

**DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA TASA DE
REAREACIÓN DE LOS RÍOS MOLINOS, TORCA,
ARZOBISPO Y DE LA QUEBRADA LA VIEJA, EN LA
CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ECUACIONES EMPÍRICAS.**

LUIS ALEJANDRO ORDUZ MEDINA

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2016**

**DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA TASA DE
REAIERACIÓN DE LOS RÍOS MOLINOS, TORCA,
ARZOBISPO Y DE LA QUEBRADA LA VIEJA, EN LA
CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE
ECUACIONES EMPÍRICAS.**

LUIS ALEJANDRO ORDUZ MEDINA

**SOLUCIÓN DE UN PROBLEMA DE INGENIERÍA PARA OPTAR EL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

DIRECTOR

CARLOS ANDRÉS PEÑA GUZMÁN

ING. AMBIENTAL Y SANITARIO MS.C.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ
2016**

RESUMEN

Los modelos de calidad permiten diseñar soluciones estructurales y no estructurales para alcanzar estándares, esto es fundamental, ya que los recursos son limitados y se deben establecer parámetros de priorización, para así realizar inversiones eficientes.

El estudio de ecosistemas locales permite disminuir el uso de información extranjera, la cual al ser aplicada en condiciones diferentes genera incertidumbres muy altas.

El presente proyecto tuvo como propósito determinar y comparar las tasas de reaeración (K_a) para los ríos Molinos, Torca, Arzobispo y la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá, mediante la aplicación de ecuaciones empíricas. Para ello se identificaron y seleccionaron las ecuaciones aplicables y los tramos de medición, se calcularon las K_a por medio de información de ensayos de trazadores y se realizó un análisis de sensibilidad de los principales parámetros.

Se obtuvieron valores de K_a entre 3.283-9.285 para La Vieja, 5.928–28.060 para Arzobispo, 7.913–54.63 para Molinos y 2.964–220 para Torca, mayormente de las ecuaciones de los autores Isaac y Gaudy y de Tsivoglou y Wallace. La ecuación de los autores Negulescu y Rojanski y de Parkhurs y Pomeroy arrojaron los valores atípicos más frecuentes. Finalmente se estableció que los parámetros con variaciones significativas en las K_a son: Velocidad, caudal y profundidad, y la distancia no representa una fuerte incidencia.

Palabras claves: Coeficiente, Dispersión, Reaeración, Trazador, Tiempo de viaje.

ABSTRACT

Quality models allow to design structural and non-structural solutions to achieve standards, this is crucial, since resources are limited and should establish parameters prioritization, thus make efficient investments.

The study of local ecosystems can reduce the use of other countries information, which when applied to different conditions generates very high uncertainties.

This project has the purpose of determine and compare the rates of re-aeration (K_a) for Molinos, Torca, Arzobispo and Quebrada la vieja in the city of Bogota, by applying empirical equations. To this they were identified and selected the applicable equations and measuring sections, the K_a were calculated using information from tracer tests and a sensitivity analysis of key parameters was performed.

The K_a was calculated by obtaining values between 3283-9285 for Quebrada La Vieja, 5928-28060 for the Arzobispo River, 7,913 - 54.63 for Molinos River and 2964-220 for the Torca river, mostly of the equations of Isaac authors and Gaudy, Tsivoglou and Wallace. The equation of Negulescu and Rojanski authors and Parkhurs and Pomeroy threw the most frequent outliers. Finally it was established that the parameters that determine significant variations in the K_a are: speed, flow and depth, and distance does not represent a strong impact.

Key Words: Coefficient, Dispersion, Reaeration, Tracer, Travel time.

1. INTRODUCCIÓN

El intercambio de oxígeno en las corrientes o cuerpos de agua es un proceso natural que representa diferentes indicadores tanto de calidad de agua, como niveles de autodepuración del cuerpo de agua, la determinación de la tasa de reaeración permite cuantificar el proceso de transferencia de oxígeno mediante modelos matemáticos y ecuaciones empíricas, estas últimas forman parte de muchos modelos de calidad de agua, modelos que pretenden establecer condiciones con el fin de obtener información teórica de los cuerpos de agua.

El presente proyecto de grado, tuvo como propósito determinar y comparar la tasa de reaeración para los ríos Molino, Torca, Arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá.

Para cumplir el objetivo propuesto fue necesario, llevar a cabo en primera medida la selección de tramos de estudio, por medio de una evaluación inicial, teniendo en cuenta criterios técnicos tales como fácil acceso, longitud de mezcla y curva hipsométrica para cada uno de estos cuerpos de agua. A partir de la selección de tramos y los puntos específicos para el muestreo se realizó el levantamiento de los datos según lo indicado por el “protocolo de toma de muestras de aguas superficiales” del IDEAM, el aforo se realizó con mediciones *in situ* con un micromolinete y en algunos casos con el método de flotador, los valores de temperatura y conductividad se registraron con ayuda de un Conductivímetro previamente calibrado.

Para la campaña de muestreo se llevaron a cabo cuatro etapas: ubicación de equipos y personal en los puntos seleccionados, mezcla o dilución del trazador (Sal), inyección del trazador y finalmente registro de datos *in situ* iniciales y de conductividad con una frecuencia de 10 segundos, hasta verificar el paso del trazador.

A partir del muestreo se procedió a realizar el análisis de trazadores, se registraron los valores de campo en una hoja de cálculo, posteriormente se estimaron los datos de velocidad media y se verificó la confiabilidad de la prueba de trazadores, mediante el uso de ecuaciones, así como también con software especializados que incluyen el modelo de transporte de solutos ADE.

La selección de las ecuaciones empíricas para determinar las tasas de reaeración se realizó mediante una serie de criterios técnicos en los cuales se indicaron las características propias de los ríos y la quebrada y posteriormente se compararon con los rangos de aplicabilidad de cada una de las ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía. A partir de las ecuaciones seleccionadas se estimaron las tasas de reaeración en cada uno de los tramos de los ríos en estudio, este procedimiento se llevó a cabo mediante la determinación del valor experimental para cada una, se utilizó como herramienta una hoja de cálculo que incluía varios condicionales

Finalmente se realizó un análisis de sensibilidad, el cual consiste en identificar parámetros que influyen en mayor o menor medida en el valor de la tasa de reaireación. Este procedimiento se realizó mediante la comparación del valor de la tasa de reaireación con los parámetros propios de cada cuerpo de agua. Se graficaron valores de ka vs velocidad, profundidad, caudal y distancia. Teniendo en cuenta la tendencia de los valores en cada una de la gráficas, se procedió a evaluar los datos dudosos encontrados en las tendencia más uniformes, para finalmente eliminar los datos atípicos en todas las gráficas y así obtener una tendencia más marcada y determinar la sensibilidad para cada uno de los parámetros en los diferentes tramos.

A partir del proceso anteriormente mencionado se determinó que la mayor tasa de reaireación se encuentra en el río Torca con un promedio de ka .

