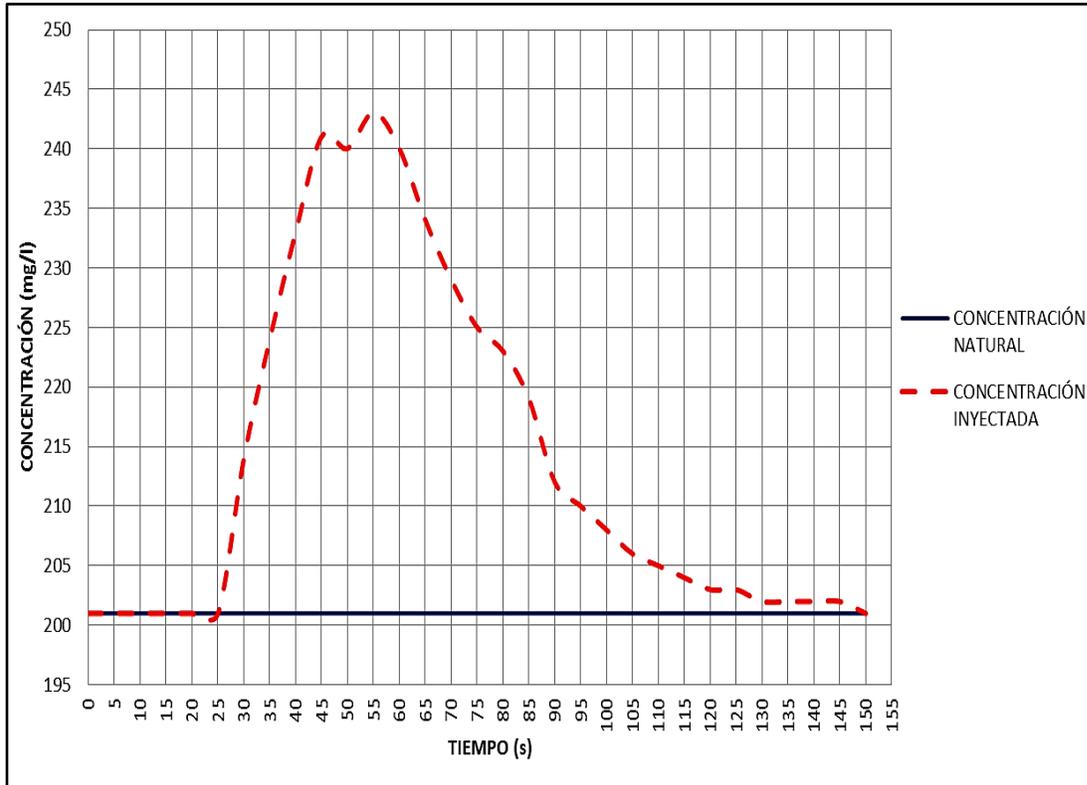
Tabla 1.17. Inyección puntual 1.2

$$C_0 = \frac{201}{1\ 671} \text{ mg/l} \quad V = \frac{12}{5} \text{ l/s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_I
0	201	201	0	0
5	201	201	0	0
10	201	201	0	0
15	201	201	0	0
20	201	201	0	0
25	201	201	0	0
30	201	214	13	32,5
35	201	224	23	90
40	201	233	32	137,5
45	201	241	40	180
50	201	240	39	197,5
55	201	243	42	202,5
60	201	240	39	202,5
65	201	234	33	180
70	201	229	28	152,5
75	201	225	24	130
80	201	223	22	115
85	201	219	18	100
90	201	212	11	72,5
95	201	210	9	50
100	201	208	7	40
105	201	206	5	30
110	201	205	4	22,5
115	201	204	3	17,5
120	201	203	2	12,5
125	201	203	2	10
130	201	202	1	7,5
135	201	202	1	5
140	201	202	1	5
145	201	202	1	5
150	201	201	0	2,5
		$\Sigma (C_2 - C_1) =$	400	
		$\Delta t \cdot \Sigma (C_2 - C_1) =$	2 000	
		$Q_{iny_P_1.2} =$	8,820	l/s
				$\Sigma \text{ trap_I} =$ 2 000

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.7. Inyección puntual 1.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.18. Inyección puntual 1.3

$$C_0 = \begin{matrix} 204 \\ 1\ 673 \end{matrix} \text{ mg/l}$$

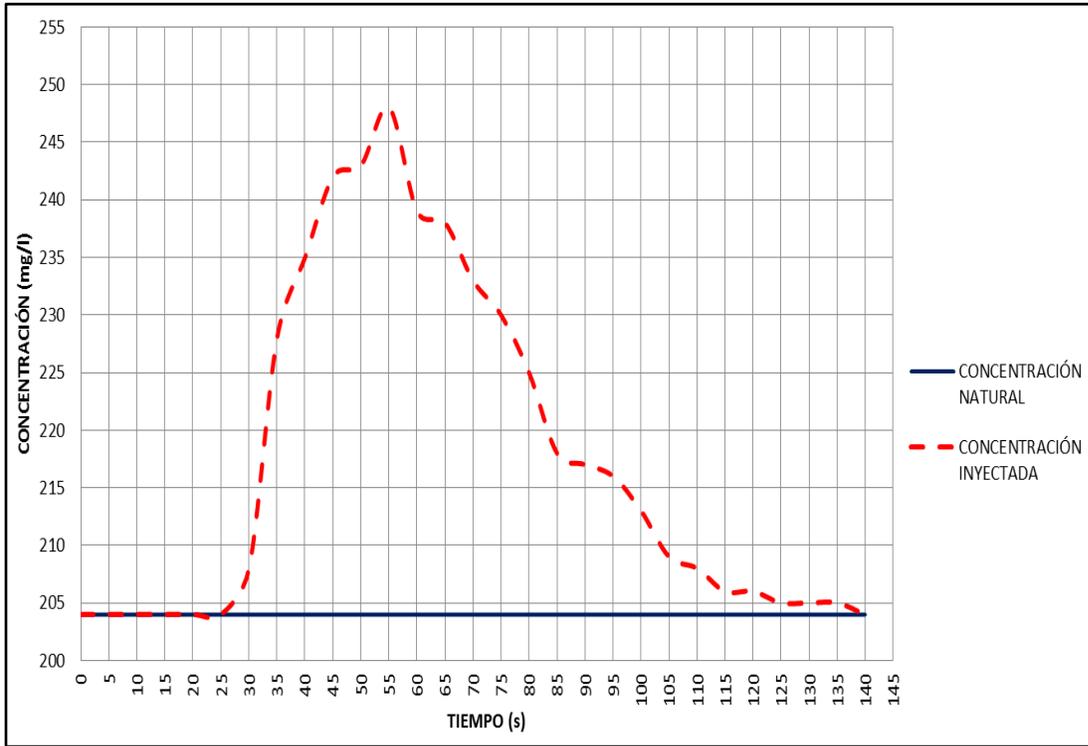
$$V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	204	204	0	0
5	204	204	0	0
10	204	204	0	0
15	204	204	0	0
20	204	204	0	0
25	204	204	0	0
30	204	208	4	10
35	204	228	24	70
40	204	235	31	137,5
45	204	242	38	172,5
50	204	243	39	192,5
55	204	248	44	207,5
60	204	239	35	197,5
65	204	238	34	172,5
70	204	233	29	157,5
75	204	230	26	137,5
80	204	225	21	117,5
85	204	218	14	87,5
90	204	217	13	67,5
95	204	216	12	62,5
100	204	213	9	52,5
105	204	209	5	35
110	204	208	4	22,5
115	204	206	2	15
120	204	206	2	10
125	204	205	1	7,5
130	204	205	1	5
135	204	205	1	5
140	204	204	0	2,5
		$\Sigma (C_2 - C_1) =$	389	
		$\Delta t \cdot \Sigma (C_2 - C_1) =$	1 945	
				$\Sigma \text{Atrap}_i =$
				1 945

$Q_{iny_P_1.3} =$	9,063	l/s
---------------------	--------------	-----

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.8. Inyección puntual 1.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.19. Inyección puntual 1.4

C0 =	206	mg/l	V =	12 l	
C1 =	1671	mg/l	$\Delta t =$	5 s	

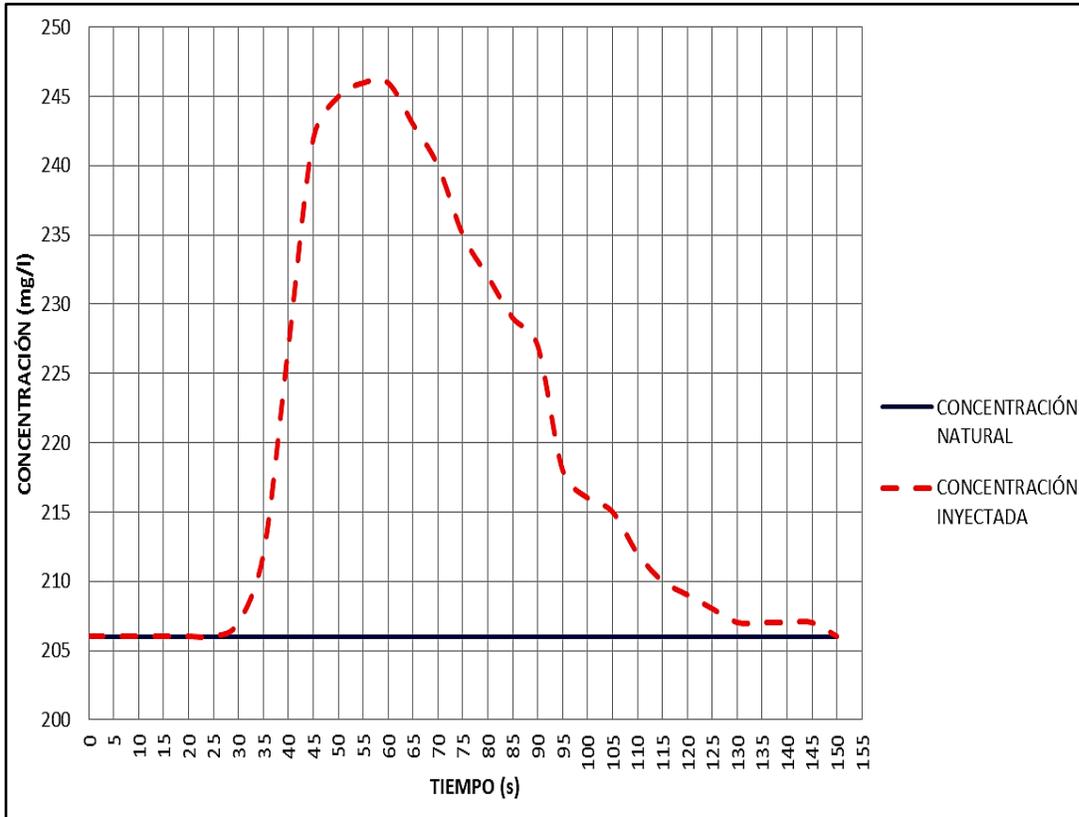
Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	206	206	0
5	206	206	0
10	206	206	0
15	206	206	0
20	206	206	0
25	206	206	0
30	206	207	1
35	206	212	6
40	206	227	21
45	206	242	36
50	206	245	39
55	206	246	40
60	206	246	40
65	206	243	37
70	206	240	34
75	206	235	29
80	206	232	26
85	206	229	23
90	206	227	21
95	206	218	12
100	206	216	10
105	206	215	9
110	206	212	6
115	206	210	4
120	206	209	3
125	206	208	2
130	206	207	1
135	206	207	1
140	206	207	1
145	206	207	1
150	206	206	0
		$\Sigma (C2 - C1) =$	403
		$\Delta t \cdot \Sigma (C2 - C1) =$	2 015

Atrap_I	
0	
0	
0	
0	
0	
0	
2,5	
17,5	
67,5	
142,5	
187,5	
197,5	
200	
192,5	
177,5	
157,5	
137,5	
122,5	
110,0	
82,5	
55,0	
47,5	
37,5	
25	
17,5	
12,5	
7,5	
5	
5	
5	
2,5	
$\Sigma \text{ Atrap_I} =$	2 015

$Q_{iny_P_1.4} = 8,725 \text{ l/s}$

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.9. Inyección puntual 1.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.20. Inyección puntual 1.5

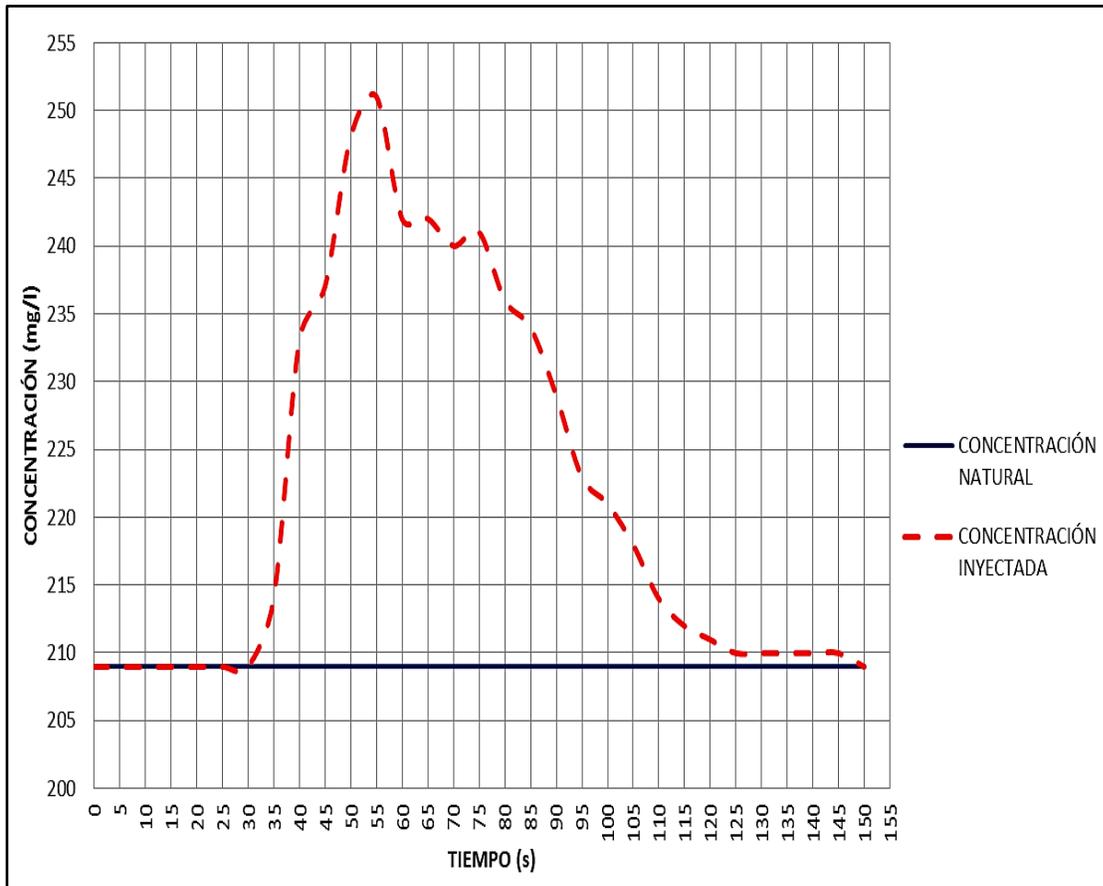
$$C_0 = \begin{matrix} 209 \\ 1\ 672 \end{matrix} \text{ mg/L} \qquad V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_I
0	209	209	0	0
5	209	209	0	0
10	209	209	0	0
15	209	209	0	0
20	209	209	0	0
25	209	209	0	0
30	209	209	0	0
35	209	214	5	12,5
40	209	233	24	72,5
45	209	237	28	130
50	209	248	39	167,5
55	209	251	42	202,5
60	209	242	33	187,5
65	209	242	33	165
70	209	240	31	160
75	209	241	32	157,5
80	209	236	27	147,5
85	209	234	25	130
90	209	229	20	112,5
95	209	223	14	85
100	209	221	12	65
105	209	218	9	52,5
110	209	214	5	35
115	209	212	3	20
120	209	211	2	12,5
125	209	210	1	7,5
130	209	210	1	5
135	209	210	1	5
140	209	210	1	5
145	209	210	1	5
150	209	209	0	2,5
		$\Sigma (C_2 - C_1) =$	389	
		$\Delta t \cdot \Sigma (C_2 - C_1) =$	1 945	
				$\Sigma \text{ Atrap_I}$
				1 945

$$Q_{\text{iny_P_1.5}} = 9,0262 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 1.10. Inyección puntual 1.5



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Datos de la prueba 2

Tabla 2.1. Aforo volumétrico de la prueba 2

Aforo volumétrico	Tiempo (S)	Volumen (l)	Caudal (l/S)
2.1	27,29	489,90	17,952
2.2	26,98	489,90	18,158
2.3	27,26	489,10	17,942
2.4	27,06	488,40	18,049
2.5	27,22	493,70	18,137

Qvol. promedio	18,048
----------------	--------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.2. Ensayo 2.1, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	22	cm
Área de la sección = B·H	660	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,2	48,52
0.2·H = 4,4 cm	1,1	46,46
0.4·H = 8,8 cm	0,8	39,62
0.6·H = 13,2 cm	0,7	37,06
0.8·H = 17,6 cm	0,6	34,31
Cercano al fondo del canal ≈ 22 cm	0,5	31,32

\bar{v} (cm/s)	39,47
Q (l/s)	26,052

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.3. Ensayo 2.2, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	22,4	cm
Área de la sección = B·H	672	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,1	46,46
0,2·H = 4,48 cm	1,2	48,52
0,4·H = 8,96 cm	1	44,29
0,6·H = 13,44 cm	0,8	39,62
0,8·H = 17,92 cm	0,6	34,31
Cercano al fondo del canal ≈ 22,4 cm	0,5	31,32

\bar{v} (cm/s)	41,13
Q (l/s)	27,637

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.4. Ensayo 2.3, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	22,8	cm
Área de la sección = B·H	684	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,9	42,02
0,2·H = 4,56 cm	1,2	48,52
0,4·H = 9,12 cm	0,7	37,06
0,6·H = 13,68 cm	0,6	34,31
0,8·H = 18,24 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 22,8 cm	0,3	24,26

\bar{v} (cm/s)	36,21
Q (l/s)	24,767

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.5. **Ensayo 2.4, tubo de Prandtl**

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	23	cm
Área de la sección = B·H	690	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,1	46,46
0,2·H = 4,6 cm	1,1	46,46
0,4·H = 9,2 cm	0,8	39,62
0,6·H = 13,8 cm	0,7	37,06
0,8·H = 18,4 cm	0,6	34,31
Cercano al fondo del canal ≈ 23 cm	0,4	28,01

\bar{v} (cm/s)	38,94
Q (l/s)	26,866

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.6. **Ensayo 2.5, tubo de Prandtl**

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	23.4	cm
Área de la sección = B·H	702	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,9	42,02
0,2·H = 4,68 cm	0,8	39,62
0,4·H = 9,36 cm	0,7	37,06
0,6·H = 14,04 cm	0,7	37,06
0,8·H = 18,72 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 23,4 cm	0,4	28,01

\bar{v} (cm/s)	35,35
Q (l/s)	24,818

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.7. **Resumen ensayo 2.0, tubo de Prandtl**

Q promedio (l/s)	26,028
-------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.8. **Prueba 2, vertedero rectangular**

	Valor medido (cm)	$Q = 0,306 \cdot H^{1,659}$	Q (l/s)	
h₀	21,9			13,955
h₁	11,9			
H = h₀ - h₁	10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.9. **Prueba 2, vertedero rectangular (ecuación alterna)**

	Valor medido (cm)	$Q = (1,197) \cdot (0,0184) \cdot (L - 0,2H) \cdot H^{3/2}$	Q (l/s)	
h₀	21,9			14,417
h₁	11,9			
L	22,7			
H = h₀ - h₁	10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.10. **Inyección constante 2.1**

$C_0 =$	203	mg/l
$C_1 =$	1 694,00	mg/l
$q =$	0,021168	l/s

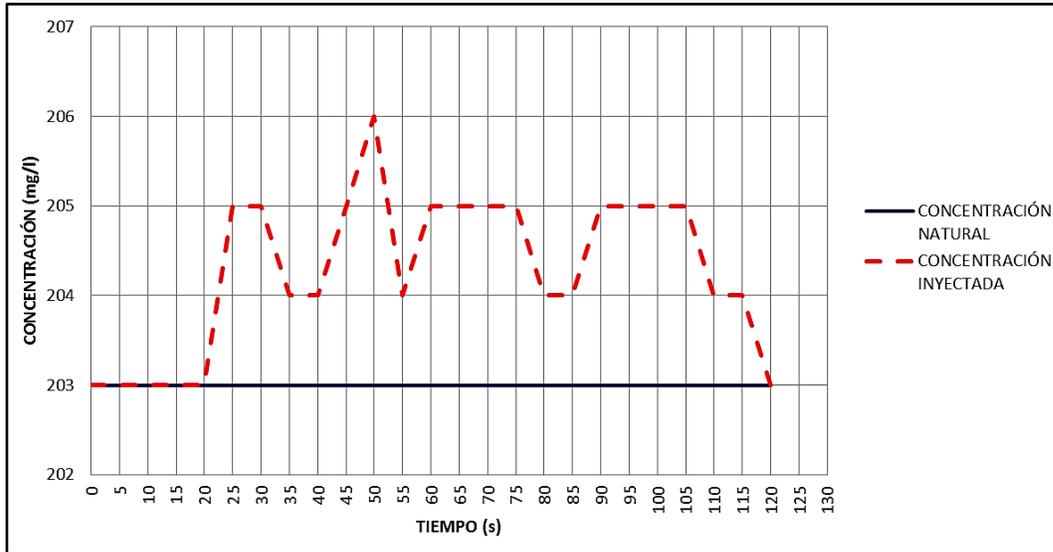
Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	203	203,00
5	203	203,00
10	203	203,00
15	203	203,00
20	203	203,00
25	203	205,00
30	203	205,00
35	203	204,00
40	203	204,00
45	203	205,00
50	203	206,00
55	203	204,00
60	203	205,00
65	203	205,00
70	203	205,00
75	203	205,00
80	203	204,00
85	203	204,00
90	203	205,00
95	203	205,00
100	203	205,00
105	203	205,00
110	203	204,00
115	203	204,00
120	203	203,00

C_2 (promedio, mg/l) =	204,6842
--	-----------------

$Q_{iny_C_2.1}$ =	18,7182	l/s
---------------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.1. Inyección constante 2.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.11. Inyección constante 2.2

$C_0 =$	203	mg/l
$C_1 =$	1 691,00	mg/l
$q =$	0,0212	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	203	203,00
5	203	203,00
10	203	203,00
15	203	203,00
20	203	204,00

Continuación de la tabla 2.11.