2. OBJETIVOS

GENERAL

Determinar y comparar la tasa de reaireación para los ríos Molinos, Torca, Arzobispo y de la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá mediante la aplicación de ecuaciones empíricas

ESPECÍFICOS

- Identificar las ecuaciones empleadas para el cálculo de tasa de reaireación.
- Seleccionar las ecuaciones aplicables para los ríos: Molinos, Torca, Arzobispo y la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá.
- Seleccionar los tramos de medición en los ríos: Molinos, Torca, Arzobispo y la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá.
- Calcular las tasas de reaireación correspondiente para cada uno de los ríos Molinos, Torca, Arzobispo y la quebrada La Vieja, en sus respectivos tramos.
- Realizar un análisis de sensibilidad para cada una de las ecuaciones seleccionadas.

3. MARCO TEÓRICO

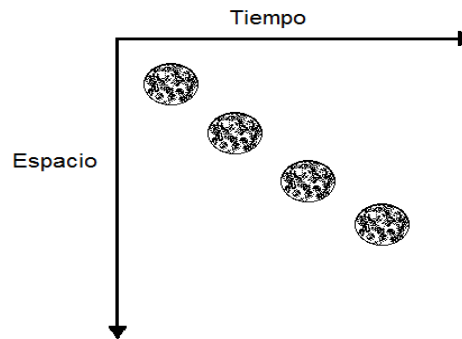
3.1. MOVIMIENTO Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN EL AGUA

3.1.1. ADVECCIÓN

El transporte por advección se produce debido al flujo continuo del fluido, es decir el transporte del contaminante se produce netamente por la potencia del caudal de la masa de agua, el transporte en los ríos resulta a partir del estudio hidráulico de los tramos, pues es necesario tener una relación entre el área y la velocidad con el caudal, durante este transporte esta sustancia cambia su concentración, pero no sufre reacciones químicas [1].

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta el movimiento de una sustancia cuando es afectado por advección pura únicamente, se observa como el contaminante viaja a la misma velocidad que el agua y que la extensión ocupada por el mismo es constante.

Gráfica 1 Transporte por Advección



Fuente: Modificado de [1]

En este orden de ideas, la tasa de transferencia de flujo advectivo, está en función de dos parámetros, la velocidad y la concentración, tal como lo expresa la ecuación 1.

$$I_x = u_x * c \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

$$I_x = \text{Flujo advectivo } [ML^{-2}T^{-1}]$$

$$u_x = \text{Velocidad } \left(\frac{m}{s}\right)$$

$$c = \text{concentración } \left(\frac{mg}{l}\right)$$

3.1.2. DIFUSIÓN

El transporte por difusión hace referencia al movimiento del contaminante debido a un proceso aleatorio de las partículas. En la difusión se traslada la sustancia formando una dilución en el tiempo con un movimiento al azar independiente de su centro de masa, existen tres procesos que definen este tipo de transporte. [2]

- Difusión molecular:

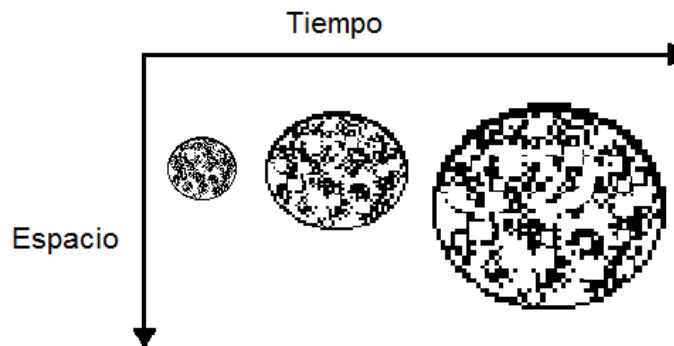
Es el desplazamiento o transporte de las partículas debido al movimiento browniano, en este caso las moléculas que son transportadas se mueven desde los puntos de mayor concentración hacia los de menor concentración. [3]

- Difusión turbulenta.

La difusión turbulenta es causada por operaciones externas que originan la mezcla en el agua, por ejemplo, debido a las turbulencias generadas al momento del rozamiento del agua con la acción del viento, a lo largo del cuerpo de agua. [3]

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta el movimiento de sustancias que incluye el transporte tanto por advección como por difusión, se observa como el círculo inicial se ha ampliado y difuminado además de transportarse por la velocidad del agua.

Gráfica 2 Difusión.



Fuente: Modificado de [1]

La tasa de transferencia de masa por difusión está regido por la primera ley de Fick, quien determinó que la masa transferida por difusión fue proporcional al área de la sección transversal y al gradiente de concentración. [4].

En este caso y si se trata de difusión pura, el transporte estaría en función además de la concentración de un coeficiente de difusión, el cual representa la facilidad con la que un soluto en particular se mueve en el agua. Así mismo este

coeficiente varia teniendo en cuenta el tamaño y forma del soluto, la viscosidad del agua y la temperatura. [5]

Teniendo en cuenta lo anterior el movimiento o transporte por difusión se rige por la ecuación 2. [4].

$$F = -D_m * \frac{dC}{dx} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde

$$F = \text{flujo de masa en } \left[\frac{M}{T} \right]$$

$$D_m = \text{Coeficiente de difusión } \left[\frac{L^2}{T} \right]$$

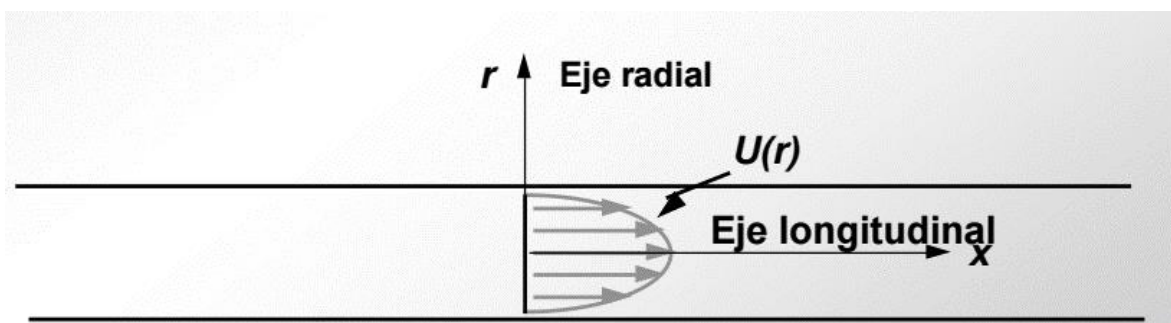
$$\frac{dC}{dx} = \text{Gradiente de concentración } \left[\frac{M}{L^3} \right]$$

3.1.3. DISPERSIÓN

La mezcla de los contaminantes en los cuerpos de agua por dispersión es causada por cambios en la velocidad entre dos sitios en el cuerpo de agua, es decir, que cuando se presentan estos cambios de velocidad la masa del contaminante se mueve y varía en su concentración más no en su composición. Estos cambios de velocidad se presentan al momento del rozamiento con el fondo del canal donde aumenta su fricción según la porosidad y morfología en los canales [1].

La Gráfica 3 representa el movimiento por dispersión, en el que se puede apreciar como el movimiento varia al igual que la velocidad a lo ancho.

Gráfica 3. Dispersión



Fuente [6]

3.2. MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

Un modelo matemático es la representación simplificada de un sistema complejo que busca obtener aproximaciones o respuestas sobre las actividades del sistema, estas aproximaciones regularmente se hacen en base a experimentos sobre el sistema en cuestión y bajo sus condiciones propias, el comportamiento del sistema es representado por un grupo de ecuaciones, probablemente en conjunto con expresiones lógicas, expresando relaciones entre variables y parámetros [7]

El propósito de estos modelos es reemplazar la realidad, permitiendo medir y experimentar de una forma rápida y poco costosa, cuando los experimentos reales son imposibles, muy costosos o toman mucho tiempo. [8]

Varios esfuerzos de modelación están enfocados a simular y predecir las consecuencias de los procesos naturales o de una acción o interferencia antrópica, un ejemplo son los modelos de calidad del agua, los cuales simulan escenarios de mejoramiento o detrimento en las características de un cuerpo de agua, a partir de la modificaciones por medio de variaciones en los vertimientos o incorporación de plantas de tratamiento entre otros.

En la actualidad existen una gran cantidad de modelos de calidad del agua, esto debido a los diversos estudios alrededor del mundo, sin embargo muchos de estos modelos han sido diseñados para circunstancias y ecosistemas específicos. No obstante también ha habido un esfuerzo considerable en diseñar modelos y software de libre uso, lo que se resume en un ahorro de trabajo y costos, además de ser software con reconocimiento normativo como los modelos SIMCAT, Tomcat, QUAL2E, QUASAR, MIKE-11 e ISIS entre otros. [9]

Es importante mencionar que los modelos tienen suposiciones y limitaciones que debe cumplir el cuerpo de agua de estudio ya que han sido desarrollados para fines particulares y según múltiples revisiones no existe un modelo que pueda proporcionar toda la funcionalidad requerida, por lo que es importante entender y aceptar que todo modelo presenta algún grado de incertidumbre, que se puede disminuir al realizar una elección adecuada del modelo. [9]

Al utilizar de manera responsable los modelos, estos pueden llegar a ser herramientas útiles para predecir el estado actual de la calidad del agua de una determinada zona y establecer una correlación entre las diferentes variables, dando cabida a establecer índices de calidad de agua o posiblemente determinar los límites máximos de carga permitida sobre un cuerpo de agua según el nivel de complejidad. [2]

Entre los usos más frecuentes de los modelos de calidad del agua se encuentra la modelación del Oxígeno disuelto (OD), su presencia o ausencia fue modelada por primera vez por Streeter y Phelps en 1925, quienes derivaron las ecuaciones clásicas para su simulación y la de la demanda biológica de oxígeno (DBO). [10].

Estas ecuaciones han formado la base de muchos modelos de calidad del agua que han sido desarrollados en todo el mundo desde la época. Uno de los principales motores a los que se debe el auge de modelos es el avance significativo en los últimos 20 años en la creación y uso de ordenadores con mayor capacidad de trabajo lo que ha permitido desarrollar software más sofisticados sin importar su requerimiento computacional. [9]

3.3. VARIABLES DE MODELOS DE CALIDAD DEL AGUA

3.4. DETERMINANTES DE CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua está definida por propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, inherentes al cuerpo de agua, debido a eventos naturales pero en mayor medida por la intervención antrópica. La calidad del agua cambia en función del contacto que presente con diversas sustancias que modifican sus características iniciales. [11]

3.4.1. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Los parámetros físicos alteran las propiedades organolépticas del agua al flotar o sedimentarse generan inconvenientes para la flora y fauna del cuerpo de agua, dentro de estos parámetros se encuentran los sólidos suspendidos, turbiedad, olor, color, sabor y temperatura, mientras que los parámetros químicos hacen referencia a sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua, algunos de estos contaminantes son nitratos, cloruros, fosfatos, sulfatos, metales pesados, sales y carbonatos, además de nitrógeno, amoníaco y cloro. [12]

3.4.2. OXÍGENO DISUELTO

El oxígeno disuelto (OD) es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua y que es esencial para mantener las aguas naturales saludables, es sin duda uno de los componentes más importantes de los sistemas hídricos, algunas formas de vida presentes, así como la calidad del agua dependen de las concentraciones en las que se encuentre. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuán contaminada está el agua y cuán bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal, concentraciones muy bajas de OD o la ausencia de éste, ocasionan la formación de un ambiente anaeróbico que genera reacciones químicas y bioquímicas que crean en el agua colores y olores desagradables. El proceso por el cual el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua superficiales es denominado reaeración, la cual con la fotosíntesis, son considerados las principales fuentes de oxígeno para las aguas superficiales [13].

Sobre los cauces existen diferentes fuentes de oxígeno disuelto como pueden ser, la transferencia de oxígeno atmosféricos, producción de oxígeno disuelto por fotosíntesis, y el oxígeno disuelto que pueden suministrar los diferentes tributarios. Del mismo modo existen demandas de oxígeno debido a la necesidad de oxígeno para la respiración de las plantas acuáticas, y diferentes procesos de oxidación de materia orgánica (DBO) [14].

3.4.3. Componentes microbiológicos

Los microorganismos presentes en el agua desempeñan diferentes funciones, principalmente la transformación de la materia en los ciclos biogeoquímicos. Sin embargo respecto a la calidad del agua la potencial transmisión de enfermedades es de suma preocupación, los principales grupos de interés desde el punto de vista de salud pública, asociados con agua residual o con heces son las bacterias, los virus, protozoarios y helmintos. [15]

3.5. REAIREACIÓN

Un suministro adecuado de OD es fundamental para mantener la vida acuática superior, los impactos por bajas concentraciones de oxígeno o condiciones anaerobias extremas han sido reconocidos desde hace más de un siglo, ya que tienen como resultado ecosistemas sin equilibrio, mortalidad o problemas en las actividades de los peces y olores entre otras molestias estéticas que impiden o disminuyen el uso y aprovechamiento potencial de los cuerpos de agua. [9]

Se conoce como reaireación al proceso por el cual el oxígeno y demás componente gaseosos del aire son renovados en las aguas en movimiento de un río o cuerpo de agua.

La tasa de reaireación se presenta alternativamente como una función sencilla de los parámetros hidráulicos, tales como la velocidad del corriente, ancho y la profundidad propios de los cuerpos de agua, a su vez estos modelos de predicción, que simulan el intercambio de oxígeno pueden dar a conocer la ubicación y el impacto de las descargas de aguas residuales en el recorrido de los ríos.

El alto consumo de oxígeno por descomposición de materia orgánica hace que los cuerpos de agua demanden una forma de recuperar sus condiciones en cuanto al oxígeno consumido, la recuperación de este oxígeno se realiza principalmente por el fenómeno de reaireación, debido a este fenómeno los ríos logran recuperar sus niveles de oxígeno disuelto, los cuales se pierden en los momentos de recibir vertimientos, la tasa de oxígeno que absorbe el cuerpo de agua es proporcional a déficit de oxígeno de esta.