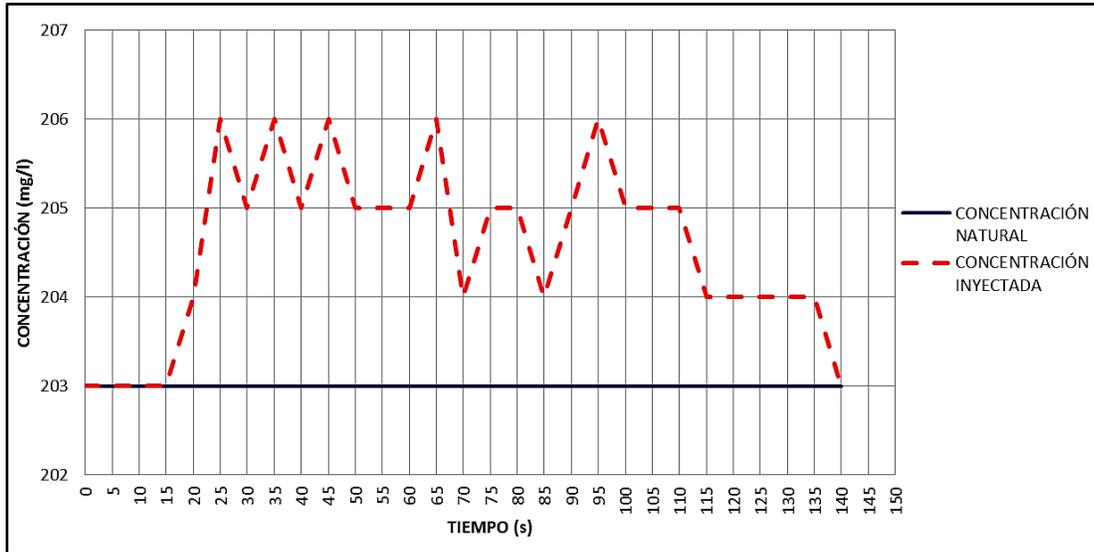
25	203	206,00
30	203	205,00
35	203	206,00
40	203	205,00
45	203	206,00
50	203	205,00
55	203	205,00
60	203	205,00
65	203	206,00
70	203	204,00
75	203	205,00
80	203	205,00
85	203	204,00
90	203	205,00
95	203	206,00
100	203	205,00
105	203	205,00
110	203	205,00
115	203	204,00
120	203	204,00
125	203	204,00
130	203	204,00
135	203	204,00
140	203	203,00

C₂ (promedio, mg/l) =	204,7222
---	-----------------

Q_{iny_C_2.2} =	18,2677	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.2. Inyección constante 2.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.12. Inyección constante 2.3

$C_0 =$	204	mg/l
$C_1 =$	1 691,00	mg/l
$q =$	0,0212	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	204	204,00
5	204	204,00
10	204	204,00
15	204	204,00
20	204	204,00

Continuación de la tabla 2.12.

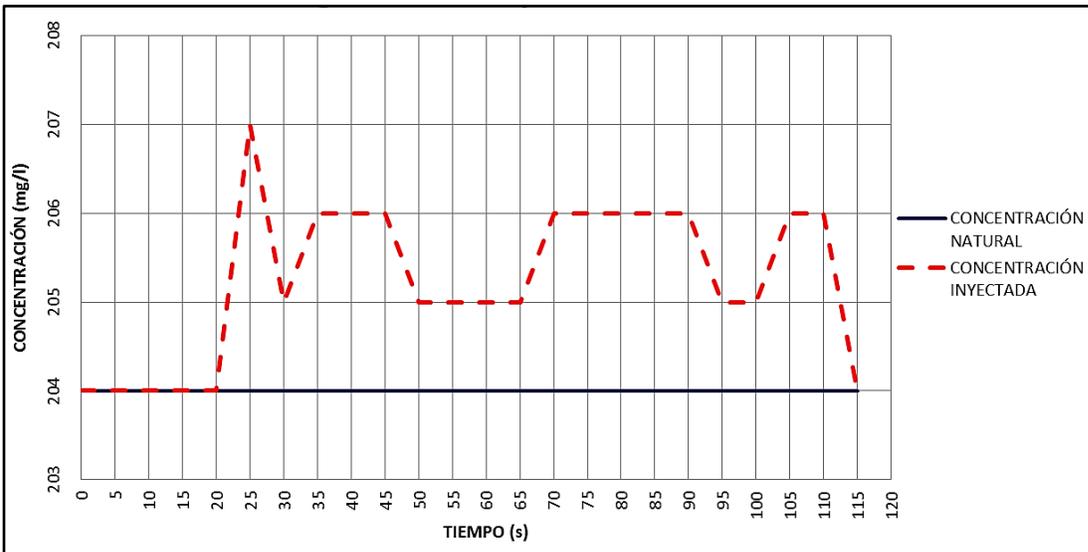
25	204	207,00
30	204	205,00
35	204	206,00
40	204	206,00
45	204	206,00
50	204	205,00
55	204	205,00
60	204	205,00
65	204	205,00
70	204	206,00
75	204	206,00
80	204	206,00
85	204	206,00
90	204	206,00
95	204	205,00
100	204	205,00
105	204	206,00
110	204	206,00
115	204	204,00

C₂ (promedio, mg/l) =	205,7778
---	-----------------

Q_{iny_C_2.3} =	17,6843	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.3. Inyección constante 2.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.13. Inyección constante 2.4

$C_0 =$	204	mg/l
$C_1 =$	1 692,00	mg/l
$q =$	0,0212	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	204	204,00
5	204	204,00
10	204	204,00
15	204	204,00
20	204	204,00

Continuación de la tabla 2.13.

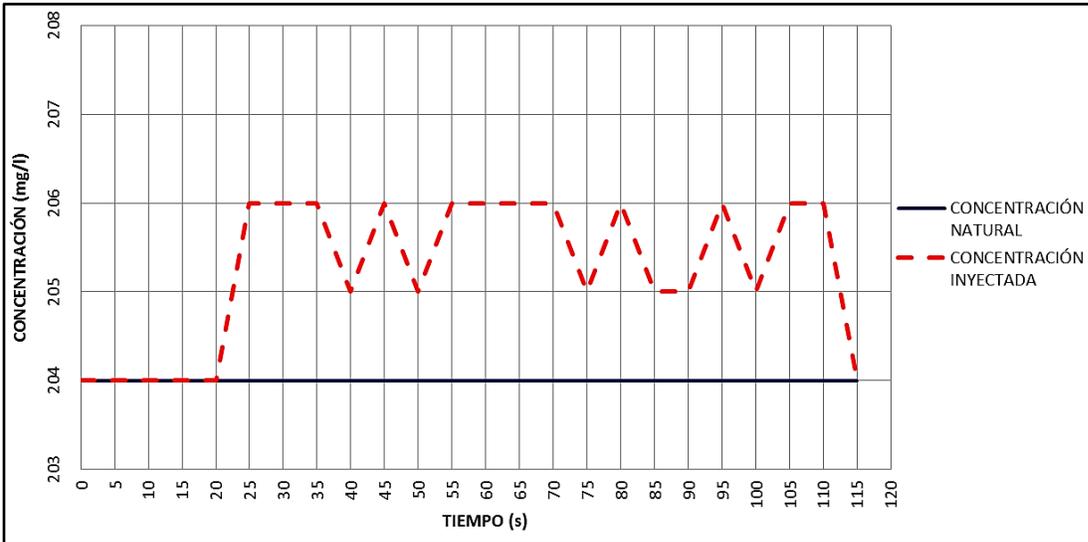
25	204	206,00
30	204	206,00
35	204	206,00
40	204	205,00
45	204	206,00
50	204	205,00
55	204	206,00
60	204	206,00
65	204	206,00
70	204	206,00
75	204	205,00
80	204	206,00
85	204	205,00
90	204	205,00
95	204	206,00
100	204	205,00
105	204	206,00
110	204	206,00
115	204	204,00

C₂ (promedio, mg/l) =	205,8000
---	-----------------

Q_{iny_C_2.4} =	17,4774	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.4. Inyección constante 2.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.14. Inyección constante 2.5

$C_0 =$	205	mg/l
$C_1 =$	1 691,00	mg/l
$q =$	0,0212	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	205	205,00
5	205	205,00
10	205	205,00
15	205	205,00
20	205	205,00

Continuación de la tabla 2.14.

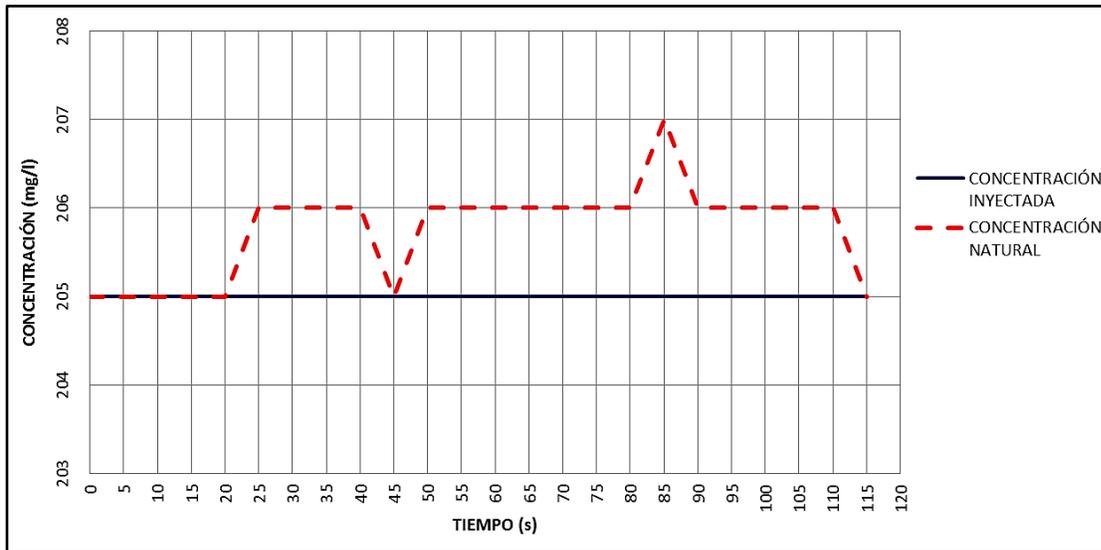
25	205	206,00
30	205	206,00
35	205	206,00
40	205	206,00
45	205	205,00
50	205	206,00
55	205	206,00
60	205	206,00
65	205	206,00
70	205	206,00
75	205	206,00
80	205	206,00
85	205	207,00
90	205	206,00
95	205	206,00
100	205	206,00
105	205	206,00
110	205	206,00
115	205	205,00

C₂ (promedio, mg/l) =	206,0833
---	-----------------

Q_{iny_C_2.5} =	29,0144	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.5. Inyección constante 2.5



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.15. Aforo para frasco de Mariotte para determinar el caudal “q”

Tiempo (s)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
46,94	1,00	0,0213
47,84	1,00	0,0209
47,64	1,00	0,0210
46,18	1,00	0,0217
47,65	1,00	0,0210
q_{iny_prom}		0,0212

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.16. Inyección puntual 2.1

$$C_0 = 188 \text{ mg/l}$$

$$C_1 = 1939 \text{ mg/l}$$

$$V = 12 \text{ l}$$

$$\Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	188	188	0
5	188	188	0
10	188	188	0
15	188	188	0
20	188	188	0
25	188	219	31
30	188	201	13
35	188	208	20
40	188	209	21
45	188	208	20
50	188	211	23
55	188	202	14
60	188	202	14
65	188	199	11
70	188	196	8
75	188	200	12
80	188	196	8
85	188	195	7
90	188	194	6
95	188	192	4
100	188	190	2
105	188	190	2
110	188	190	2
115	188	191	3
120	188	190	2
125	188	191	3
130	188	190	2
135	188	190	2
140	188	190	2
145	188	190	2
150	188	188	0

Atrap_I
0
0
0
0
77,5
110
82,5
102,5
102,5
107,5
92,5
70
62,5
47,5
50
50
37,5
32,5
25
15
10
10
12,5
12,5
12,5
12,5
10
10
10
5

$$\sum (C_2 - C_1) = 234$$

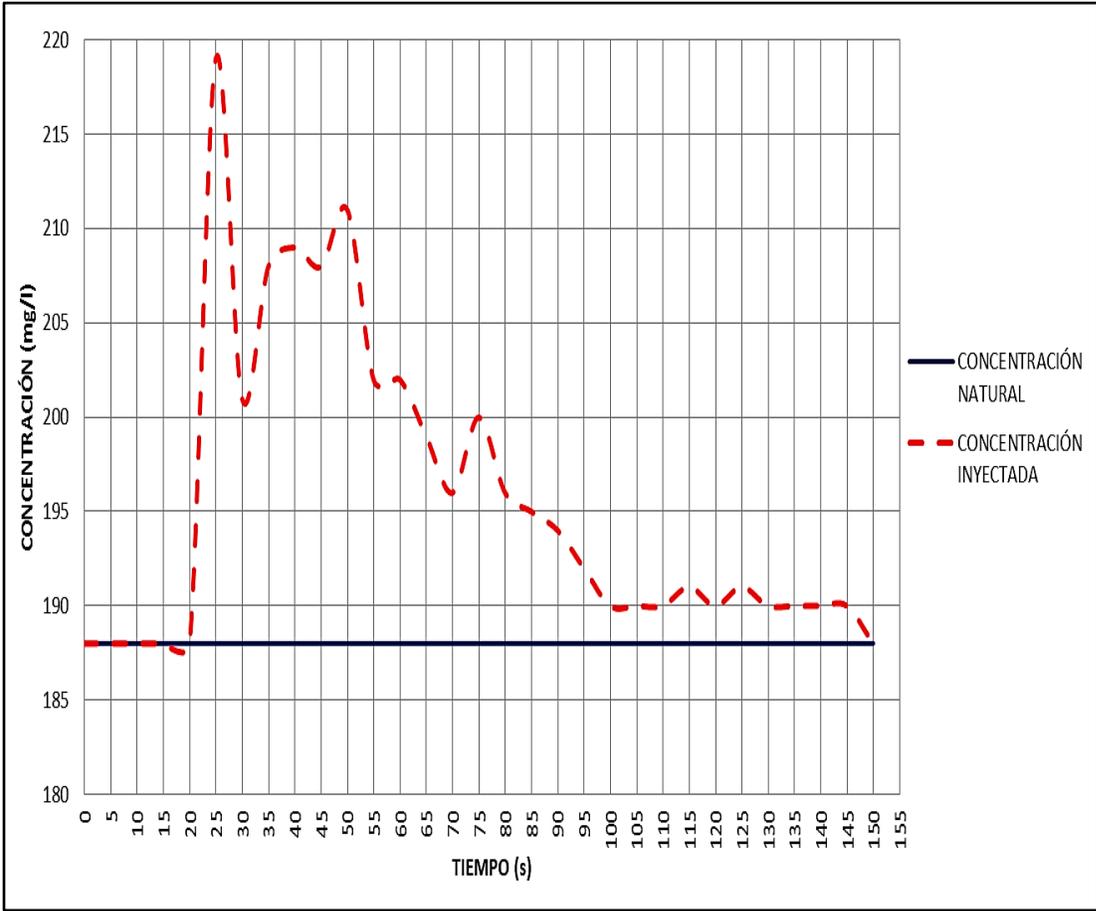
$$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) = 1170$$

$$\sum \text{Atrap}_I = 1170$$

$$Q_{iny_P_2.1} = 17,959 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.6. Inyección puntual 2.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.17. Inyección puntual 2.2

$$C_0 = 191 \text{ mg/l} \quad V = 12 \text{ l}$$

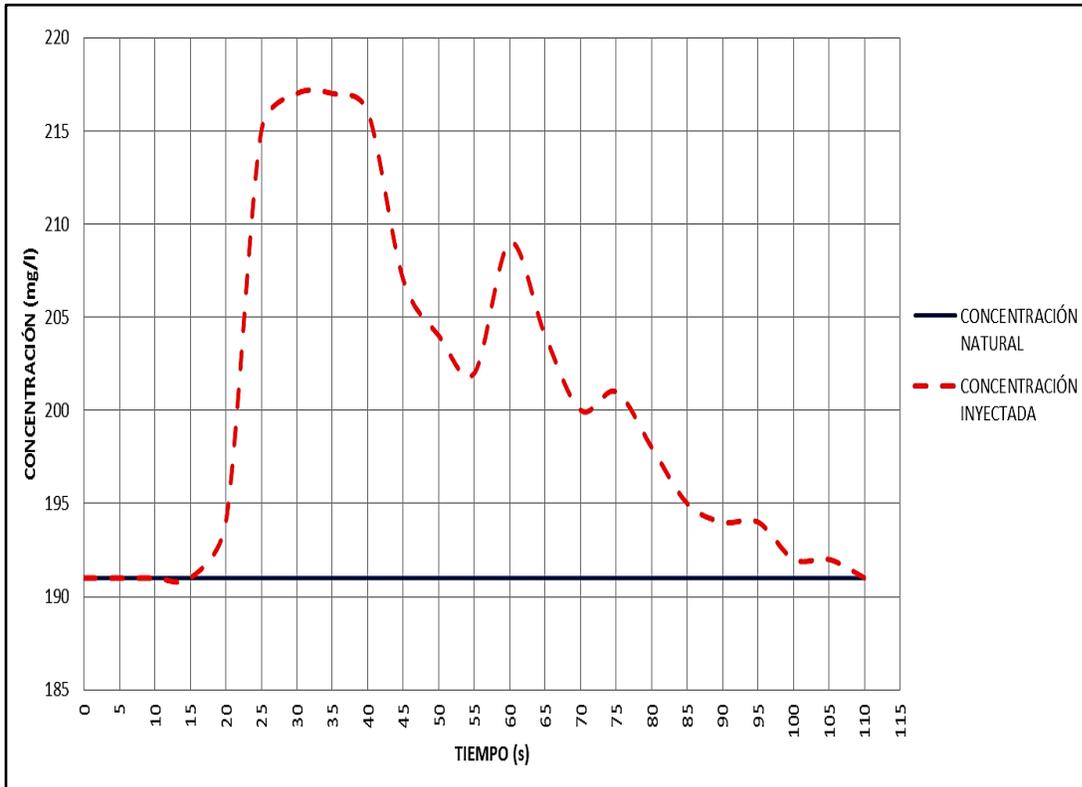
$$C_1 = 1957 \text{ mg/l} \quad \Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_I
0	191	191	0	0
5	191	191	0	0
10	191	191	0	0
15	191	191	0	0
20	191	194	3	7,5
25	191	215	24	67,5
30	191	217	26	125
35	191	217	26	130
40	191	216	25	127,5
45	191	207	16	102,5
50	191	204	13	72,5
55	191	202	11	60
60	191	209	18	72,5
65	191	204	13	77,5
70	191	200	9	55
75	191	201	10	47,5
80	191	198	7	42,5
85	191	195	4	27,5
90	191	194	3	17,5
95	191	194	3	15
100	191	192	1	10
105	191	192	1	5
110	191	191	0	2,5
			$\sum (C_2 - C_1) = 213$	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) = 1065$	$\sum \text{Atrap}_I = 1065$

$$Q_{iny_P_22} = 19,899 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.7. Inyección puntual 2.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.18. **Inyección puntual 2.3**

$$C_0 = \begin{matrix} 194 \\ 1957 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