El fenómeno de la reaireación ha sido estudiado mediante la ley de Fick la cual dicta la ecuación 3: [1]

$$\frac{dM}{dt} = \frac{-D * A * (OD - OD_{sat})}{X_f} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\frac{dM}{dt} = \left(\frac{D}{X_f}\right) * A * (OD_{sat} - OD)$$

Dónde:

$$\frac{dM}{dt} = \text{velocidad de transferencia de } O_2$$

D = Coeficiente de difusión

A = área en contacto aire – agua

t = tiempo

OD = Concentración oxígeno disuelto

OD_{sat} = Concentración oxígeno saturado

X_f = espesor de interfase aire – agua

Existen factores que contribuyen la reaireación atmosférica como lo son la velocidad y profundidad del cuerpo de agua y la velocidad del viento, la presencia de estos factores favorece la transferencia de oxígeno entre la fase líquida y la fase gaseosa, cuando mayor sea la presencia de estos factores aumentará su capacidad de absorber oxígeno atmosférico. La relación de D/X_f es denominada coeficiente de reaireación (K_a), por ello se determina un volumen de agua y se divide en los términos de la ecuación 4, para obtener:

$$\frac{1}{V} * \frac{dM}{dt} = (K_a) * \frac{A}{V} * (OD_{sat} - OD) \quad \text{Ecuación 4}$$

Entonces, si

$$H = \frac{V}{A} (\text{profundidad media})$$

$$K_1 = \frac{K_a}{H}$$

La ecuación 5 queda:

$$\frac{dOD}{dt} = K_1 * (OD_{sat} - OD) \quad \text{Ecuación 5}$$

Integrando la ecuación, finalmente resulta la ecuación 6 y 7: [9]

$$\frac{D_t}{D_0} = e^{-k_1 * t} \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

D_t y D_0 = deficit de oxígeno en tiempo

$$D_t = D_0 e^{-k_1 * t} \quad \text{Ecuación 7}$$

La constante k_1 , es necesario hacerle su respectiva corrección por la interacción con la temperatura y el valor de concentración de oxígeno disuelto, esta corrección se realiza con la ecuación 8: [16]

$$K_1^{T^\circ C} = K^{20^\circ C} * \theta^{(T-20)} \quad \text{Ecuación 8}$$

La corrección de la transferencia mediante el coeficiente de temperatura $\theta=1.0241$, sin embargo el valor de esta constante se ha estudiado en varias condiciones y se dice que esto no puede ser representado por un valor constante, según el modelo Dobbins los valores de θ se encuentran en un intervalo entre 1.005 y 1.042 y una temperatura entre 0°C y 35°C. [17].

3.5.1. LONGITUD DE MEZCLA

En el análisis de las corrientes de agua superficial, es necesario estudiar las descargas realizadas sobre los cuerpos de agua, en el caso de las descargas puntuales es necesario conocer la distancia mínima en la cual la descarga se mezcla completamente con las aguas que las reciben, esta distancia es conocida como la longitud de mezcla o de dilución. Este proceso de análisis es primordial conocer el punto de la descarga, esta descarga se puede realizar desde el centro del canal o desde la orilla, teniendo en cuenta que el cuerpo de agua permanece

uniforme en cuanto a los parámetros de calidad de agua, cuando se realiza una descarga desde la orilla la dilución con el río puede ser a mayor distancia, pero si se hace el centro la descarga se mezclara a menor distancia.

En 2001 Kashefipour & Falconer establecieron una nueva relación en el coeficiente de dispersión para cauces naturales, sin ningún tipo de canalización antrópica, encerrando los parámetros hidráulicos de profundidad, ancho, velocidad y velocidad de corte del cuerpo de agua, esta relación la aplicaron para 30 ríos en Estados Unidos, la ecuación 9 es plantea esta relación [18]:

$$D = 10.612 HU * \left(\frac{U}{U^*} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

D = *coeficiente de dispersion longitudinal*

U = *Velocidad media de la sección transversal*

U^* = *Velocidad de corte*

H = *Profundidad de flujo*

Para la determinación de la longitud de mezcla en los cuerpos de agua canalizados y para los dos tipos de descarga, se debe calcular inicialmente el coeficiente de dispersión lateral con las ecuaciones 10,11 y 12:

Para descargas desde la orilla:

$$L_m = 0,4 * v * \frac{B^2}{E_{lat}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Para descargas desde el centro del canal

$$L_m = 0,1 * v * \frac{B^2}{E_{lat}} \quad \text{Ecuación 11}$$

El coeficiente de dispersión lateral

$$E_{lat} = 0,6 * H * \sqrt{g * H * s}$$

Ecuación 12

Dónde:

L_m = distancia desde la fuente a la descarga

v : velocidad promedio $\left(\frac{m}{s}\right)$

B = ancho promedio (m)

H = profundidad promedio (m)

s = pendiente

g = gravedad

3.5.2. FACTORES HIDRÁULICOS

Los modelos de calidad del agua relacionan parámetros hidráulicos del cuerpo de agua, algunos autores recopilaron ecuaciones que incluyen los siguientes parámetros:

- Pendiente (S) en (m/m)

El valor de la pendiente es el grado de inclinación del terreno, es decir, la diferencia en la altura de la superficie de agua a lo largo de la longitud del río, su relación es directa, a mayor inclinación mayor valor de pendiente.

- Caudal (Q) en (m³/s)

El Caudal representa la cantidad de agua que pasa por el cauce de un río en un determinado punto aguas arriba y aguas abajo y en un tiempo determinado, para la determinación de valores de tasas de reaeración se relacionan parámetros del área de sección del río y la velocidad con la que se transporta el río.

- Velocidad (V) en (m/s).

La velocidad representa los valores de transporte en este caso con el fin de determinar valores de tiempo de viaje sobre la longitud del tramo determinado, en su mayoría se usa el tiempo de viaje centroidal o tiempo de viaje al pico, se deben examinar cada uno de las condiciones del río pues es importante que para la estimación de la tasa de reaireación los datos deben estar en un intervalo de 0.003 a 1.83 m/s, según la ecuación y las observaciones de los autores.

- Ancho (W) en (m).

Se establece el valor promedio del ancho del río a lo largo del tramo a estudiar, del mismo modo establecer la geometría del canal o cauce natural.

- Profundidad (D) en (m).

El valor de la profundidad para este caso se define de la relación de la ecuación de continuidad como lo muestra la ecuación 19.

$$D = \frac{Q\left(\frac{m^3}{s}\right)}{V\left(\frac{m}{s}\right) * W(m)} \quad \text{Ecuación 13}$$

De esta forma se obtiene un valor más representativo de la profundidad, pues tiene parámetros como la velocidad y el ancho del río.

3.6. TRAZADORES

Los trazadores son herramientas descriptivas de ríos o cuerpos de agua, su objetivo principalmente es determinar caudales, tiempos de viaje y estudiar patrones de mezcla aguas debajo de la descarga de este, adicionalmente sirven para estudiar movimientos de agua subterránea y realizar balances de masa, ya que lo trazadores proveen mejor información al momento de calibrar modelos de transporte, hidráulico y de calidad de agua [2].

Las características que deben tener los trazadores para ser utilizados en la medición de caudales son [19]:

- Deben mezclarse fácilmente con el agua para garantizar mezclas homogéneas.

- No ser corrosivo, ni tóxico.
- Ser de fácil detección en el agua, aun en concentraciones muy bajas.
- Ser conservativos de tal manera que no se degraden entre el momento de la inyección y el momento de la toma y análisis de la muestra.

Esta metodología es la más empleada en la actualidad ya que es sencilla, económica y más precisa que las demás. Se puede aplicar en ríos independientemente de su calidad y no es necesario conocer las tasas de otros procesos que influyen como fuente o disminución del Oxígeno, los cuales resultan costosos e inexactos [20].

Este método consiste en la inyección de una sustancia volátil al sistema la cual [2]:

- Se volatilizan en forma análoga al Oxígeno
- No reacciona
- En bajas concentraciones es inofensiva para el ambiente y la salud
- Sus concentraciones pueden ser medida a un costo razonable.

Las sustancias volátiles o trazadoras más comunes son:

- Los radioactivos (Krypton-85)
- Hidrocarburos (Etileno, Propano, Metil Cloruro, etc.)
- Trazadores inorgánicos (Hexafluoruro de azufre, SF₆).
- Estos trazadores generalmente son descargados junto con un trazador conservativo no volátil (Tritio, Litio, Bromo, Rodamina B o Rodamina WT) para determinar la dispersión en el río.

Un ensayo de trazadores se considera válido si el estado de ganancia estable (SSG) se encuentra entre un rango de 0,95 a 1,05 [21] El estado de ganancia estable es la relación de la masa de trazador medido entre dos puntos de medición, y está dado por la Ecuación 14 :

$$SSG = \frac{\int C_2, dt}{\int C_1, dt} \quad \text{Ecuación 14}$$

MODELOS DE TRANSPORTE DE SOLUTOS

Los modelos de transporte de solutos (sustancias disueltas) permiten representar los procesos de transporte por advección y difusión turbulenta en una corriente. [21]

Realizar una calibración óptima del modelo de transporte seleccionado, es un inicio satisfactorio para representar adecuadamente parámetros como el tiempo de primer arribo y el tiempo de viaje, parámetros fundamentales en

usos importantes como lo son los modelos de alerta temprana y planes de contingencia ante eventos de contaminación, así como también parámetros como el tiempo de residencia son fundamentales en aplicaciones en modelos de calidad del agua. [21]

Se han desarrollado varios modelos de transporte de solutos de carácter predictivo tales como el modelo de advección dispersión (ADE), el modelo de almacenamiento transitorio (TS), el cual es un modelo que evoluciona del ADE para corregir e incluir algunas características locales que se presentan en los ríos de montaña y el modelo de zona muerta agregada (ADZ) el cual fue seleccionado en el presente informe

MODELO ADVECCIÓN DISPERSIÓN ADE

El modelo de ADE fue desarrollado en 1954 por Taylor Geoffrey [22], a partir de las ecuaciones que describen las leyes físicas de flujo de los fluidos y los principales mecanismos de transporte descritos en el numeral 4.1. El modelo presenta las siguientes suposiciones [2]:

- La sección transversal presenta mezcla completa.
- Solo aplica para solutos conservativos.
- Flujo permanente.
- Coeficiente de dispersión constante en el tramo.

ALMACENAMIENTO TEMPORAL (TS)

Adiciona en el modelo ADE el concepto de almacenamiento temporal, el cual contiene los efectos de mezcla ocasionados por los meandros, secuencias piscina-rápido y piscina-caída, islas, material vegetal, estructuras de control e interacción con flujos subsuperficiales. En este modelo se establecen dos coeficientes adicionales, el coeficiente de dispersión el cual se encarga del transporte a lo largo del canal principal similar al modelo ADE y el coeficiente de intercambio entre la zona de almacenamiento y el canal principal. [23]

ZONA MUERTA AGREGADA (ADZ)

El modelo ADZ utiliza series de datos y tiempo para verificar estadísticamente la estructura del modelo que mejor represente los fenómenos observados. Este enfoque contiene una ventaja en los procesos de calibración y simulación de transporte de soluto, comparado con el modelo ADE y TS, porque no tiene la necesidad de realizar suposiciones acerca de cómo se desarrollan los procesos físicos dispersivos, por el contrario, todos los análisis están basados en los datos de campo [23]

ECUACIONES PREDICTIVAS DE TASAS DE REAIREACIÓN

Determinar la tasa de reaireación en una corriente de agua superficial permite cuantificar el proceso de reaireación dentro de un modelo matemático de calidad del agua, la tasa de reaireación se presenta generalmente como una función sencilla de los parámetros hidráulicos, tales como la velocidad del corriente, ancho y la profundidad propios de los cuerpos de agua, a su vez estos modelos de predicción, que simulan el intercambio de oxígeno permiten dar a conocer la ubicación y el impacto permisible de las descargas de aguas residuales en el recorrido de los ríos.

Cada uno de estos modelos para estimar la tasa de reaireación, suministran soportes científicamente sustentados, pero sus resultados poseen diferencias significativas, esto debido a que cada una de estas ecuaciones fueron elaboradas para ser aplicadas a determinadas características de la morfología del río, los autores de estas ecuaciones establece un rango de control y aplicabilidad para las diferentes variables de la ecuación, del buen tratamiento de estos datos depende la solidez de los resultados, ya que estos permiten desarrollar soportes sustentados científicamente para la toma de decisiones acerca del aprovechamiento del recurso, la evaluación de alternativas de saneamiento y la capacidad de asimilación de descargas de vertimientos.

Se realizó la compilación de las ecuaciones que predicen la tasa de reaireación en ríos en función de parámetros hidráulicos, esta compilación se presenta teniendo en cuenta la extensión de la revisión bibliográfica, en la Tabla 1 se muestra la relación de las ecuaciones, sus autores y datos de su aplicabilidad.

Tabla 1 Ecuaciones predictivas de las tasas de reaireación en ríos

Autor (es)	Ka en base e (d^{-1} a 20°C)	Unidades	Aplicabilidad y observaciones
O'connor y dobbins 1958	$Ka = 3,93 \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	$U = m/s$ $H = m$	profundidad moderada a profunda $0,305 m \leq H \leq 9,14m$ $0,15 m/s \leq U \leq 0,49 m/s$ $0,05 d^{-1} \leq Ka \leq 12,22 d^{-1}$
Churchill et al 1962	$Ka = 3,93 \frac{U^{0,969}}{H^{1,673}}$	$U = m/s$ $H = m$	Basado en tasas de reaireación observadas aguas debajo de presas, en las cuales se conocía un déficit de oxígeno. No es aplicable a ríos con pequeñas cascadas (fenómeno de burbujas) $0,61 m \leq H \leq 3,35m$ $0,55 m/s \leq U \leq 1,5 m/s$ $0,000126 m/m \leq S \leq 0,002351 m/m$ $0,225 d^{-1} \leq Ka \leq 5,56 d^{-1}$