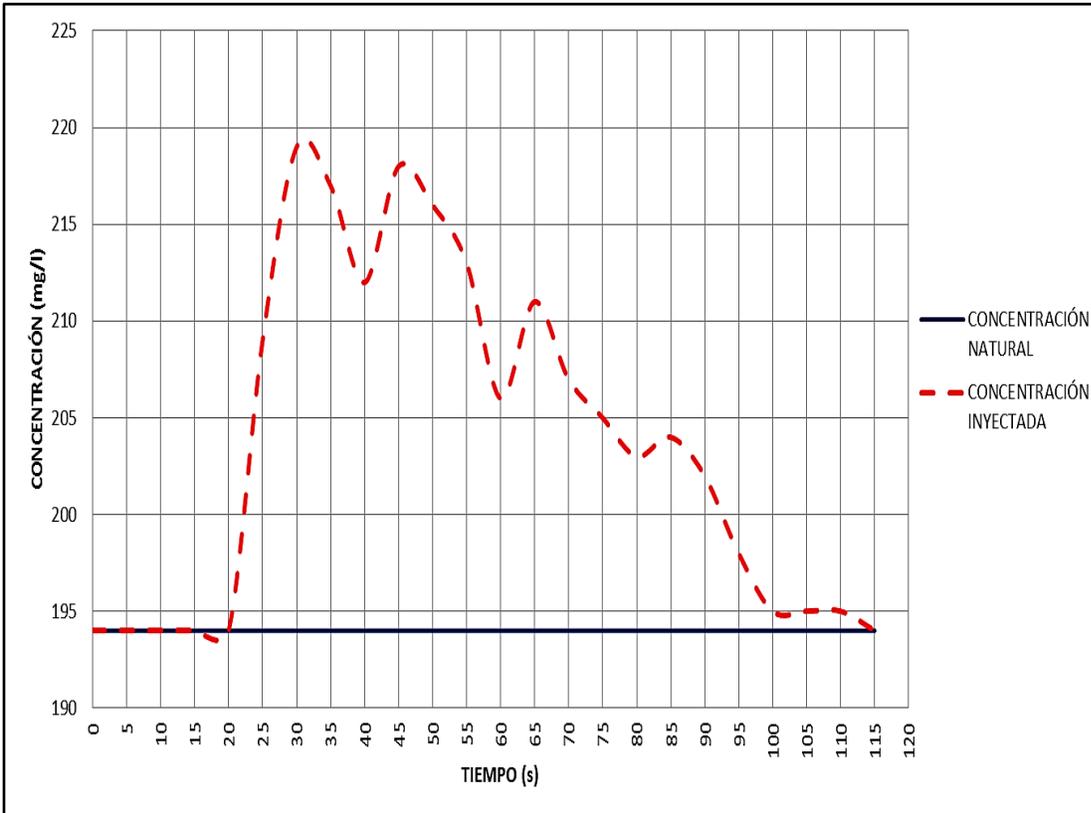
$$C_1 = \begin{matrix} 194 \\ 1957 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad \Delta t = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	194	194	0	0	
5	194	194	0	0	
10	194	194	0	0	
15	194	194	0	0	
20	194	194	0	0	
25	194	209	15	37,5	
30	194	219	25	100	
35	194	217	23	120	
40	194	212	18	102,5	
45	194	218	24	105	
50	194	216	22	115	
55	194	213	19	102,5	
60	194	206	12	77,5	
65	194	211	17	72,5	
70	194	207	13	75	
75	194	205	11	60	
80	194	203	9	50	
85	194	204	10	47,5	
90	194	202	8	45	
95	194	198	4	30	
100	194	195	1	12,5	
105	194	195	1	5	
110	194	195	1	5	
115	194	194	0	2,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	233	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1 165	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	1 165

$$Q_{iny_P_2.3} = \begin{matrix} 18,160 \\ 18,160 \end{matrix} \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.8. Inyección puntual 2.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.19. Inyección puntual 2.4

$$C_0 = \begin{matrix} 197 \\ 1958 \end{matrix} \text{ mg/l}$$

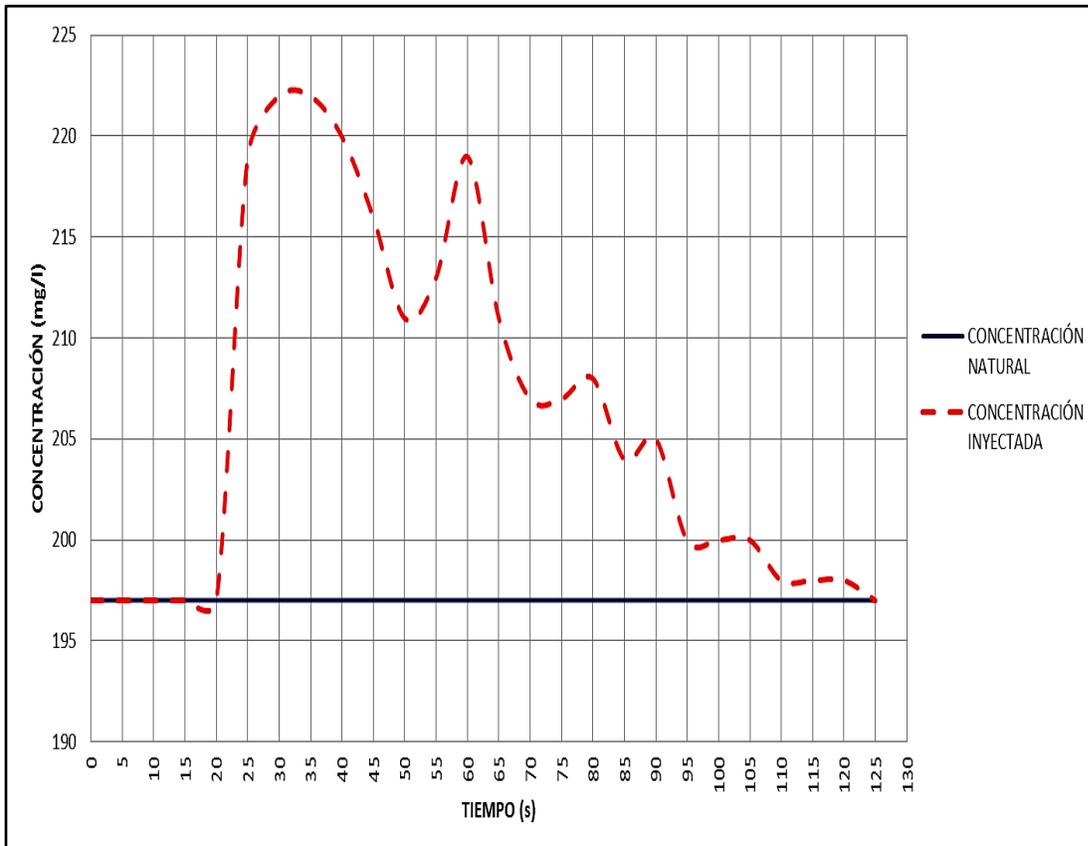
$$V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	197	197	0	0	
5	197	197	0	0	
10	197	197	0	0	
15	197	197	0	0	
20	197	197	0	0	
25	197	219	22	55	
30	197	222	25	117,5	
35	197	222	25	125	
40	197	220	23	120	
45	197	216	19	105	
50	197	211	14	82,5	
55	197	213	16	75	
60	197	219	22	95	
65	197	211	14	90	
70	197	207	10	60	
75	197	207	10	50	
80	197	208	11	52,5	
85	197	204	7	45	
90	197	205	8	37,5	
95	197	200	3	27,5	
100	197	200	3	15	
105	197	200	3	15	
110	197	198	1	10	
115	197	198	1	5	
120	197	198	1	5	
125	197	197	0	2,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	238	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1 190	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	1 190

$$Q_{iny_P_2.4} = 17,758 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.9. Inyección puntual 2.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.20. Inyección puntual 2.5

$$C_0 = 200 \text{ mg/l} \quad V = 12 \text{ l}$$

$$C_1 = 1958 \text{ mg/l} \quad \Delta t = 5 \text{ s}$$

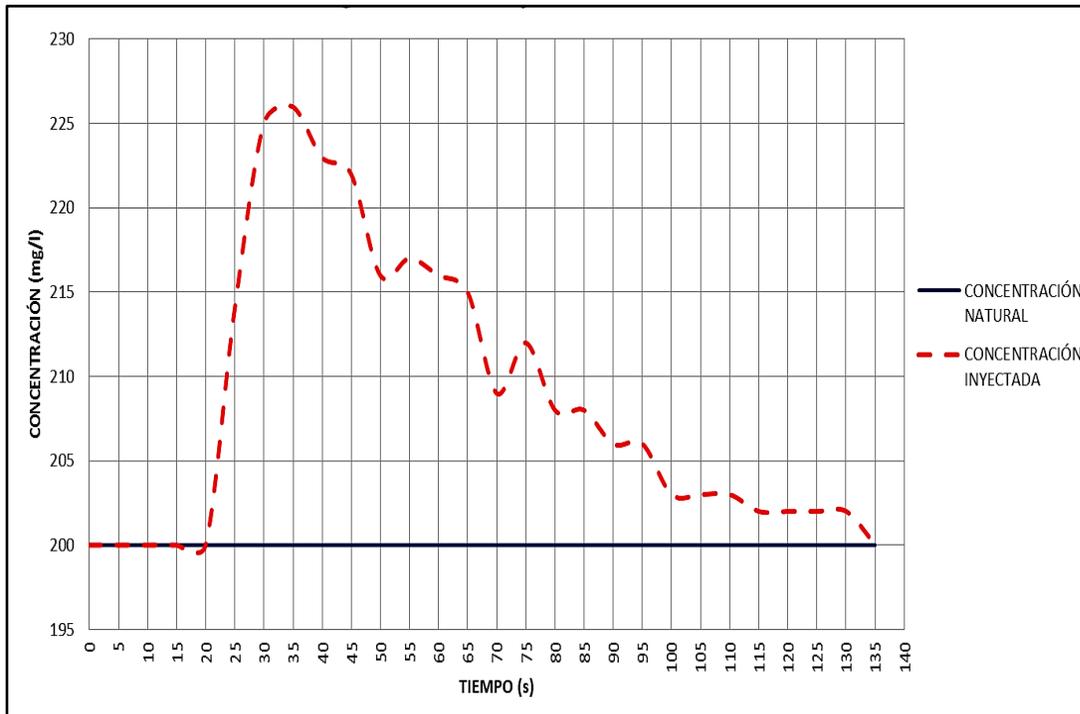
Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	200	200	0
5	200	200	0
10	200	200	0
15	200	200	0
20	200	200	0
25	200	214	14
30	200	225	25
35	200	226	26
40	200	223	23
45	200	222	22
50	200	216	16
55	200	217	17
60	200	216	16
65	200	215	15
70	200	209	9
75	200	212	12
80	200	208	8
85	200	208	8
90	200	206	6
95	200	206	6
100	200	203	3
105	200	203	3
110	200	203	3
115	200	202	2
120	200	202	2
125	200	202	2
130	200	202	2
135	200	200	0
		$\sum (C_2 - C_1) =$	240
		$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1 200

Atrap_i	
0	
0	
0	
35	
97,5	
127,5	
122,5	
112,5	
95	
82,5	
82,5	
77,5	
60	
52,5	
50	
40	
35	
30	
22,5	
15	
15	
12,5	
10	
10	
10	
5	
$\sum \text{Atrap}_i =$	1 200

$$Q_{iny_P_2.5} = 17,580 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 2.10. Inyección puntual 2.5



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Datos de la prueba 3

Tabla 3.1. Aforo volumétrico de la prueba 3

Aforo volumétrico	Tiempo (S)	Volumen (l)	Caudal (l/S)
3.1	43,05	496,70	11,538
3.2	45,00	516,40	11,476
3.3	43,63	504,20	11,556
3.4	42,33	492,20	11,628
3.5	42,99	493,70	11,484

Qvol. promedio	11,536
-----------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.2. Ensayo 3.1, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	20,3	cm
Área de la sección = B·H	609	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,5	31,32
0,2·H = 4,06 cm	0,7	37,06
0,4·H = 8,12 cm	0,6	34,31
0,6·H = 12,18 cm	0,6	34,31
0,8·H = 16,24 cm	0,5	31,32
Cercano al fondo del canal $\approx 20,3$ cm	0,4	28,01

\bar{v} (cm/s)	33,33
Q (l/s)	20,300

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.3. Ensayo 3.2, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	20,6	cm
Área de la sección = B·H	618	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,6	34,31
0,2·H = 4,12 cm	0,6	34,31
0,4·H = 8,24 cm	0,5	31,32
0,6·H = 12,36 cm	0,4	28,01
0,8·H = 16,48 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 20,6 cm	0,2	19,81

\bar{v} (cm/s)	29,74
Q (l/s)	18,382

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.4. Ensayo 3.3, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	20,9	cm
Área de la sección = B·H	627	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,7	37,06
0,2·H = 4,18 cm	0,5	31,32
0,4·H = 8,36 cm	0,6	34,31
0,6·H = 12,54 cm	0,5	31,32
0,8·H = 16,72 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 20,9 cm	0,3	24,26

\bar{v} (cm/s)	31,13
Q (l/s)	19,516

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.5. Ensayo 3.4, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	21,3	cm
Área de la sección = B·H	639	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,8	39,62
0,2·H = 4,26 cm	0,7	37,06
0,4·H = 8,52 cm	0,5	31,32
0,6·H = 12,78 cm	0,5	31,32
0,8·H = 17,04 cm	0,4	28,01
Cercano al fondo del canal ≈ 21,3 cm	0,2	19,81

\bar{v} (cm/s)	31,49
Q (l/s)	20,119

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.6. Ensayo 3.5, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	21,7	cm
Área de la sección = B·H	651	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0,7	37,06
0,2·H = 4,34 cm	0,6	34,31
0,4·H = 8,68 cm	0,6	34,31
0,6·H = 13,02 cm	0,4	28,01
0,8·H = 17,36 cm	0,3	24,26
Cercano al fondo del canal ≈ 21,7 cm	0,2	19,81

\bar{v} (cm/s)	29,87
Q (l/s)	19,443

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.7. **Resumen ensayo 3.0, tubo de Prandtl**

Qpromedio (l/s)	19,552
------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.8. **Prueba 3, vertedero trapezoidal**

	Valor medido (cm)	$Q = 0,217 \cdot H^{1,745}$	Q (l/s)	
h₀	20,3			12,274
h₁	10,2			
H = h₀ - h₁	10,1			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.9. **Prueba 3, vertedero trapezoidal (ecuación alterna)**

	Valor medido (cm)	$Q = (1,268) \cdot (0,01859) \cdot L \cdot H^{3/2}$	Q (l/s)	
h₀	20,3			13 090
h₁	10,2			
L	17,3			
H = h₀ - h₁	10,1			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.10. Inyección constante 3.1

$C_0 =$	184	mg/l
$C_1 =$	1 937,00	mg/l
$q =$	0,021426	l/s

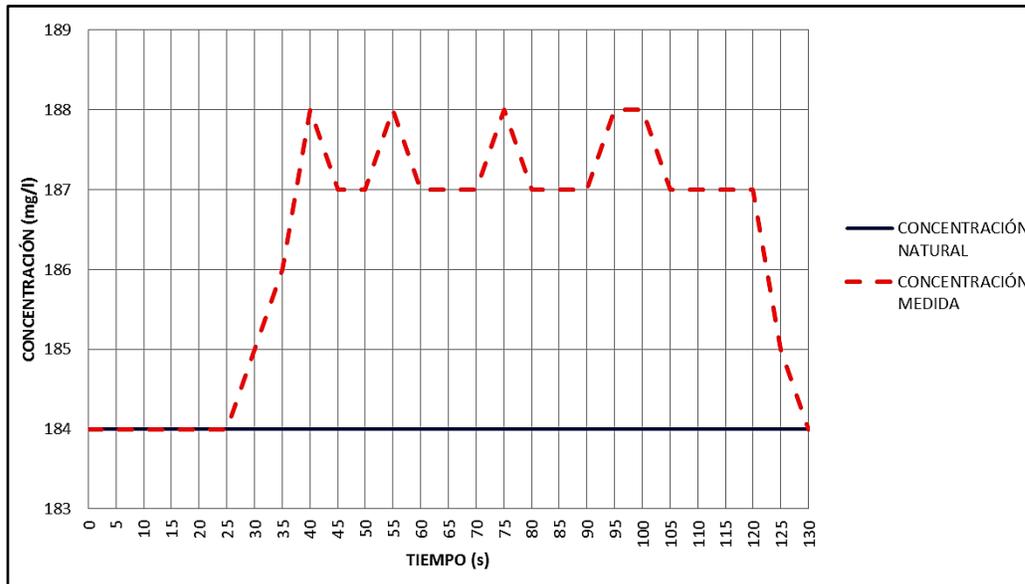
Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	184	184,00
5	184	184,00
10	184	184,00
15	184	184,00
20	184	184,00
25	184	184,00
30	184	185,00
35	184	186,00
40	184	188,00
45	184	187,00
50	184	187,00
55	184	188,00
60	184	187,00
65	184	187,00
70	184	187,00
75	184	188,00
80	184	187,00
85	184	187,00
90	184	187,00
95	184	188,00
100	184	188,00
105	184	187,00
110	184	187,00
115	184	187,00
120	184	187,00
125	184	185,00
130	184	184,00

C_2 (promedio, mg/l) =	187,2500
--------------------------	-----------------

$Q_{iny_C_3.1} =$	11,5356	l/s
---------------------	----------------	-----

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.1. Inyección constante 3.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.11. Inyección constante 3.2

C₀ =	185	mg/l
C₁ =	1 934,00	mg/l
q =	0,0214	l/s

Tiempo (s)	C ₀ (mg/l)	C ₂ (mg/l)
0	185	185,00
5	185	185,00
10	185	185,00
15	185	185,00
20	185	185,00
25	185	185,00

Continuación de la tabla 3.11.