Krenkel y Orlob 1962	$Ka = 173,4 \frac{U^{0,408}}{H^{0,66}}$ $Ka = 2750,3 \frac{D_l^{1,321}}{H^{2,32}}$	$U = m/s$ $H = m$ $S = m/m$ $D_l = m^2/s$	<p>Basado en mediciones realizadas en un canal de 0,305 m de ancho, mediante desoxigenación el agua.</p> <p>$0,02441 m \leq H \leq 0,07m$</p> <p>El coeficiente de dispersión longitudinal del canal (D_l), estuvo por debajo del rango esperado en sistemas naturales.</p>
Owens et al 1964	$Ka = 5,34 \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$ $Ka = 6,935 \frac{U^{0,73}}{H^{1,75}}$	$U = m/s$ $H = m$	<p>Combinó los datos de sus investigaciones con los datos de Churchill et al 1962 y Gameson et al 1955. Se monitoreó la recuperación del oxígeno en seis ríos en Inglaterra, los cuales fueron desoxigenados con sulfito de sodio.</p> <p>$0,122 m \leq H \leq 3,35m$</p> <p>$0,0305 m/s \leq U \leq 1,52 m/s$</p> <p>$0,000156 m/m \leq S \leq 0,0106 m/m$</p> <p>$0,31 d^{-1} \leq Ka \leq 49,17 d^{-1}$</p> <p>La segunda ecuación fue propuesta para ríos rápidos y poco profundos, y obtenida con los datos del Water Pollution Research Laboratory (WPRL)</p> <p>$0,122 m \leq H \leq 0,7315m$</p> <p>$0,0305 m/s \leq U \leq 0,549 m/s$</p>
Dobbins 1965	$Ka = 55,4 \frac{1}{0,9 F^{1,5}} \frac{F^2 US^{0,375}}{H} \coth \left[\frac{4,75 US^{0,125}}{0,9 F^{0,5}} \right]$	$U = m/s$ $H = m$ $S = m/m$	<p>Teoría combinada con mediciones en ríos y datos de canales de Krenkel y Orlob (1963)</p> <p>Coth= cotangente hiperbólica del ángulo en radianes</p>
Langbein y Durum (1967)	$Ka = 5,135 \frac{U}{H^{1,33}}$	$U = m/s$ $H = m$	<p>Basado en los datos de O'Connor y Dobbins (1958), Churchill et al (1962), Krenkel y Orlob (1963) y Streeter et al (1936)</p>
Isaac y Gaudy (1968)	$Ka = 4,75 \frac{U}{H^{1,5}}$	$U = m/s$ $H = m$	<p>Ecuación desarrollada usando un análisis de regresión a los datos recolectados usando un canal con recirculación en un tanque cilíndrico. Posteriormente la relacionó con los datos de campo de Churchill et al (1962) obteniendo unos nuevos coeficientes.</p>
Negulescu y Rojanski (1969)	$Ka = 10,9 \left(\frac{U}{H} \right)^{0,85}$	$U = m/s$ $H = m$	<p>Desarrollado a partir de canales con recirculación y es aplicable en ríos con:</p> <p>$H = 0,5 m$</p> <p>$U = 1,2 m/s$</p>



	$Ka = 352,3 D_t \left(\frac{U}{H}\right)^{1,63}$		
Thackston y Krenkel (1969)	$Ka = 24,9 \frac{1 F^{0,5} u}{H}$	$u^* = m/s$ $H = m$	Basado en mediciones realizadas en un canal de 0,6 m de ancho, mediante desoxygenación el agua. $0,015 m \leq H \leq 0,07m$
Cadwallader y McDonnell (1969)	$Ka = 185,5 \frac{US^{0,5}}{H}$	$U = m/s$ $H = m$ $S = m/m$	Basado en un análisis multivariado de datos de reaireación de Churchill et al (1962), Owens et al (1964) y WPRL (1966) $0,06 m \leq H \leq 0,274m$ $0,0305 m/s \leq U \leq 0,213 m/s$ $0,000014 m/m \leq S \leq 0,00092 m/m$ $0,26 d^{-1} \leq Ka \leq 8,5 d^{-1}$
Padden y Gloyna (1971)	$Ka = 4,547 \frac{U^{0,703}}{H^{1,054}}$	$U = m/s$ $H = m$	Análisis mediante regresión a datos en los cuales la tasa de reaireación estaba en el rango: $9,8 d^{-1} \leq Ka \leq 28,8 d^{-1}$
Parkhurs y Pomeroy (1972)	$Ka = 23,04 \frac{1 0,17F^2 SU^{3/8}}{H}$	$H = m$ $S = m/m$	Desarrollado en datos de 12 investigaciones en 12 alcantarillados y ríos
Lau (1972)	$Ka = 2515 \left(\frac{u}{U}\right)^3 \frac{U}{H}$	$u^* = m/s$ $U = m/s$ $H = m$	Basado en un nuevo análisis de los datos de Thackston y Krenkel (1969), Krenkel (1960) y Churchill et al (1962), aplicable a ríos con: $H = 0,6 - 0,9 m$ $U = 0,1524 m/s$
Bennett y Rathbun (1972)	$Ka = 32,5 \frac{U^{0,413} S^{0,273}}{H^{1,408}}$ $Ka = 5,585 \frac{U^{0,607}}{H^{1,689}}$	$U = m/s$ $H = m$ $S = m/m$	Estas 2 ecuaciones están basadas en unos nuevos análisis de registro de datos históricos. La segunda ecuación predice mejor, pero no tiene el término de la pendiente.
Tsivoglou y Wallace (1972)	$Ka = 0,1573 \left(\frac{H}{t}\right)$	$H = m$ $t = d$	Basado en datos de investigaciones realizadas con trazadores radioactivos en cinco ríos.
Bansal (1973)	$Ka = 1,8 \frac{U^{0,6}}{H^{1,4}}$	$U = m/s$ $H = m$	Basado en un nuevo análisis de los datos de reaireación realizados por Churchill et al (1962), O'Connor y Dobbins (1958) y Langbein y Durum (1967)
Grant (1976)	$Ka = 0,262 \left(\frac{H}{t}\right)$	$H = m$ $t = d$	Basado en datos de 10 pequeños ríos en Winsconsin, usando técnicas de trazadores radioactivos.



			$0,008495 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 1,0477 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,000227 \text{ m}/\text{m} \leq S \leq 0,01326 \text{ m}/\text{m}$ $2,1 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 55 \text{ d}^{-1}$
Foree (1976)	$Ka = 0,266 * 12,26 S^{1/2}$	$S = m/m$	<p>La técnica usada fue la de trazadores radioactivos en pequeños ríos en Kentucky</p> $0 \text{ m}/\text{m} \leq S \leq 0,0079548 \text{ m}/\text{m}$ $0,38 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 23,3 \text{ d}^{-1}$
Tsivoglou y Neal (1976)	$Ka = 0,3609 \left(\frac{H}{t}\right)$ para $0,028 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 0,28 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 0,1772 \left(\frac{H}{t}\right)$ para $0,708 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 85 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 13566 US$	$H = m$ $t = d$ $U = m/s$ $S = m/m$	<p>Basado en datos recolectados en 24 diferentes ríos usando el método de trazadores radioactivos.</p> <p>KILPATRICK et al, 1989 recomienda utilizar la segunda ecuación de Tsivoglou y Neal para $S = 0,003 \text{ m}/\text{m}$</p>
Foree (1977)	$Ka = 0,789 * 0,63 * 7640 S^{1,15} 91464567 q^{0,25}$ para $5,46x10^{-10} \leq q \leq 1,09x10^{-8}$ $Ka = 0,789 * 0,63 * 153465,5 S^{1,5}$ para $q \leq 1,09x10^{-8}$ $Ka = 0,37 * 0,63 * 7640 S^{1,15}$ para $q \leq 1,09x10^{-10}$	$S = m/m$ $q = \frac{m^3/\text{s}}{m^2}$	<p>Nuevo análisis a partir de los datos de Foree (1976)</p>
Ice y Brown (1978)	$Ka = 55 \frac{W^{2/3} S^{1/2} U^7/6 g^{1/2}}{Q^{2/3}}$	$W = m$ $U = m/s$ $S = m/m$ $Q = m^3/s$	<p>Basado en datos recolectados en muchos ríos pequeños en Oregon E.U.</p>
Grant (1978)	$Ka = 0,1748 \left(\frac{H}{t}\right)$	$H = m$ $t = d$	<p>Basado en trazadores radioactivos desarrollado en los ríos Rock, Wisconsin e Illinois</p> $7,36 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 29,16 \text{ m}^3/\text{s}$ $0,0762 \text{ m}/\text{s} \leq U \leq 0,4877 \text{ m}/\text{s}$ $0,000038 \text{ m}/\text{m} \leq S \leq 0,00066 \text{ m}/\text{m}$ $0,01 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 0,8 \text{ d}^{-1}$
Shindala Y Truax (1980)	$Ka = 0,233 \left(\frac{H}{t}\right)$ para $Q \leq 0,283 \text{ m}^3/\text{s}$	$H = m$ $t = d$	<p>Basado en análisis estadísticos de coeficientes de reaeración para siete estados, donde se utilizó el método de trazadores</p>