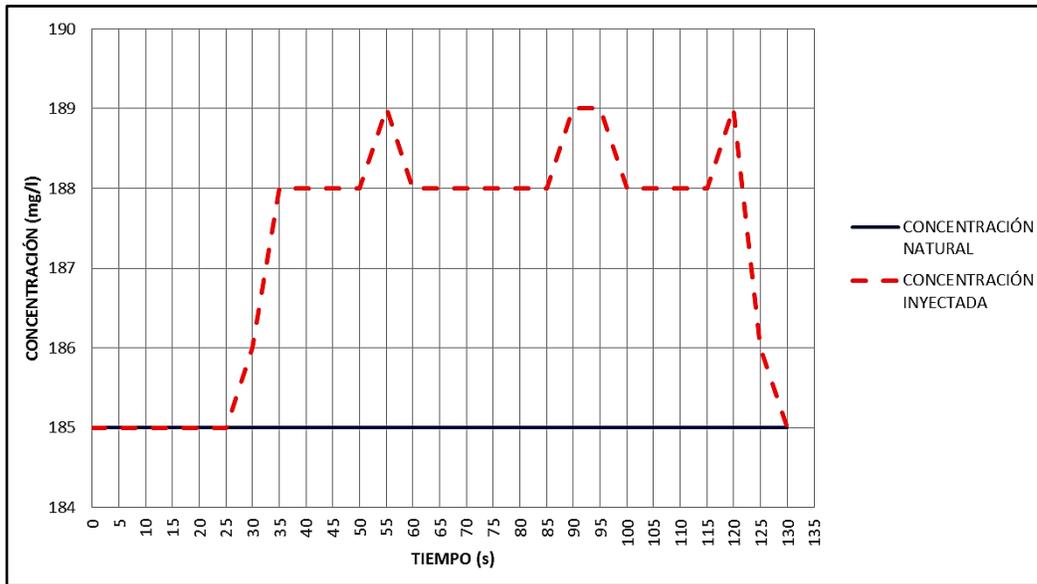
30	185	186,00
35	185	188,00
40	185	188,00
45	185	188,00
50	185	188,00
55	185	189,00
60	185	188,00
65	185	188,00
70	185	188,00
75	185	188,00
80	185	188,00
85	185	188,00
90	185	189,00
95	185	189,00
100	185	188,00
105	185	188,00
110	185	188,00
115	185	188,00
120	185	189,00
125	185	186,00
130	185	185,00

C₂ (promedio, mg/l) =	188,1765
---	-----------------

Q_{iny_C_3.2} =	11,7761	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.2. Inyección constante 3.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.12. Inyección constante 3.3

$C_0 =$	185	mg/l
$C_1 =$	1 934,00	mg/l
$q =$	0,0214	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	185	185,00
5	185	185,00
10	185	185,00
15	185	185,00
20	185	185,00
25	185	185,00

Continuación de la tabla 3.12.

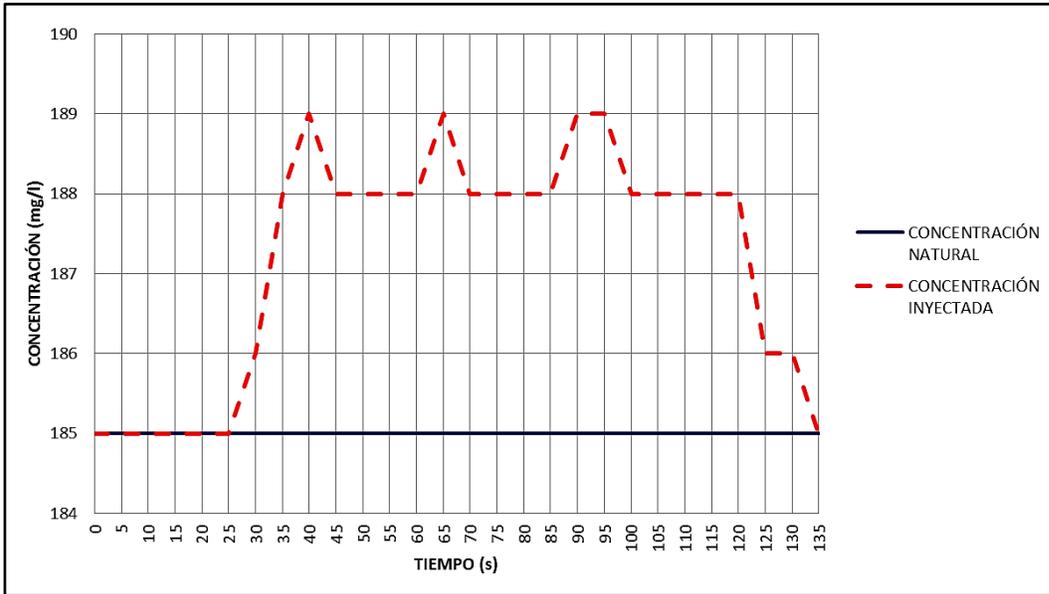
30	185	186,00
35	185	188,00
40	185	189,00
45	185	188,00
50	185	188,00
55	185	188,00
60	185	188,00
65	185	189,00
70	185	188,00
75	185	188,00
80	185	188,00
85	185	188,00
90	185	189,00
95	185	189,00
100	185	188,00
105	185	188,00
110	185	188,00
115	185	188,00
120	185	188,00
125	185	186,00
130	185	186,00
135	185	185,00

C2 (promedio, mg/l) =	188,1875
------------------------------	-----------------

Qiny_C_3.3 =	11,7353	l/s
---------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.3. Inyección constante 3.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.13. Inyección constante 3.4

$C_0 =$	186	mg/l
$C_1 =$	1 934,00	mg/l
$q =$	0,0214	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	186	186,00
5	186	186,00
10	186	186,00
15	186	186,00
20	186	186,00
25	186	186,00

Continuación de la tabla 3.13.

30	186	186,00
35	186	188,00
40	186	188,00
45	186	188,00
50	186	188,00
55	186	189,00
60	186	189,00
65	186	189,00
70	186	189,00
75	186	189,00
80	186	188,00
85	186	189,00
90	186	190,00
95	186	190,00
100	186	190,00
105	186	188,00
110	186	189,00
115	186	188,00
120	186	188,00
125	186	186,00

C₂ (promedio, mg/l) =	189,0833
---	-----------------

Q_{iny_C_3.4} =	12,1256	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.4. Inyección constante 3.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.14. Inyección constante 3.5

$C_0 =$	186	mg/l
$C_1 =$	1 932,00	mg/l
$q =$	0,0214	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	186	186,00
5	186	186,00
10	186	186,00
15	186	186,00
20	186	186,00
25	186	186,00

Continuación de la tabla 3.14.

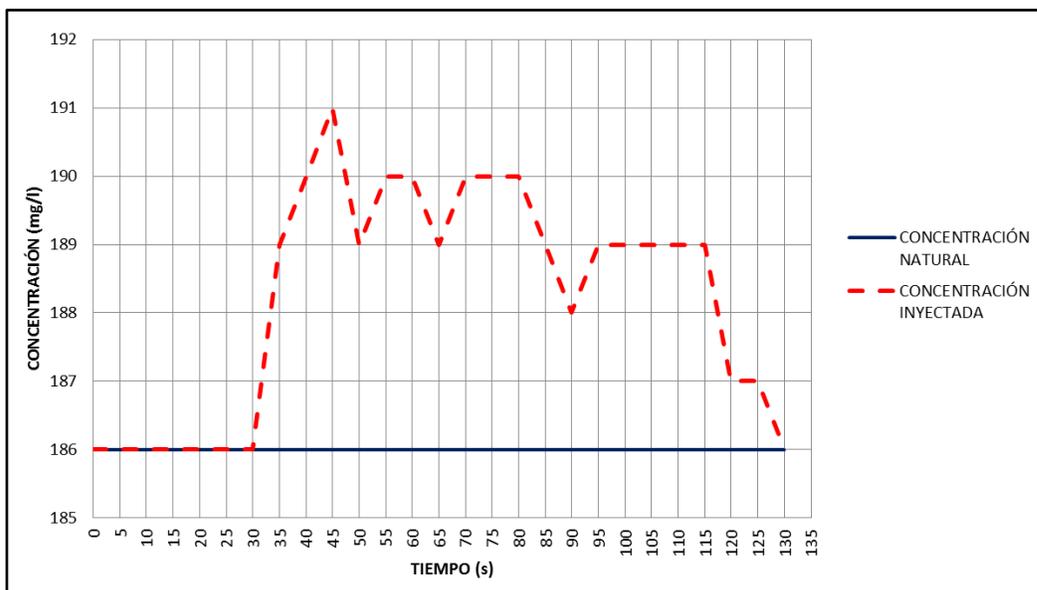
30	186	186,00
35	186	189,00
40	186	190,00
45	186	191,00
50	186	189,00
55	186	190,00
60	186	190,00
65	186	189,00
70	186	190,00
75	186	190,00
80	186	190,00
85	186	189,00
90	186	188,00
95	186	189,00
100	186	189,00
105	186	189,00
110	186	189,00
115	186	189,00
120	186	187,00
125	186	187,00
130	186	186,00

C₂ (promedio, mg/l) =	189,2000
---	-----------------

Q_{iny_C_3.5} =	11,6693	l/s
--------------------------------	----------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.5. Inyección constante 3.5



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.15. Aforo para frasco de Mariotte para determinar el caudal “q”

Tiempo (s)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
45,96	1,00	0,0218
46,16	1,00	0,0217
46,54	1,00	0,0215
47,04	1,00	0,0213
47,7	1,00	0,0210

q_{iny_prom}	0,0214	l/s
-----------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.16. Inyección puntual 3.1

$$C_0 = \frac{187}{1\ 691} \text{ mg/l}$$

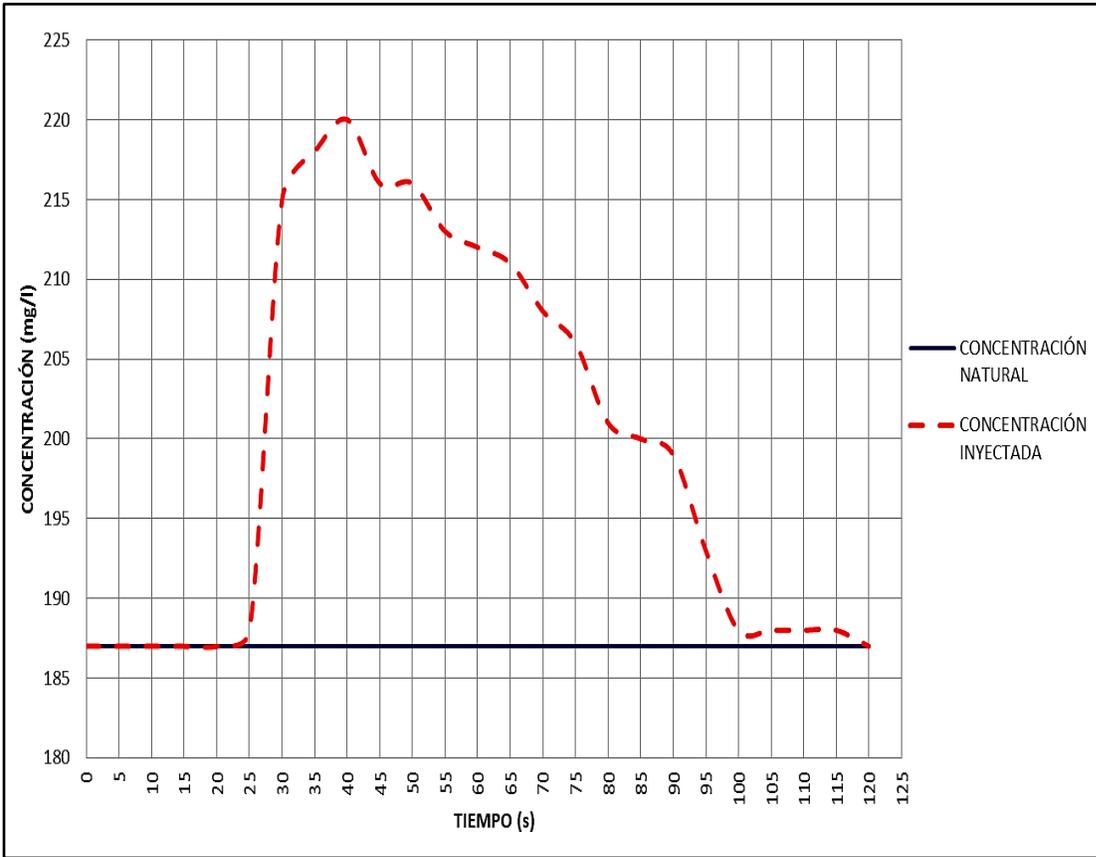
$$V = \frac{12\ \text{l}}{5\ \text{s}}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	187	187	0	0
5	187	187	0	0
10	187	187	0	0
15	187	187	0	0
20	187	187	0	0
25	187	188	1	2,5
30	187	215	28	72,5
35	187	218	31	147,5
40	187	220	33	160
45	187	216	29	155
50	187	216	29	145
55	187	213	26	137,5
60	187	212	25	127,5
65	187	211	24	122,5
70	187	208	21	112,5
75	187	206	19	100
80	187	201	14	82,5
85	187	200	13	67,5
90	187	199	12	62,5
95	187	193	6	45
100	187	188	1	17,5
105	187	188	1	5
110	187	188	1	5
115	187	188	1	5
120	187	187	0	2,5
		$\Sigma (C2 - C1) =$	315	
		$\Delta t \cdot \Sigma (C2 - C1) =$	1 575	
				$\Sigma \text{Atrap}_i =$ 1 575

$$Q_{iny_P_3.1} = 11,459 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.6. Inyección puntual 3.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.17. Inyección puntual 3.2

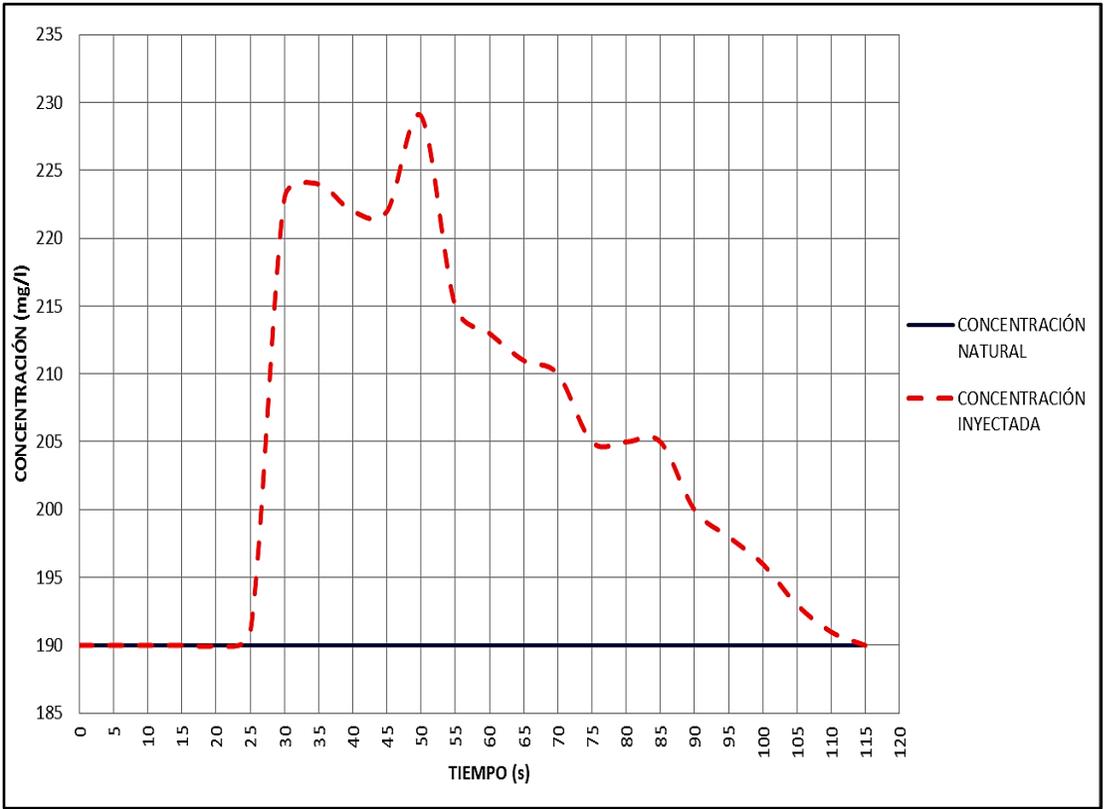
$$C_0 = \begin{matrix} 190 \\ 1687 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	190	190	0	0	
5	190	190	0	0	
10	190	190	0	0	
15	190	190	0	0	
20	190	190	0	0	
25	190	191	1	2,5	
30	190	223	33	85	
35	190	224	34	167,5	
40	190	222	32	165	
45	190	222	32	160	
50	190	229	39	177,5	
55	190	215	25	160	
60	190	213	23	120	
65	190	211	21	110	
70	190	210	20	102,5	
75	190	205	15	87,5	
80	190	205	15	75	
85	190	205	15	75	
90	190	200	10	62,5	
95	190	198	8	45	
100	190	196	6	35	
105	190	193	3	22,5	
110	190	191	1	10	
115	190	190	0	2,5	
			$\Sigma (C_2 - C_1) =$	333	
			$\Delta t \cdot \Sigma (C_2 - C_1) =$	1 665	
				$\Sigma \text{Atrap}_i =$	1 665

$$Q_{iny_P_3.2} = \begin{matrix} 10,7892 \\ \text{l/s} \end{matrix}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.7. Inyección puntual 3.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.18. Inyección puntual 3.3

$$C_0 = \frac{193}{1\ 689,00} \text{ mg/l} \qquad V = \frac{12 \text{ l}}{5 \text{ s}}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	193	193	0	0
5	193	193	0	0
10	193	193	0	0
15	193	193	0	0,0
20	193	193	0	0
25	193	193	0	0
30	193	225	32	80
35	193	228	35	167,5
40	193	222	29	160,0
45	193	220	27	140
50	193	225	32	147,5
55	193	217	24	140
60	193	215	22	115
65	193	213	20	105
70	193	211	18	95
75	193	211	18	90
80	193	208	15	82,5
85	193	204	11	65
90	193	204	11	55
95	193	203	10	52,5
100	193	199	6	40
105	193	194	1	17,5
110	193	193	0	2,5

$$\sum (C_2 - C_1) = 311$$

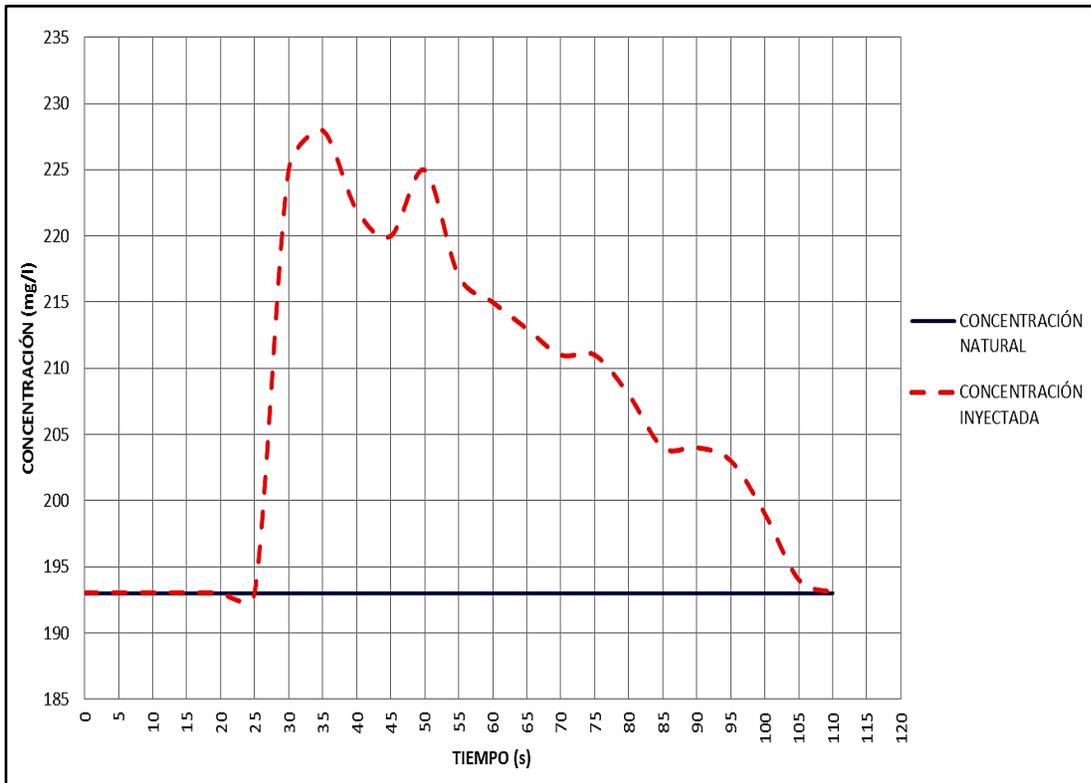
$$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) = 1\ 555$$

$$\sum \text{Atrap}_i = 1\ 555$$

$$Q_{iny_P_3.3} = 11,545 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.8. Inyección puntual 3.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.19. Inyección puntual 3.4

$$C0 = \frac{195}{1689.00} \text{ mg/l}$$

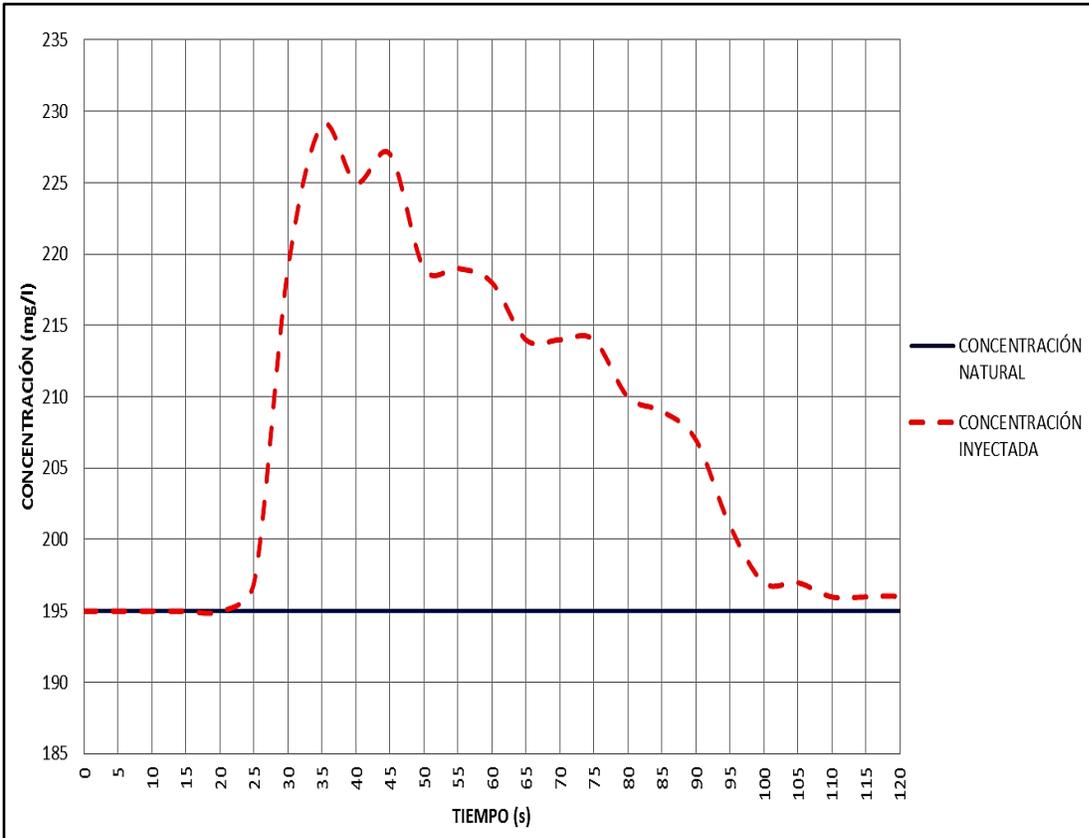
$$V = \frac{12 \text{ l}}{5 \text{ s}}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	195	195	0	0
5	195	195	0	0
10	195	195	0	0
15	195	195	0	0
20	195	195	0	0
25	195	197	2	5
30	195	219	24	65
35	195	229	34	145
40	195	225	30	160
45	195	227	32	155
50	195	219	24	140
55	195	219	24	120
60	195	218	23	117,5
65	195	214	19	105
70	195	214	19	95
75	195	214	19	95
80	195	210	15	85
85	195	209	14	72,5
90	195	207	12	65
95	195	201	6	45
100	195	197	2	20
105	195	197	2	10
110	195	196	1	7,5
115	195	196	1	5
120	195	196	1	5
125	195	195	0	2,5
		$\Sigma (C2 - C1) =$	304	
		$\Delta t \cdot \Sigma (C2 - C1) =$	1 520	
		$\Sigma \text{Atrap}_i =$	520	

$$Q_{iny_P_3.4} = 11,795 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.9. Inyección puntual 3.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.20. Inyección puntual 3.5

$$C_0 = 198 \text{ mg/l}$$

$$C_1 = 1689 \text{ mg/l}$$

$$V = 12 \text{ l}$$

$$\Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	198	198	0
5	198	198	0
10	198	198	0
15	198	198	0
20	198	198	0
25	198	198	0
30	198	226	28
35	198	230	32
40	198	230	32
45	198	226	28
50	198	224	26
55	198	224	26
60	198	220	22
65	198	221	23
70	198	220	22
75	198	216	18
80	198	216	18
85	198	215	17
90	198	211	13
95	198	206	8
100	198	200	2
105	198	199	1
110	198	198	0
		$\Sigma (C_2 - C_1) =$	316
		$\Delta t \cdot \Sigma (C_2 - C_1) =$	1 580

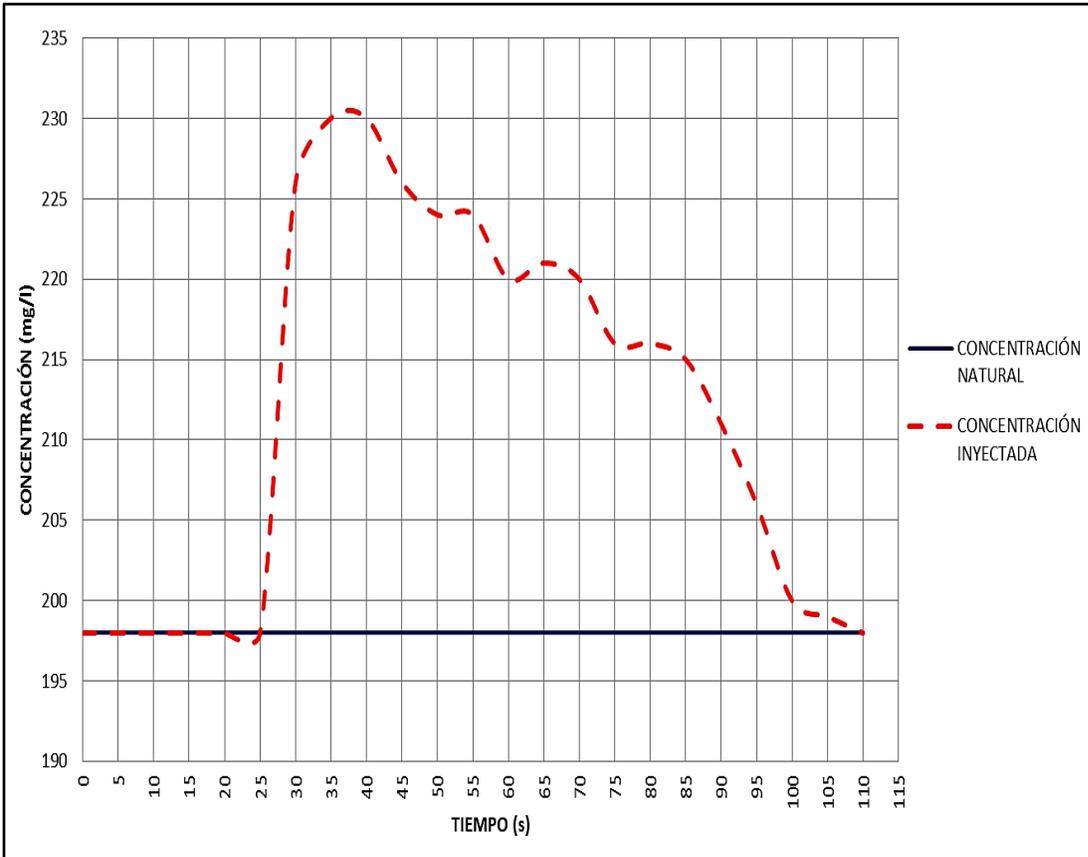
Atrap_i
0
0
0
0
0
0
70
150
160
150
135
130
120
112,5
112,5
100
90
87,5
75
52,5
25
7,5
2,5

$$\Sigma \text{Atrap}_i = 1 580$$

$$Q_{iny_P_3.5} = 11,324 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 3.10. Inyección puntual 3.5



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Datos de la prueba 4

Tabla 4.1. Aforo volumétrico de la prueba 4

Aforo volumétrico	Tiempo (S)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
5.1	53,38	487,60	9,135
5.2	53,84	491,40	9,127
5.3	53,38	489,10	9,163
5.4	53,5	488,40	9,129
5.5	56,87	518,60	9,119

Qvol. promedio	9,134
-----------------------	--------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.2. Ensayo 4.1, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	6,25	cm
Área de la sección = B·H	187,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0	0,00
0,2·H = 1,25 cm	3	76,72
0,4·H = 2,5 cm	1,9	61,06
0,6·H = 3,75 cm	1,7	57,75
0,8·H = 5 cm	1,3	50,50
Cercano al fondo del canal $\approx 6,25$ cm	0	0,00

\bar{v} (cm/s)	61,51
Q (l/s)	11,533

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.3. Ensayo 4.2, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	6,75	cm
Área de la sección = B·H	202,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0	0,00
0,2·H = 1,35 cm	1,5	54,25
0,4·H = 2,7 cm	1,3	50,50
0,6·H = 4,05 cm	1,1	46,46
0,8·H = 5,4 cm	1	44,29
Cercano al fondo del canal $\approx 6,75$ cm	0	0,00

\bar{v} (cm/s)	48,88
Q (l/s)	9,897

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.4. Ensayo 4.3, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	7,15	cm
Área de la sección = B·H	214,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0	0,00
0,2·H = 1,43 cm	1,2	48,52
0,4·H = 2,86 cm	1,1	46,46
0,6·H = 4,29 cm	1	44,29
0,8·H = 5,72 cm	0,8	39,62
Cercano al fondo del canal $\approx 7,15$ cm	0	0,00

\bar{v} (cm/s)	44,72
Q (l/s)	9,593

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.5. Ensayo 4.4, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	7,75	cm
Área de la sección = B·H	232,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0	0,00
0,2·H = 1,55 cm	1,2	48,52
0,4·H = 3,1 cm	1,1	46,46
0,6·H = 4,65 cm	1	44,29
0,8·H = 6,2 cm	0,9	42,02
Cercano al fondo del canal $\approx 7,75$ cm	0	0,00

\bar{v} (cm/s)	45,32
Q (l/s)	10,538

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.6. Ensayo 4.5, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	8,25	cm
Área de la sección = B·H	247,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	0	0,00
0,2·H = 1,65 cm	1,1	46,46
0,4·H = 3,3 cm	1	44,29
0,6·H = 4,95 cm	0,8	39,62
0,8·H = 6,6 cm	0,6	34,31
Cercano al fondo del canal $\approx 8,25$ cm	0	0,00

\bar{v} (cm/s)	41,17
Q (l/s)	10,190

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.7. **Resumen ensayo 4.0, tubo de Prandtl**

Qpromedio (l/s)	10,350
------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.8. **Inyección constante 4.1**

C0 =	187	mg/l
C1 =	1 829,00	mg/l
q =	0 023182	l/s

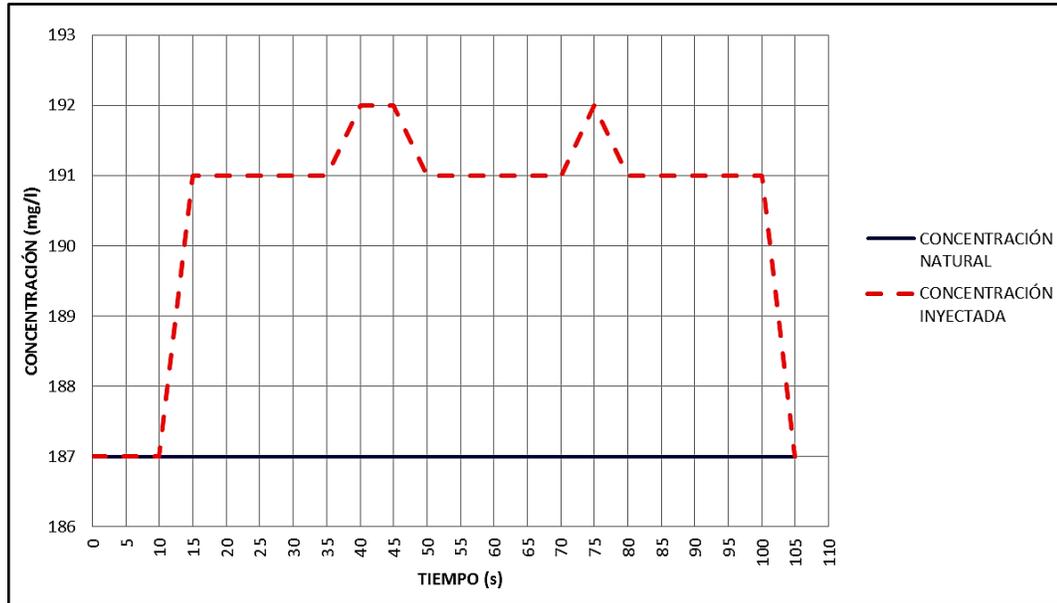
Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)
0	187	187,00
5	187	187,00
10	187	187,00
15	187	191,00
20	187	191,00
25	187	191,00
30	187	191,00
35	187	191,00
40	187	192,00
45	187	192,00
50	187	191,00
55	187	191,00
60	187	191,00
65	187	191,00
70	187	191,00
75	187	192,00
80	187	191,00
85	187	191,00
90	187	191,00
95	187	191,00
100	187	191,00
105	187	187,00

C2 (promedio, mg/l) =	191,1667
------------------------------	-----------------

Qiny_C_4.1 =	9,1122	l/s
---------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.1. Inyección constante 4.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.9. Inyección constante 4.2

$C_0 =$	187	mg/l
$C_1 =$	1 831,00	mg/l
$q =$	0,0232	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	187	187,00
5	187	187,00
10	187	187,00
15	187	191,00
20	187	192,00
25	187	192,00

Continuación de la tabla 4.9.

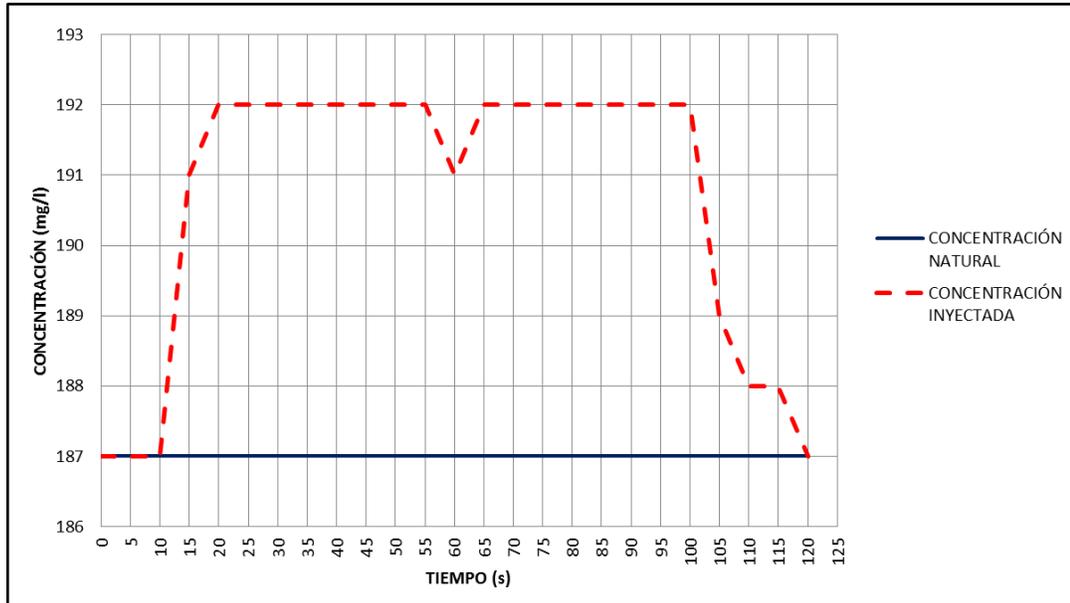
30	187	192,00
35	187	192,00
40	187	192,00
45	187	192,00
50	187	192,00
55	187	192,00
60	187	191,00
65	187	192,00
70	187	192,00
75	187	192,00
80	187	192,00
85	187	192,00
90	187	192,00
95	187	192,00
100	187	192,00
105	187	189,00
110	187	188,00
115	187	188,00
120	187	187,00

C2 (promedio, mg/l) =	191,9412
------------------------------	-----------------

Q_{iny_C_4.2} =	7,6896	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.2. Inyección constante 4.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.10. Inyección constante 4.3

$C_0 =$	188	mg/l
$C_1 =$	1 831,00	mg/l
$q =$	0,0232	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	188	188,00
5	188	188,00
10	188	188,00
15	188	191,00
20	188	193,00
25	188	192,00

Continuación de la tabla 4.10.

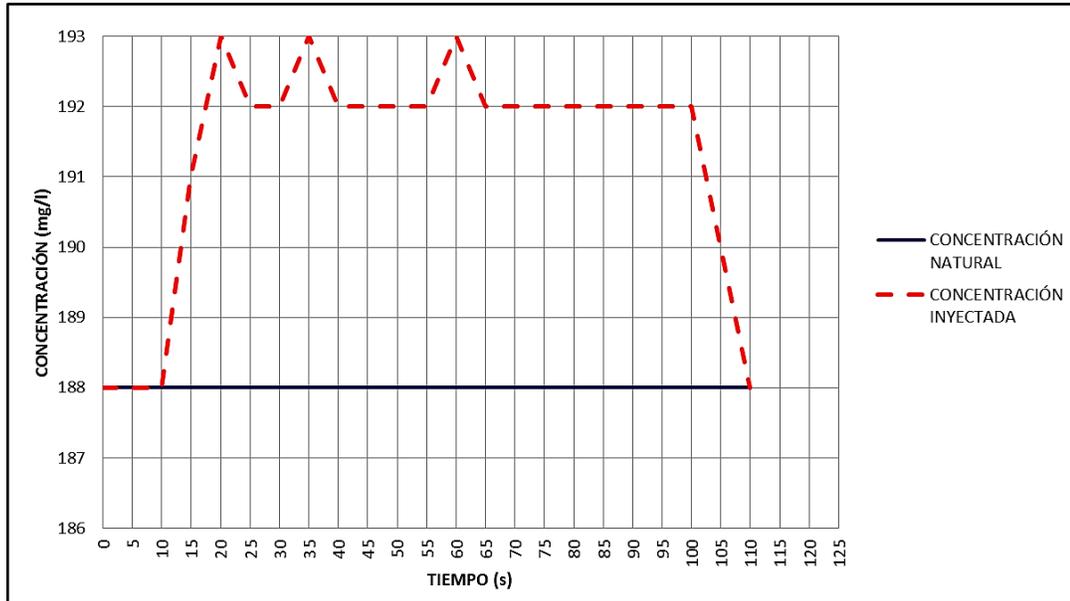
30	188	192,00
35	188	193,00
40	188	192,00
45	188	192,00
50	188	192,00
55	188	192,00
60	188	193,00
65	188	192,00
70	188	192,00
75	188	192,00
80	188	192,00
85	188	192,00
90	188	192,00
95	188	192,00
100	188	192,00
105	188	190,00
110	188	188,00

C₂ (promedio, mg/l) =	192,0769
---	-----------------

Q_{iny_C_4.3} =	9,3190	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.3. Inyección constante 4.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.11. Inyección constante 4.4

$C_0 =$	189	mg/l
$C_1 =$	1 830,00	mg/l
$q =$	0,0232	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	189	189,00
5	189	189,00
10	189	189,00
15	189	192,00
20	189	193,00
25	189	193,00

Continuación de la tabla 4.11.