	$Ka = 0,1748 \left(\frac{H}{t}\right)$ para $0,283 \leq Q \leq 7,93 \text{ m}^3/\text{s}$		radioactivos.
Long (1984)	$Ka = 1,923 \frac{U^{0,273}}{H^{0,894}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Conocida como la reacción de "Texas" basada en datos recolectados en ríos Texas E.U.
Parker y Gay (1987)	$Ka = 312 \frac{U^{0,355} S^{0,438}}{H^{0,176}}$	$U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$	Basado en una técnica de regresión múltiple a treinta grupos de datos que contenían características físicas hidrológicas y de calidad de agua $0,122 \text{ m} \leq H \leq 1,92 \text{ m}$ $0,0396 \text{ m/s} \leq U \leq 0,655 \text{ m/s}$ $0,00017 \text{ m/m} \leq S \leq 0,0015 \text{ m/m}$ $0,4 \text{ d}^{-1} \leq Ka \leq 67,7 \text{ d}^{-1}$
Melching y Flores (1999)	$Ka = 517 \frac{US^{0,524}}{Q^{0,242}}$ para ríos rápidos y estanques $Q \leq 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 596 \frac{US^{0,528}}{Q^{0,136}}$ para ríos rápidos y estanques $Q \leq 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 88 \frac{US^{0,313}}{H^{0,353}}$ para ríos controlados por la forma del canal $Q \leq 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$ $Ka = 142 \frac{US^{0,333}}{H^{0,66} W^{0,243}}$ para ríos controlados por la forma del canal $Q \leq 0,556 \text{ m}^3/\text{s}$	$W = \text{m}$ $U = \text{m/s}$ $H = \text{m}$ $S = \text{m/m}$ $Q = \text{m}^3/\text{s}$	Ecuaciones derivadas a partir de una compilación de datos, K_2 obtenidos con el método de trazadores gaseosos, realizada por el USGS Estados Unidos. Este estudio incluyó 493 tramos en 166 ríos en 23 estados. Después de separar y eliminar las mediciones potencialmente erróneas, el grupo de datos se redujo a 370 mediciones, las cuales se dividieron en cuatro grupos, según el caudal del tramo.
Thackston y Dawson (2001)	$Ka = 0,00002519 F^{1/4} \frac{u^*}{H}$	$u^* = \text{m/s}$ $H = \text{m}$	Realizaron una calibración de la ecuación de Thackston y Krenkel (1969), a partir de los datos de O'Connor y Dobbins (1956), Churchill et al (1962), Parkhurst y Pomeroy (1972), Ruhl y Smoot (1987) y Parker y DeSimone. Aplicable a ríos con velocidades bajas, con pequeños números de Froude ($F < 2$), sin pequeñas cascadas ni macro rugosidades (rocas grandes)
Gualtieri et al (2002)	$Ka = \frac{D_m^{2/3} v^{1/3}}{HR_m^{2/3} \bar{Y} \left(\frac{gS}{2g}\right)} \frac{2^{1/3}}{Sc^{2/3} Re_m^{2/3}} \frac{U}{H} Re^{1/3} F^{2/3} S$	$S = \text{m/m}$ $\bar{Y} = \text{m}$ $H = \text{m}$ $g = \text{m/s}^2$ $D_m = \text{m}^2/\text{s}$ $T_s = \text{Kg/s}^2$	Los autores proponen una aproximación teórica para comprender los procesos de transferencia de masas en la interfase agua-aire, la cual está basada en un análisis dimensional.

		$v = m^2/s$ $U = m/s$	
--	--	--------------------------	--

Fuente: adaptado de [24]

$F = \text{número de Froud} \frac{U}{\sqrt{gH}}$

$Sc = \text{Número Schmidt} = \nu/D_m$

$Re = \text{número de Reynolds}$

$D_l = \text{Coeficiente de dispersion longitudinal}$

$D_m = \text{Coeficiente de difusion molecular}$

q

$= \text{caudal del rio dividido por area de drenaje de la cuenca}$

$T_s = \text{tension superficial del agua}$

$t = \text{tiempo transcurrido entre los centroides de las curvas del trazador en los dos sitios de medicion}$

$\nu = \text{viscosidad cinematica}$

$H = \text{profundidad media del agua}$

$W = \text{ancho superior del canal o río}$

$S = \text{pendiente}$

$U = \text{velocidad media del flujo}$

$R = \text{radio hidraulico}$

$g = \text{aceleracion de la gravedad}$

$u * \text{Velocidad de corte} = \sqrt{gRS}$

4. METODOLOGÍA

4.1. SELECCIÓN DE TRAMOS

La selección de estos tramos se realizó mediante una campaña de reconocimiento en donde se llevó a cabo un recorrido por los ríos Arzobispo, Molinos, Torca y la quebrada La Vieja. Durante estos recorridos se ubicaban sitios de fácil acceso para los muestreos, puntos de interés, sitios relevantes para la logística del muestreo, en general en esta campaña se tomaron puntos con coordenadas a lo largo de los cuerpos de agua. Así mismo se hizo un levantamiento de la información necesaria para determinar la curva hipsométrica y la longitud de mezcla completa para cada uno de estos cuerpos de agua.

Para determinar la selección de los tramos se llevó a cabo una evaluación inicial según los siguientes criterios técnicos ordenados según su relevancia:

Curva hipsométrica

La curva hipsométrica muestra la variación media del relieve de la cuenca, es decir, representa la variación de la altura de la superficie en el porcentaje de área drenada. La determinación de la curva hipsométrica permite establecer tramos en los cuales la pendiente es más pronunciada y los tramos con pendiente más suave. [25]

Fácil acceso

Se ubicaron sitios que sean de fácil acceso y que al momento de realizar el monitoreo no presente riesgos potenciales al personal o equipos que realizará el muestreo, la ubicación de estos sitios son probablemente los aspectos más importantes a tener en cuenta durante la planeación y logística del muestreo, pues a partir de estos sitios se establecen los materiales o equipos necesarios para tal punto.

Longitud de mezcla completa

Para la determinación de la ubicación del primer punto de medición, este deberá garantizar la condición de que el trazador ya presenta una condición de mezcla completa. Se verifico que el flujo fuera continuo, para garantizar la condición de mezcla completa entre el punto de descarga del trazador y los dos puntos aguas abajo en los cuales se instalaran los punto donde de monitoreo.