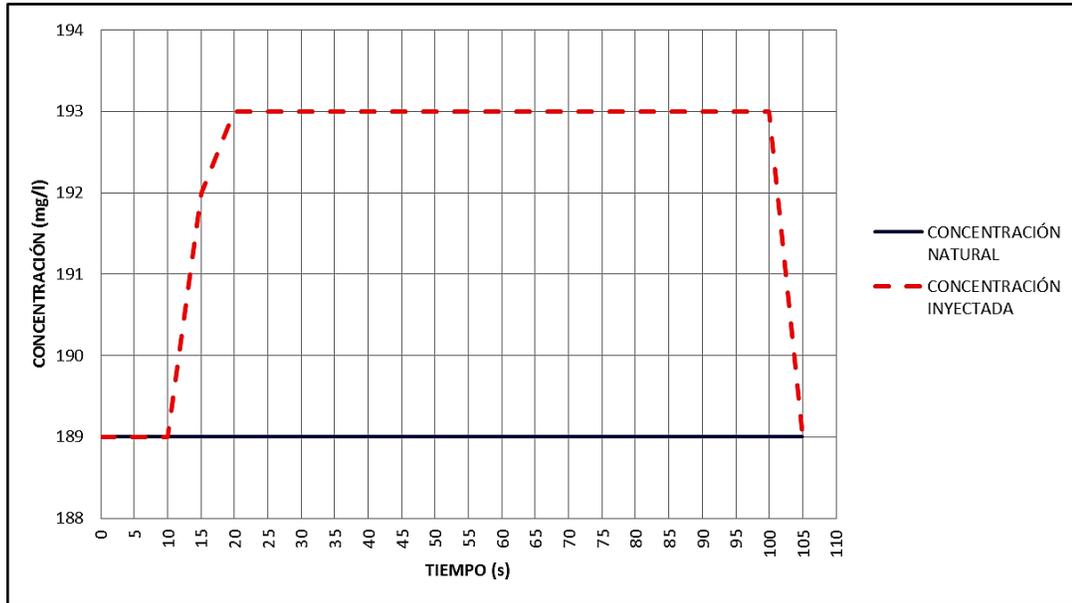
30	189	193,00
35	189	193,00
40	189	193,00
45	189	193,00
50	189	193,00
55	189	193,00
60	189	193,00
65	189	193,00
70	189	193,00
75	189	193,00
80	189	193,00
85	189	193,00
90	189	193,00
95	189	193,00
100	189	193,00
105	189	189,00

C₂ (promedio, mg/l) =	193,0000
---	-----------------

Q_{iny_C_4.4} =	9,4870	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.4. Inyección constante 4.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.12. Inyección constante 4.5

$C_0 =$	189	mg/l
$C_1 =$	1 832,00	mg/l
$q =$	0,0232	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	189	189,00
5	189	189,00
10	189	189,00
15	189	193,00
20	189	193,00
25	189	193,00

Continuación de la tabla 4.12.

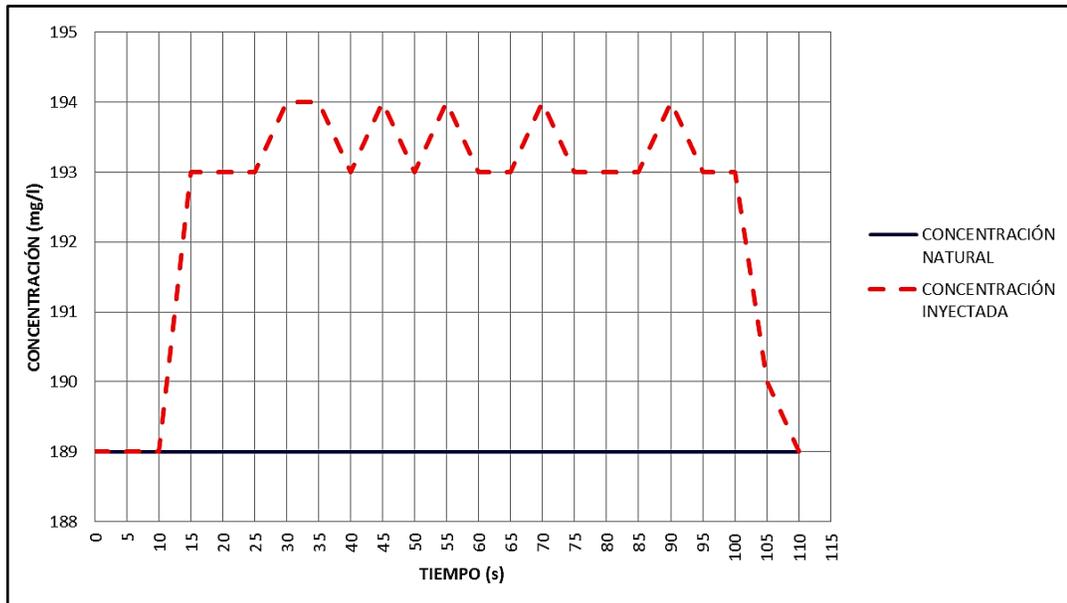
30	189	194,00
35	189	194,00
40	189	193,00
45	189	194,00
50	189	193,00
55	189	194,00
60	189	193,00
65	189	193,00
70	189	194,00
75	189	193,00
80	189	193,00
85	189	193,00
90	189	194,00
95	189	193,00
100	189	193,00
105	189	190,00
110	189	189,00

C₂ (promedio, mg/l) =	193,3333
---	-----------------

Q_{iny_C_4.5} =	8,7662	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.5. **Inyección constante 4.5**



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.13. **Aforo para frasco Mariotte para determinar el caudal “q”**

Tiempo (s)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
42	1,00	0,0238
42,56	1,00	0,0235
43,25	1,00	0,0231
43,98	1,00	0,0227
43,97	1,00	0,0227

q_{iny_prom}	0,0232
-----------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.14. **Inyección puntual 4.1**

$$C_0 = 190 \text{ mg/l}$$

$$C_1 = 1850 \text{ mg/l}$$

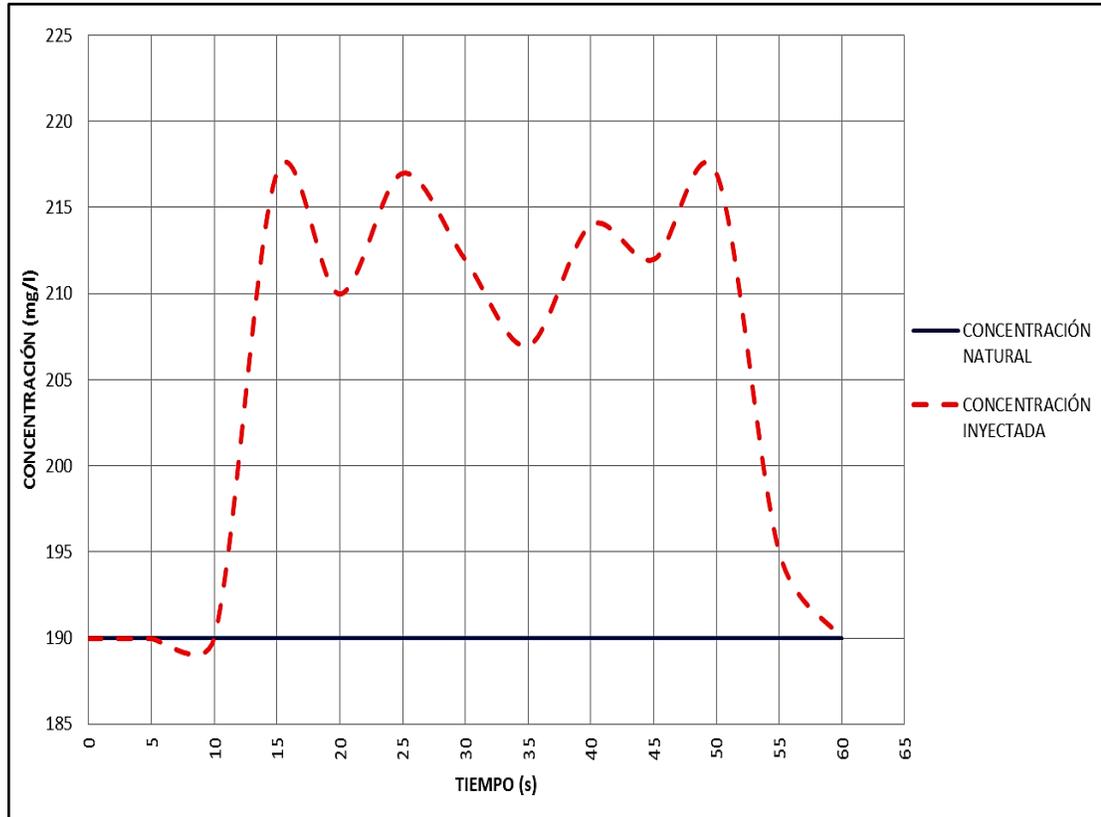
$$V = 5 \text{ l}$$

$$\Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	190	190	0		
5	190	190	0	0	
10	190	190	0	0	
15	190	217	27	67,5	
20	190	210	20	117,5	
25	190	217	27	117,5	
30	190	212	22	122,5	
35	190	207	17	97,5	
40	190	214	24	102,5	
45	190	212	22	115	
50	190	217	27	122,5	
55	190	195	5	80	
60	190	190	0	12,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	191	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	955	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	955
			$Q_{iny_P_4.1} =$	8,691 l/s	

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.6. Inyección puntual 4.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.15. **Inyección puntual 4.2**

$$C_0 = 192 \text{ mg/l} \quad V = 7 \text{ l}$$

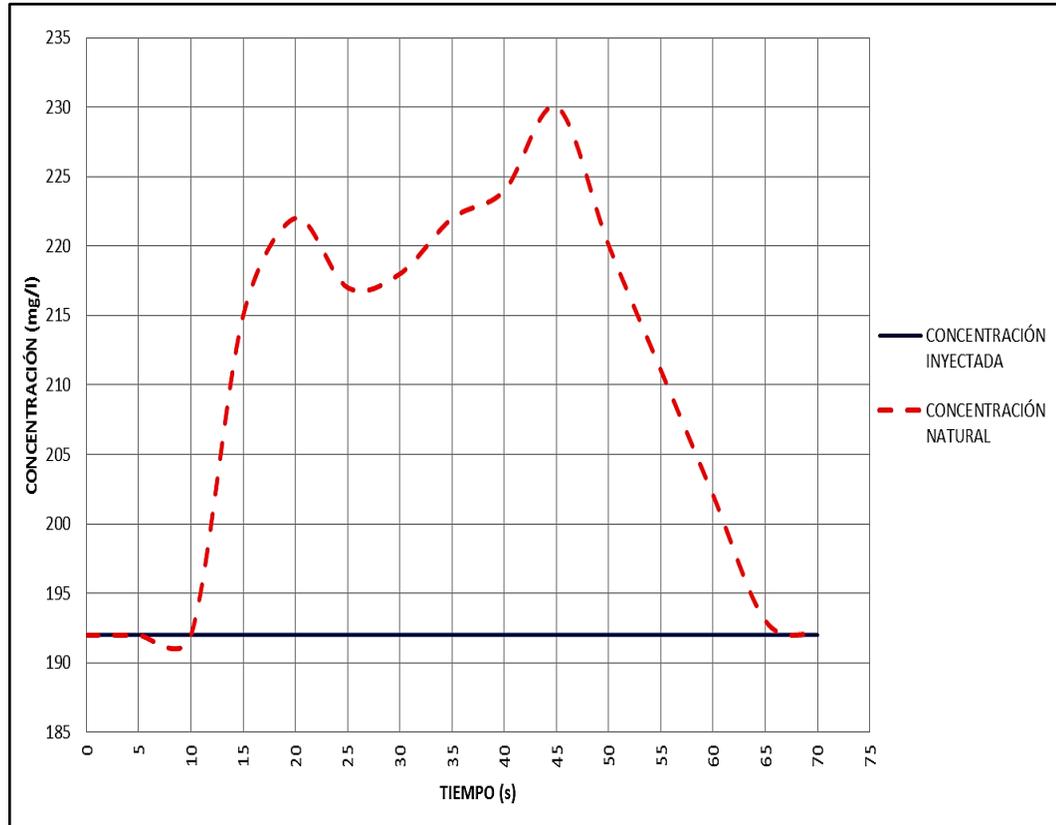
$$C_1 = 1846 \text{ mg/l} \quad \Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	192	192	0	0
5	192	192	0	0
10	192	192	0	0
15	192	215	23	57,5
20	192	222	30	132,5
25	192	217	25	137,5
30	192	218	26	127,5
35	192	222	30	140
40	192	224	32	155
45	192	230	38	175
50	192	220	28	165
55	192	211	19	117,5
60	192	202	10	72,5
65	192	193	1	27,5
70	192	192	0	2,5
		$\sum (C_2 - C_1) =$	262	
		$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1310	$\sum \text{Atrap}_i =$
				1310

$$Q_{iny_P_4.2} = 8,838 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.7. Inyección puntual 4.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.16. **Inyección puntual 4.3**

$$C_0 = 194 \text{ mg/l}$$

$$C_1 = 1852 \text{ mg/l}$$

$$V = 7 \text{ l}$$

$$\Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	194	194	0
5	194	194	0
10	194	194	0
15	194	220	26
20	194	228	34
25	194	224	30
30	194	221	27
35	194	219	25
40	194	226	32
45	194	233	39
50	194	246	52
55	194	199	5
60	194	194	0
		$\sum (C_2 - C_1) =$	270
		$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1350

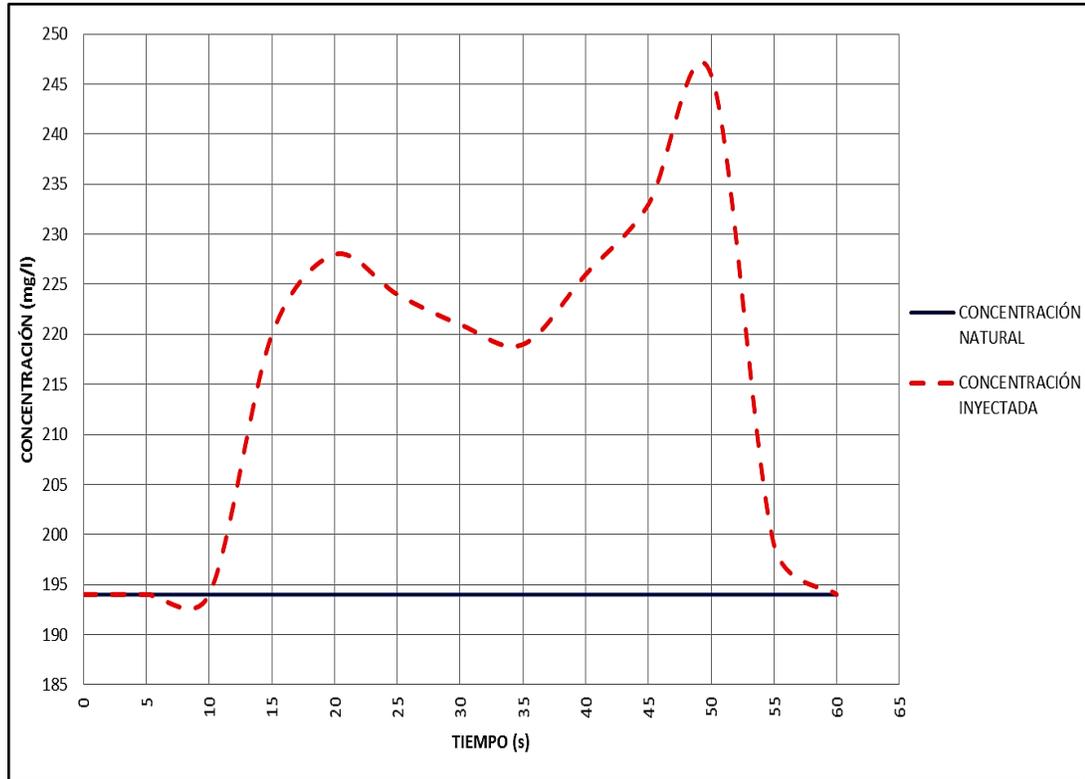
Atrap_i
0
0
65
150
160
142,5
130
142,5
177,5
227,5
142,5
12,5

$$\sum \text{Atrap}_i = 1350$$

$$Q_{iny_P_4.3} = 8,597 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.8. Inyección puntual 4.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.17. **Inyección puntual 4.4**

$$C_0 = \begin{array}{|c|} \hline 196 \\ \hline \end{array} \text{ mg/l}$$

$$C_1 = \begin{array}{|c|} \hline 1881 \\ \hline \end{array} \text{ mg/l}$$

$$V = \begin{array}{|c|} \hline 7 \text{ l} \\ \hline \end{array}$$

$$\Delta t = \begin{array}{|c|} \hline 5 \text{ s} \\ \hline \end{array}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1
0	196	196	0
5	196	196	0
10	196	196	0
15	196	227	31
20	196	229	33
25	196	237	41
30	196	230	34
35	196	223	27
40	196	222	26
45	196	217	21
50	196	205	9
55	196	201	5
60	196	199	3
65	196	198	2
70	196	198	2
75	196	197	1
80	196	197	1
85	196	196	0
$\sum (C_2 - C_1) =$			236
$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$			1 180

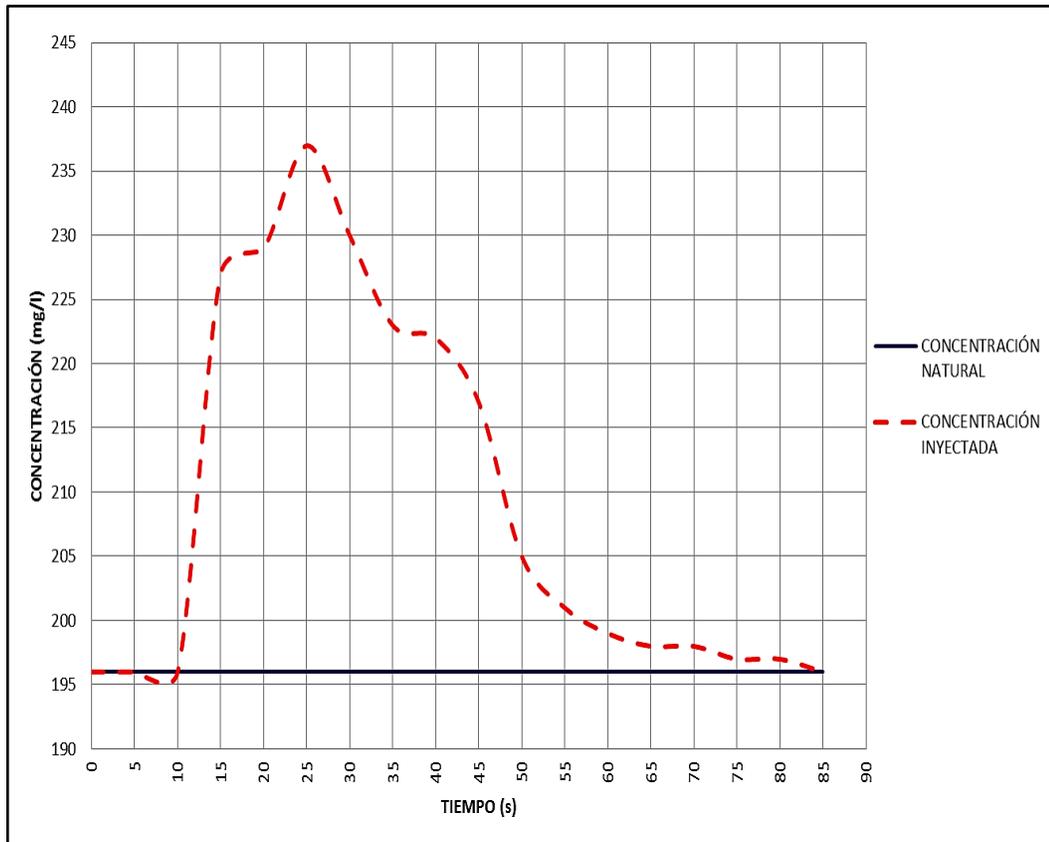
Atrap_i
0
0
77,5
160
185
187,5
152,5
132,5
117,5
75
35
20
12,5
10
7,5
5
2,5

$$\sum \text{Atrap}_i = \begin{array}{|c|} \hline 1180 \\ \hline \end{array}$$

$$Q_{iny_P_4.4} = \begin{array}{|c|} \hline 9,996 \\ \hline \end{array} \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 4.9. Inyección puntual 4.4



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Datos de la prueba 5

Tabla 5.1. Aforo volumétrico de la prueba 5

Aforo volumétrico	Tiempo (S)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
5.1	53,38	487,60	9,135
5.2	53,84	491,40	9,127
5.3	53,38	489,10	9,163
5.4	53,5	488,40	9,129
5.5	56,87	518,60	9,119

Qvol. promedio	9,134
-----------------------	--------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.2. Ensayo 5.1, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	5,95	cm
Área de la sección = B·H	178,5	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	2,5	70,04
0,2·H = 1,19 cm	2	62,64
0,4·H = 2,38 cm	1,9	61,06
0,6·H = 3,57 cm	1,7	57,75
0,8·H = 4,76 cm	1,5	54,25
Cercano al fondo del canal $\approx 5,95$ cm	1,5	54,25

\bar{v} (cm/s)	59,57
Q (l/s)	10,633

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.3. Ensayo 5.2, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	6,4	cm
Área de la sección = B·H	192	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,8	59,43
0,2·H = 1,28 cm	1,6	56,03
0,4·H = 2,56 cm	1,5	54,25
0,6·H = 3,84 cm	1,4	52,41
0,8·H = 5,12 cm	1,3	50,50
Cercano al fondo del canal ≈ 6,4 cm	0,9	42,02

\bar{v} (cm/s)	52,78
Q (l/s)	10,134

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.4. Ensayo 5.3, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	6,7	cm
Área de la sección = B·H	201	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,5	54,25
0,2·H = 1,34 cm	1,5	54,25
0,4·H = 2,68 cm	1,4	52,41
0,6·H = 4,02 cm	1,3	50,50
0,8·H = 5,36 cm	1,1	46,46
Cercano al fondo del canal ≈ 6,7 cm	0,7	37,06

\bar{v} (cm/s)	49,85
Q (l/s)	10,021

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.5. Ensayo 5.4, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	6,9	cm
Área de la sección = B·H	207	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,2	48,52
0,2·H = 1,38 cm	1,1	46,46
0,4·H = 2,76 cm	1	44,29
0,6·H = 4,14 cm	0,8	39,62
0,8·H = 5,52 cm	0,6	34,31
Cercano al fondo del canal ≈ 6.9 cm	0,5	31,32

\bar{v} (cm/s)	40,92
Q (l/s)	8,470

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.6. Ensayo 5.5, tubo de Prandtl

B (ancho del canal)	30	cm
H (tirante)	7,5	cm
Área de la sección = B·H	225	cm ²

Ubicación del tubo de Prandtl	Δh (cm)	$v = \sqrt{2g \cdot \Delta h}$ (cm/s)
Cercano a superficie del agua ≈ 0 cm	1,9	61,06
0,2·H = 1,5 cm	1,1	46,46
0,4·H = 3 cm	1	44,29
0,6·H = 4,5 cm	0,9	42,02
0,8·H = 6 cm	0,8	39,62
Cercano al fondo del canal $\approx 8,25$ cm	0,5	31,32

\bar{v} (cm/s)	43,72
Q (l/s)	9,836

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.8. Resumen ensayo 5.0, tubo de Prandtl

Qpromedio (l/s)	9,819
------------------------	--------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.9. Inyección constante 5.1

C₀ =	219	mg/l
C₁ =	1 902,00	mg/l
q =	0,023467	l/s

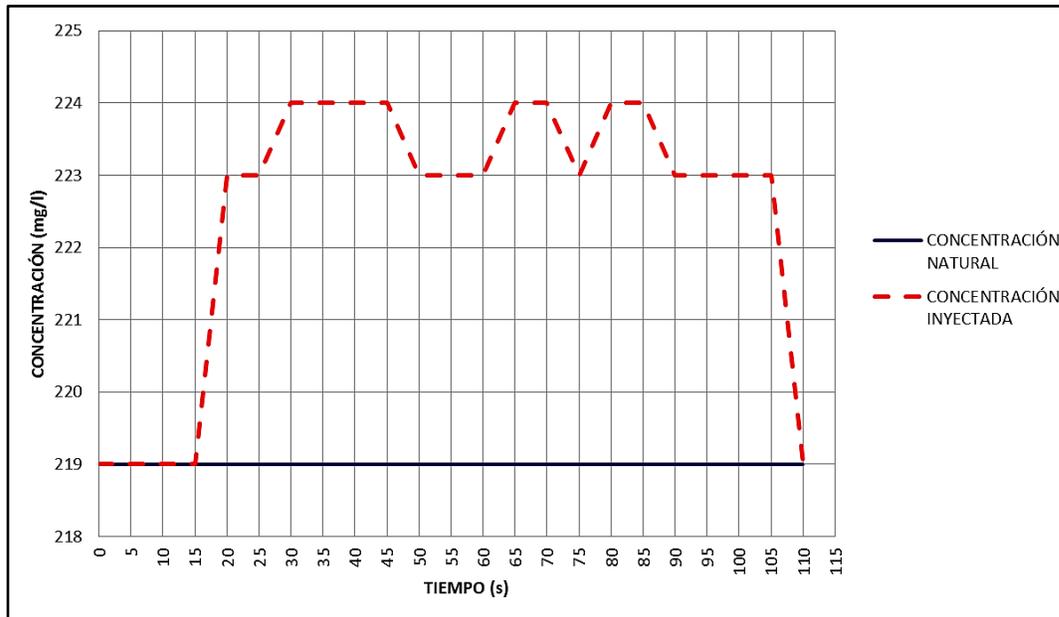
Tiempo (s)	C₀ (mg/l)	C₂ (mg/l)
0	219	219,00
5	219	219,00
10	219	219,00
15	219	219,00
20	219	223,00
25	219	223,00
30	219	224,00
35	219	224,00
40	219	224,00
45	219	224,00
50	219	223,00
55	219	223,00
60	219	223,00
65	219	224,00
70	219	224,00
75	219	223,00
80	219	224,00
85	219	224,00
90	219	223,00
95	219	223,00
100	219	223,00
105	219	223,00
110	219	219,00

C₂ (promedio, mg/l) =	223,4444
---	-----------------

Q_{iny_C_5.1} =	8,8630	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.1. Inyección constante 5.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.10. Inyección constante 5.2

$C_0 =$	219	mg/l
$C_1 =$	1 905,00	mg/l
$q =$	0,0235	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	219	219,00
5	219	220,00
10	219	220,00
15	219	224,00
20	219	224,00
25	219	224,00

Continuación de la tabla 5.10.

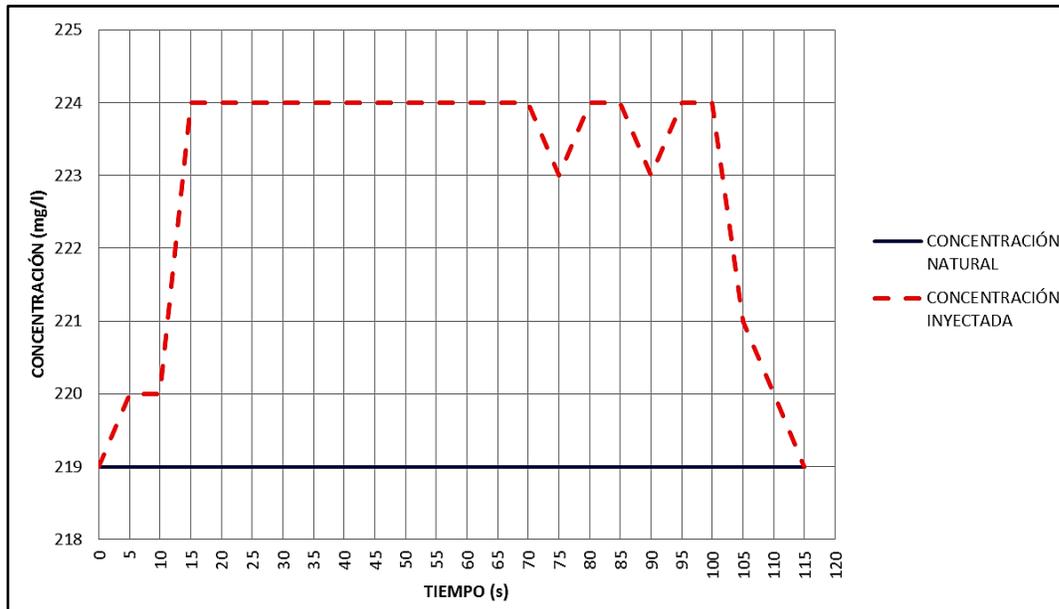
30	219	224,00
35	219	224,00
40	219	224,00
45	219	224,00
50	219	224,00
55	219	224,00
60	219	224,00
65	219	224,00
70	219	224,00
75	219	223,00
80	219	224,00
85	219	224,00
90	219	223,00
95	219	224,00
100	219	224,00
105	219	221,00
110	219	220,00
115	219	219,00

C₂ (promedio, mg/l) =	223,8889
---	-----------------

Q_{iny_C_5.2} =	8,0695	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.2. Inyección constante 5.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.11. Inyección constante 5.3

$C_0 =$	220	mg/l
$C_1 =$	1 903,00	mg/l
$q =$	0,0235	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	220	220,00
5	220	220,00
10	220	220,00
15	220	224,00
20	220	224,00
25	220	224,00

Continuación de la tabla 5.11.

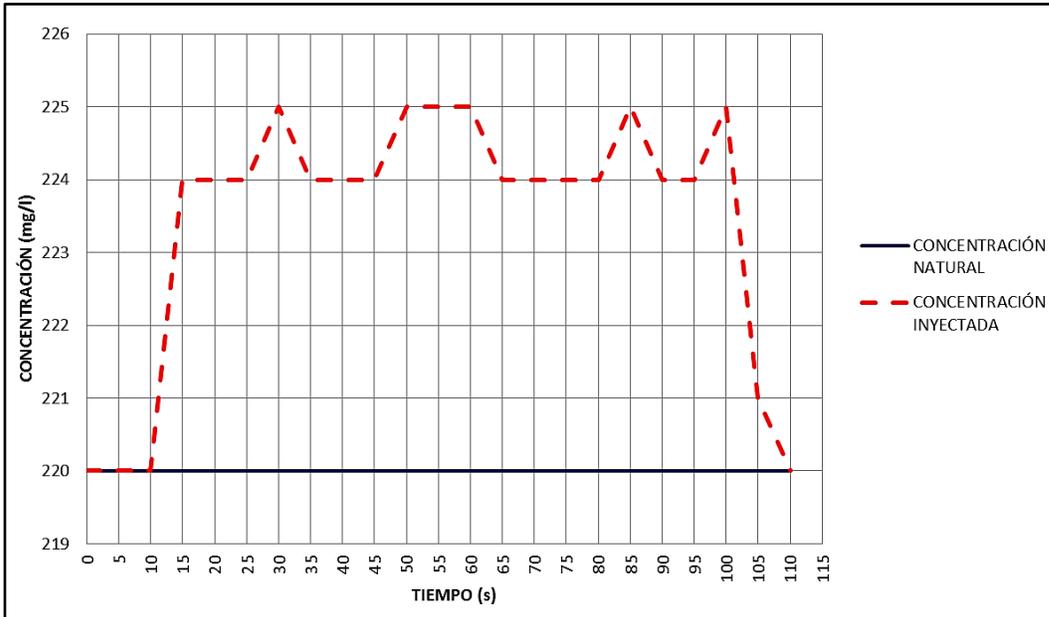
30	220	225,00
35	220	224,00
40	220	224,00
45	220	224,00
50	220	225,00
55	220	225,00
60	220	225,00
65	220	224,00
70	220	224,00
75	220	224,00
80	220	224,00
85	220	225,00
90	220	224,00
95	220	224,00
100	220	225,00
105	220	221,00
110	220	220,00

C₂ (promedio, mg/l) =	224,3333
---	-----------------

Q_{iny_C_5.3} =	9,0908	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.3. Inyección constante 5.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.12. Inyección constante 5.4

$C_0 =$	221	mg/l
$C_1 =$	1 903,00	mg/l
$q =$	0,0235	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	221	221,00
5	221	221,00
10	221	221,00
15	221	224,00
20	221	225,00
25	221	225,00

Continuación de la tabla 5.12.

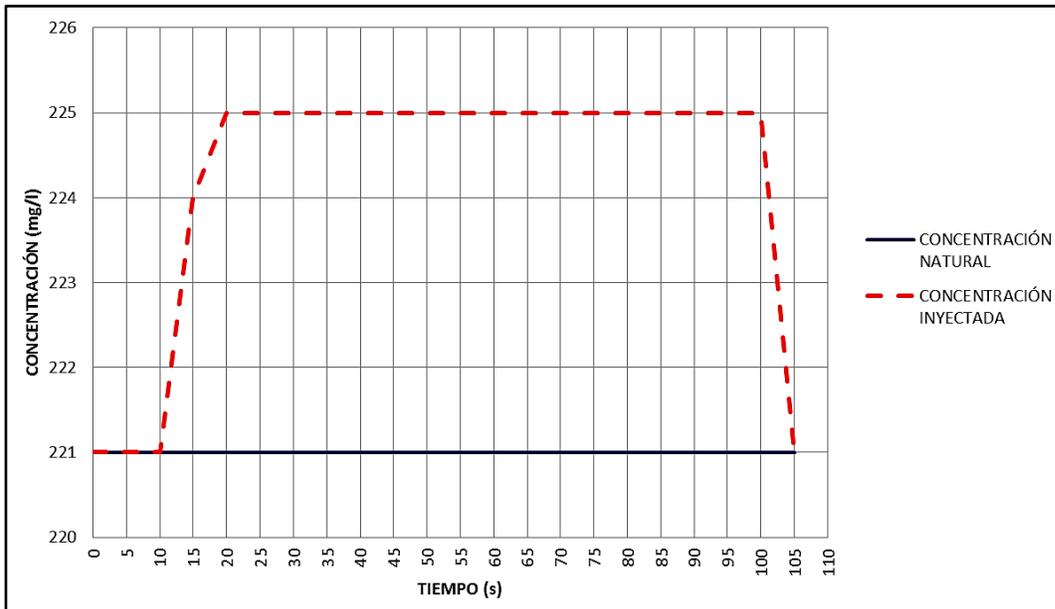
30	221	225,00
35	221	225,00
40	221	225,00
45	221	225,00
50	221	225,00
55	221	225,00
60	221	225,00
65	221	225,00
70	221	225,00
75	221	225,00
80	221	225,00
85	221	225,00
90	221	225,00
95	221	225,00
100	221	225,00
105	221	221,00

C₂ (promedio, mg/l) =	225,0000
---	-----------------

Q_{iny_C_5.4} =	9,8445	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.4. Inyección constante 5.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.13. Inyección constante 5.5

$C_0 =$	221	mg/l
$C_1 =$	1 904,00	mg/l
$q =$	0,0235	l/s

Tiempo (s)	C_0 (mg/l)	C_2 (mg/l)
0	221	221,00
5	221	221,00
10	221	221,00
15	221	225,00
20	221	226,00
25	221	225,00

Continuación de la tabla 5.13.

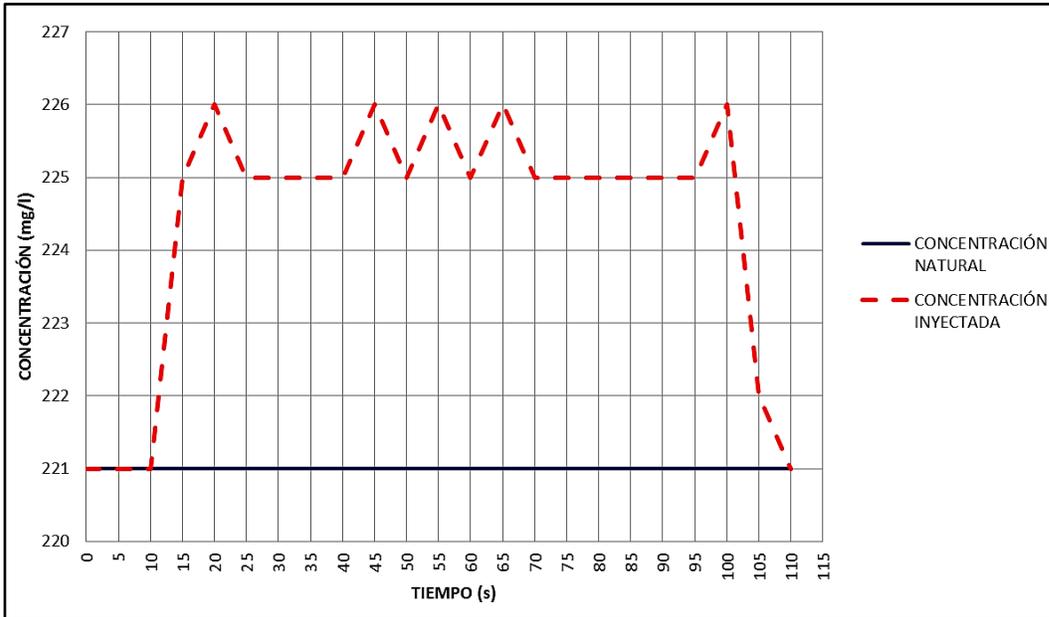
30	221	225,00
35	221	225,00
40	221	225,00
45	221	226,00
50	221	225,00
55	221	226,00
60	221	225,00
65	221	226,00
70	221	225,00
75	221	225,00
80	221	225,00
85	221	225,00
90	221	225,00
95	221	225,00
100	221	226,00
105	221	222,00
110	221	221,00

C₂ (promedio, mg/l) =	225,2000
---	-----------------

Q_{iny_C_5.5} =	9,3802	l/s
--------------------------------	---------------	------------

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.5. **Inyección constante 5.5**



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.14. **Aforo para frasco Mariotte para determinar el caudal “q”**

Tiempo (s)	Volumen (l)	Caudal (l/s)
42,48	1,00	0,0235
43,11	1,00	0,0232
44	1,00	0,0227
41,5	1,00	0,0241
42,06	1,00	0,0238

q_{iny_prom}	0,0235
-----------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.15. **Inyección puntual 5.1**

$$C_0 = 196 \text{ mg/l} \quad V = 12 \text{ l}$$

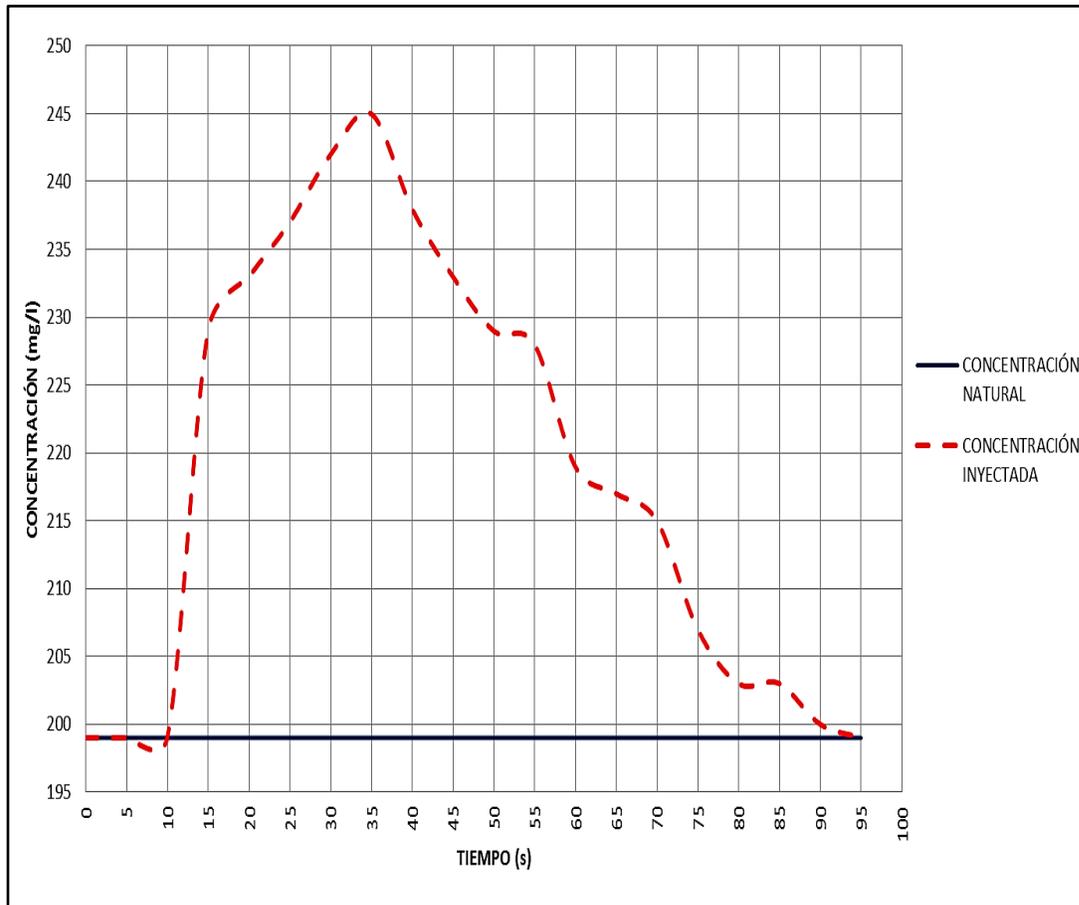
$$C_1 = 1885 \text{ mg/l} \quad \Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap _i	
0	199	199	0	0	
5	199	199	0	0	
10	199	199	0	0	
15	199	229	30	75	
20	199	233	34	160	
25	199	237	38	180	
30	199	242	43	202,5	
35	199	245	46	222,5	
40	199	238	39	212,5	
45	199	233	34	182,5	
50	199	229	30	160	
55	199	228	29	147,5	
60	199	219	20	122,5	
65	199	217	18	95	
70	199	215	16	85	
75	199	207	8	60	
80	199	203	4	30	
85	199	203	4	20,0	
90	199	200	1	12,5	
95	199	199	0	2,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	394	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	1 970	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	1 970

$$Q_{iny_P_5.1} = 10,270 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.6. Inyección puntual 5.1



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.16. Inyección puntual 5.2

$$C_0 = \begin{matrix} 201 \\ 1\ 885 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad V = 12 \text{ l}$$

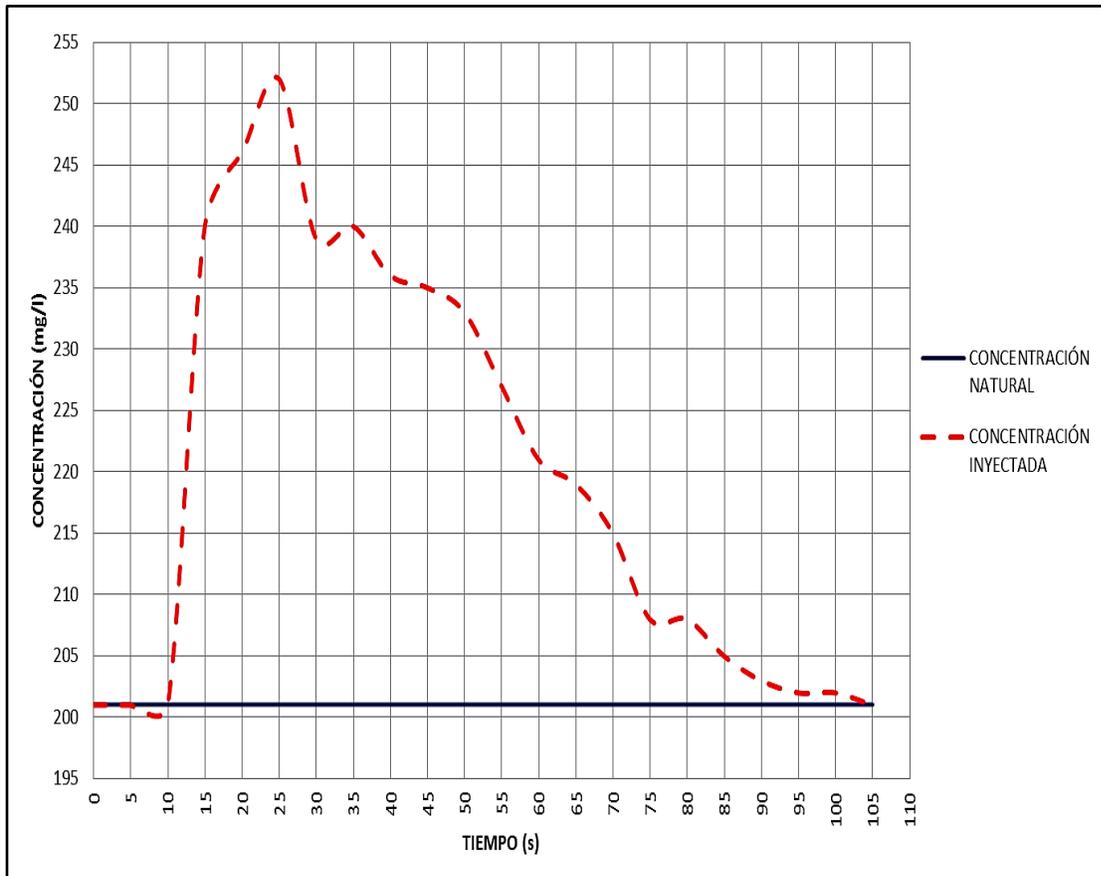
$$C_1 = \begin{matrix} 201 \\ 1\ 885 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad \Delta t = 5 \text{ s}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i
0	201	201,00	0,00	
5	201	201,00	0,00	0,00
10	201	201,00	0,00	0,00
15	201	240,00	39,00	9,50
20	201	246,00	45,00	210,00
25	201	252,00	51,00	240,00
30	201	239,00	38,00	222,50
35	201	240,00	39,00	192,50
40	201	236,00	35,00	185,00
45	201	235,00	34,00	172,50
50	201	233,00	32,00	165,00
55	201	227,00	26,00	145,00
60	201	221,00	20,00	115,00
65	201	219,00	18,00	95,00
70	201	215,00	14,00	80,00
75	201	208,00	7,00	52,50
80	201	208,00	7,00	35,00
85	201	205,00	4,00	27,50
90	201	203,00	2,00	15,00
95	201	202,00	1,00	7,50
100	201	202,00	1,00	5,00
105	201	201,00	0,00	2,50
		$\sum (C_2 - C_1) =$	413,00	
		$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	2 065,00	$\sum \text{Atrap}_i =$ 2 065,00

$$Q_{iny_P_5.2} = 9,7860 \text{ l/s}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.7. Inyección puntual 5.2



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.17. **Inyección puntual 5.3**

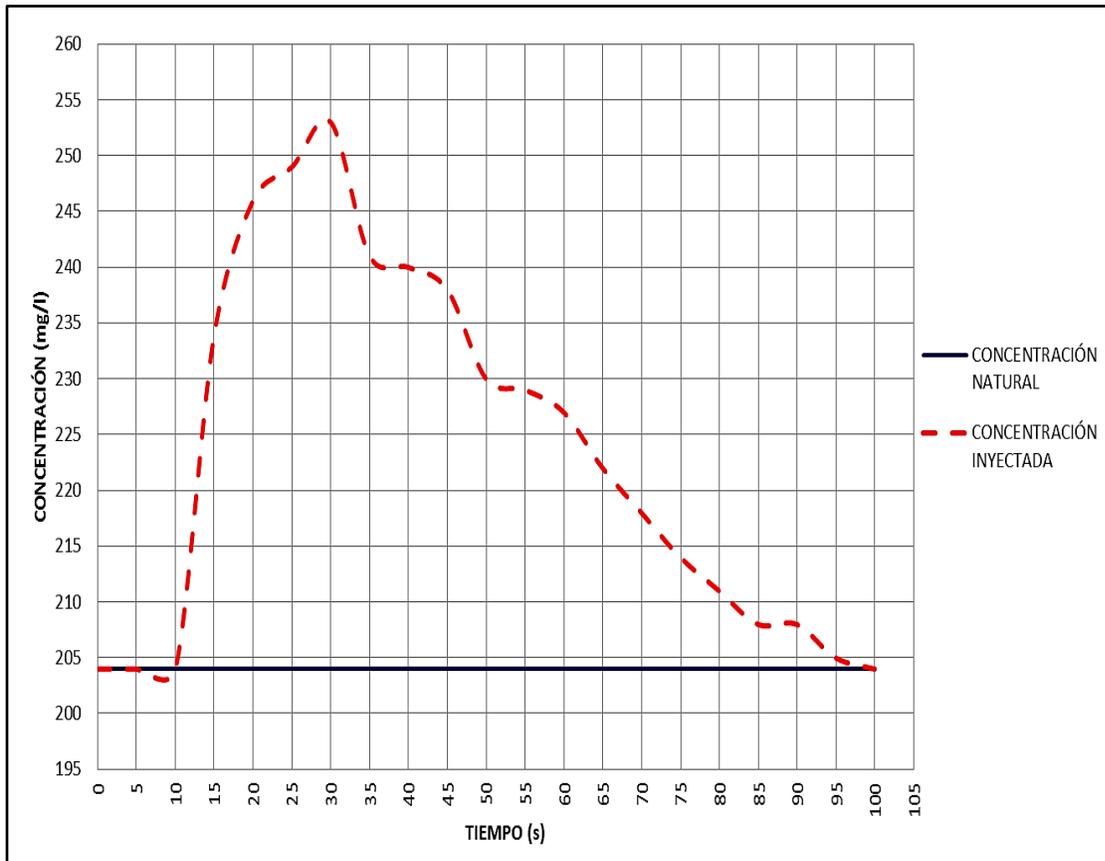
$C_0 =$	204	mg/l	$V =$	12 l
$C_1 =$	1 885	mg/l	$\Delta t =$	5 s

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	204	204,00	0,00	0	
5	204	204,00	0,00	0	
10	204	204,00	0,00	0	
15	204	234,00	30,00	75	
20	204	246,00	42,00	180	
25	204	249,00	45,00	217,5	
30	204	253,00	49,00	235	
35	204	241,00	37,00	215	
40	204	240,00	36,00	182,5	
45	204	238,00	34,00	175	
50	204	230,00	26,00	150	
55	204	229,00	25,00	127,5	
60	204	227,00	23,00	120	
65	204	222,00	18,00	102,5	
70	204	218,00	14,00	80	
75	204	214,00	10,00	60	
80	204	211,00	7,00	42,5	
85	204	208,00	4,00	27,5	
90	204	208,00	4,00	20	
95	204	205,00	1,00	12,5	
100	204	204,00	0,00	2,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	405,00	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	2 025,00	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	2 025

$Q_{iny_P_5.3} =$	9,9615	l/s
---------------------	---------------	-----

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.8. Inyección puntual 5.3



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.18. Inyección puntual 5.4

$$C_0 = \begin{matrix} 207 \\ 1\ 884 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad V = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

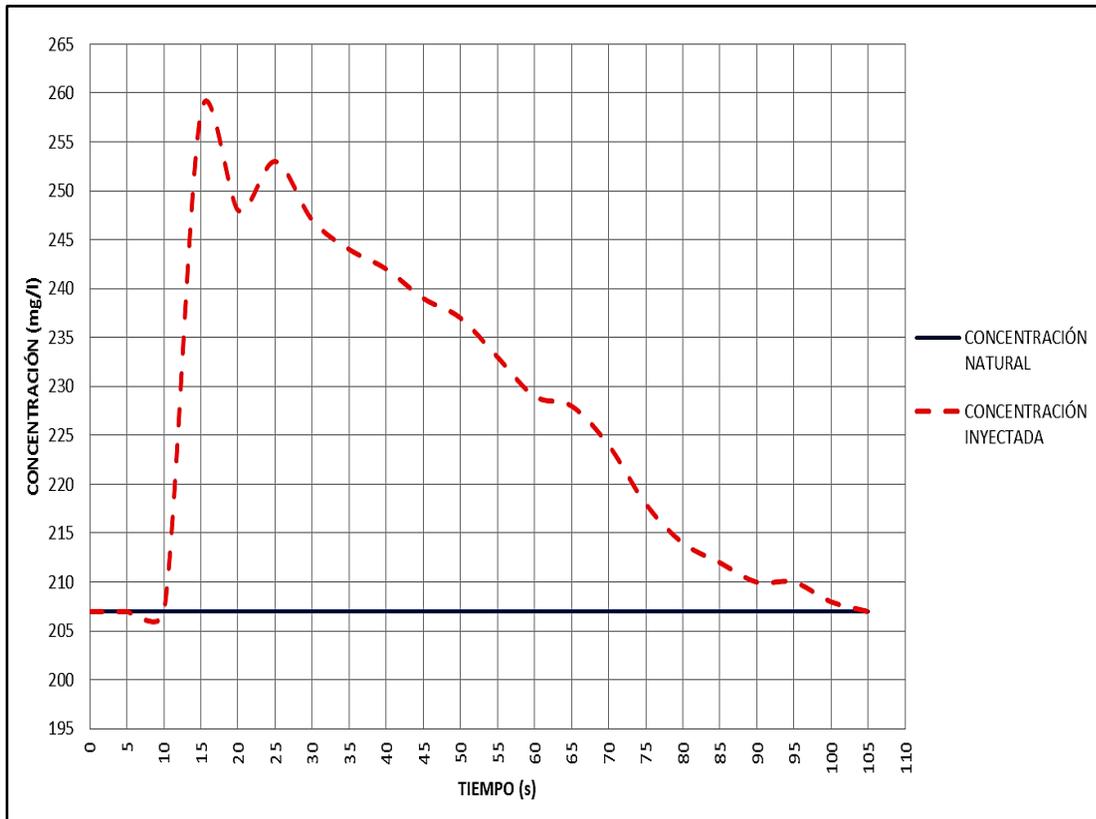
$$C_1 = \begin{matrix} 207 \\ 1\ 884 \end{matrix} \text{ mg/l} \qquad \Delta t = \begin{matrix} 12 \text{ l} \\ 5 \text{ s} \end{matrix}$$

Tiempo (s)	C0 (mg/l)	C2 (mg/l)	C2 - C1	Atrap_i	
0	207	207	0		
5	207	207	0	0	
10	207	207	0	0	
15	207	258	51	127,5	
20	207	248	41	230	
25	207	253	46	217,5	
30	207	247	40	215	
35	207	244	37	192,5	
40	207	242	35	180	
45	207	239	32	167,5	
50	207	237	30	155	
55	207	233	26	140	
60	207	229	22	120	
65	207	228	21	107,5	
70	207	224	17	95	
75	207	218	11	70	
80	207	214	7	45	
85	207	212	5	30	
90	207	210	3	20	
95	207	210	3	15	
100	207	208	1	10	
105	207	207	0	2,5	
			$\sum (C_2 - C_1) =$	428	
			$\Delta t \cdot \sum (C_2 - C_1) =$	2 140	
				$\sum \text{Atrap}_i =$	2 140

$$Q_{iny_P_5.4} = \begin{matrix} 9,404 \\ \text{l/s} \end{matrix}$$

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.9. Inyección puntual 5.4



Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.19. **Volumen de agua en el tanque en función de la altura del piezómetro**

h(cm)	Vol (lt)
0.0	397.40
0.1	398.10
0.2	398.90
0.3	399.60
0.4	400.30
0.5	401.10
0.6	401.80
0.7	402.50
0.8	403.20
0.9	404.00
1.0	404.70
1.1	405.40
1.2	406.20
1.3	406.90
1.4	407.60
1.5	408.30
1.6	409.10
1.7	409.80
1.8	410.50
1.9	411.30
2.0	412.00
2.1	412.70
2.2	413.50
2.3	414.20
2.4	414.90
2.5	415.70
2.6	416.40
2.7	417.10
2.8	417.90
2.9	418.60
3.0	419.30
3.1	420.10
3.2	420.80
3.3	421.50
3.4	422.30
3.5	423.00
3.6	423.70
3.7	424.50
3.8	425.20
3.9	425.90
4.0	426.70
4.1	427.40

h(cm)	Vol (lt)
4.2	428.10
4.3	428.90
4.4	429.60
4.5	430.30
4.6	431.10
4.7	431.80
4.8	432.50
4.9	433.30
5.0	434.00
5.1	434.80
5.2	435.50
5.3	436.20
5.4	437.00
5.5	437.70
5.6	438.40
5.7	439.20
5.8	439.90
5.9	440.70
6.0	441.40
6.1	442.10
6.2	442.90
6.3	443.60
6.4	444.40
6.5	445.10
6.6	445.80
6.7	446.60
6.8	447.30
6.9	448.10
7.0	448.80
7.1	449.50
7.2	450.30
7.3	451.00
7.4	451.80
7.5	452.50
7.6	453.30
7.7	454.00
7.8	454.70
7.9	455.50
8.0	456.20
8.1	457.00
8.2	457.70
8.3	458.50

h(cm)	Vol (lt)
8.4	459.20
8.5	460.00
8.6	460.70
8.7	461.40
8.8	462.20
8.9	462.90
9.0	463.70
9.1	464.40
9.2	465.20
9.3	465.90
9.4	466.70
9.5	467.40
9.6	468.20
9.7	468.90
9.8	469.60
9.9	470.40
10.0	471.10
10.1	471.90
10.2	472.60
10.3	473.40
10.4	474.10
10.5	474.90
10.6	475.60
10.7	476.40
10.8	477.10
10.9	477.90
11.0	478.60
11.1	479.40
11.2	480.10
11.3	480.90
11.4	481.60
11.5	482.40
11.6	483.10
11.7	483.90
11.8	484.60
11.9	485.40
12.0	486.10
12.1	486.90
12.2	487.60
12.3	488.40
12.4	489.10
12.5	489.90

h(cm)	Vol (lt)
12.6	490.60
12.7	491.40
12.8	492.20
12.9	492.90
13.0	493.70
13.1	494.40
13.2	495.20
13.3	495.90
13.4	496.70
13.5	497.40
13.6	498.20
13.7	498.90
13.8	499.70
13.9	500.50
14.0	501.20
14.1	502.00
14.2	502.70
14.3	503.50
14.4	504.20
14.5	505.00
14.6	505.70
14.7	506.50
14.8	507.30
14.9	508.00
15.0	508.80
15.1	509.50
15.2	510.30
15.3	511.00
15.4	511.80
15.5	512.60
15.6	513.30
15.7	514.10
15.8	514.80
15.9	515.60
16.0	516.40
16.1	517.10
16.2	517.90
16.3	518.60
16.4	519.40
16.5	520.20
16.6	520.90
16.7	521.70

h(cm)	Vol (lt)
16.8	522.40
16.9	523.20
17.0	524.00
17.1	524.70
17.2	525.50
17.3	526.30
17.4	527.00
17.5	527.80
17.6	528.50
17.7	529.30
17.8	530.10
17.9	530.80
18.0	531.60
18.1	532.40
18.2	533.10
18.3	533.90
18.4	534.70
18.5	535.40
18.6	536.20
18.7	537.00
18.8	537.70
18.9	538.50
19.0	539.30
19.1	540.00
19.2	540.80
19.3	541.60
19.4	542.30
19.5	543.10
19.6	543.90
19.7	544.60
19.8	545.40
19.9	546.20
20.0	546.90
20.1	547.70
20.2	548.50
20.3	549.20
20.4	550.00
20.5	550.80
20.6	551.50
20.7	552.30
20.8	553.10
20.9	553.80

Fuente: elaboración propia.