En los cuerpos de agua canalizados y para los dos tipos de descarga, se debe calcular inicialmente el coeficiente de dispersión lateral con las Ecuación 15 y Ecuación 16 16:

- Para descargas desde el centro del canal

$$L_m(m) = 0,1 * v * \frac{B^2}{E_{lat}} \quad \text{Ecuación 15}$$

- El coeficiente de dispersión lateral E_{lat}

$$E_{lat} = 0,6 * H * \sqrt{g * H * s} \quad \text{Ecuación 16}$$

4.2. CAMPAÑAS DE MUESTREO

El levantamiento de los datos se realizó según lo indicado por el “protocolo de toma de muestras de aguas superficiales” del IDEAM, el aforo se realizó con mediciones *in situ* con un micromolinetete y en algunos casos con el método flotador, los valores de temperatura y conductividad se registraron con ayuda de un Conductivímetro previamente calibrado, el registro de estos datos se realizó de forma instantánea por medio de muestras puntuales.

Para la campaña de muestreo llevaron a cabo varias etapas:

- La primera etapa en la cual se ubicaron los equipos y el personal en los tramos y sitio determinados, adicionalmente se realizó la toma inicial de datos de temperatura, caudal y conductividad, esta última cada 10 segundos.
- La segunda etapa se realizó la mezcla o dilución del trazador (Sal) el cual en todos los muestreos su masa fue de 4 kilogramos y se verificó su correcta dilución en una muestra de agua del mismo cauce
- La tercera etapa es en la cual se inyectó el trazador con descarga a lo ancho del canal con el fin de favorecer la mezcla completa y posteriormente se comunicó con el personal para que registran los datos de conductividad mostrados por los equipos situados en el cauce, estos datos con una frecuencia de 10 segundos.
- La cuarta etapa se da por finalizada la campaña de muestreo y es cuando el trazador paso en su totalidad sobre el cauce, es decir, al momento de descargar el trazador el dato de conductividad comienza a tener un crecimiento de debido al paso del trazador, cuando el trazador pasa en su totalidad por el punto de monitoreo es cuando alcanza el valor inicial tomado en la primera etapa de la campaña de muestreo.

Las fechas de las mediciones realizadas se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Fechas de muestreos.

Fecha	Muestreo
-------	----------

Septiembre 19 de 2015	Campaña de reconocimiento Quebrada La Vieja y Río Arzobispo
Septiembre 20 de 2015	Campaña de Reconocimiento Río Molinos y Río Torca
Octubre 24 de 2015	Muestreo Río Arzobispo
Octubre 25 de 2015	Muestreo Quebrada la Vieja
Noviembre 21 de 2015	Muestreo Río Torca
Noviembre 22 de 2015	Muestreo Río Molinos
Febrero 13 de 2016	Muestreo Río Arzobispo
Febrero 14 de 2016	Muestreo Quebrada la Vieja
Febrero 20 de 2016	Muestreo Río Torca
Febrero 21 de 2016	Muestreo Río Molinos

Los equipos necesarios para estos muestreos se mencionan a continuación:

- 1 flexometro
- 1 GPS
- 2 conductivímetros
- 1 regla
- 1 micromolinete
- 1 balde
- 4 Kilogramos de Sal

4.2. ANÁLISIS DE TRAZADORES

El proceso de análisis de trazadores inicial al finalizar las campañas de muestreo y se constituye por 3 etapas:

1. Registro de valores de campo: en una hoja de cálculo se registraron los valores de profundidad, ancho, pendiente, masa de trazador (sal), caudal, tiempo y conductividad, estos últimos tomados cada 10 segundos en campo y se realiza la conversión de conductividad a concentración con ayuda de la ecuación resultante de la curva de calibración del equipo, todo esto para los dos puntos registrado.
2. Estimar los datos de velocidad media con la Ecuación 17

$$U = \frac{x_2 - x_1}{\bar{t}_2 - \bar{t}_1}$$

Dónde:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i + c_{i+1} t_{i+1}) * (t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i + c_{i+1}) * (t_{i+1} - t_i)} \quad \text{Ecuación 17}$$

Determinar el coeficiente de dispersión longitudinal de Fischer [26],

3. Ecuación 17 y Ecuación 18 respectivamente.

$$D = \frac{U^2 * (\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{2 * (t_2 - t_1)} \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i t_i^2 + c_{i+1} t_{i+1}^2) * (t_{i+1} - t_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} (c_i + c_{i+1}) * (t_{i+1} - t_i)} - t^{-2}$$

4. Verificación de la prueba de trazadores

El análisis de las pruebas de trazadores se puede verificar mediante la Ecuación 19, pues en el muestreo se tomaron datos independientes del caudal y se verifica la validez del experimento con trazadores según la conservación de la masa y la mezcla completa.

$$Q = \frac{M}{\int_0^t C * dt} \quad \text{Ecuación 19}$$

Adicionalmente se realizó una verificación con un software para la modelación de transporte de solutos [27] el cual incluye modelos de transporte advección-dispersión (ADE), almacenamiento temporal (TS) y Modelo de zona muerta agregada (ADZ), en este caso se usó el modelo ADZ. Además de un software para el análisis de trazadores [28] el cual permite realizar un análisis más detallado de los datos tomados en campo.

4.3. SELECCIÓN DE ECUACIONES DE TASAS DE REAIREACIÓN

La selección de las ecuaciones se realizó mediante una serie de criterios o rangos de aplicabilidad previamente establecida para cada ecuación, de este modo se indican las características propias de los ríos y la quebrada y posteriormente se compararon con los rangos de aplicabilidad de cada una de las ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía. Se van a comparar los parámetros como: caudal, velocidad, profundidad, ancho, radio hidráulico y número de Froude, con las observaciones y aplicabilidad de las ecuaciones empíricas, de este modo se realizó el filtro para seleccionar las ecuaciones a implementar.

En esta comparación se omitieron factores como la transferencia de masa y la velocidad del viento, pues se estableció que estas últimas están en función de parámetros como: pendiente del canal, número de Reynolds, número de Froude y la rugosidad relativa. [13]

4.4. CALCULO DE TASAS DE REAIREACIÓN

La estimación de las tasa de reaireación en cada uno de los tramos de los ríos en estudio, se realizó mediante la determinación del valor experimental para cada una de las ecuaciones seleccionadas previamente, se utilizó como herramienta una hoja de cálculo en la cual se introducían los valores de los parámetros resultantes del análisis de trazadores, como lo son la velocidad media, profundidad, ancho, caudal, pendiente, longitud del tramo, coeficiente de dispersión longitudinal y tiempo entre centroides de los trazadores. Paralelamente en otra hoja de cálculo se ubicaron las ecuaciones predictivas de K_a , las cuales eran llamadas obedeciendo condicionales anteriormente programadas y con esto obtener el valor de la tasa de reaireación. Los condicionales se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Condicionales programados para calcular K_a .

Condicional	Usar
$0.708 < Q < 85$	$k_a = 0.1772 * \left(\frac{H}{t}\right)$
$0.028 < Q < 0.28$	$k_a = 0.3609 * \left(\frac{H}{t}\right)$

Todas las ecuaciones que permiten calcular la tasa de reaireación están adaptadas para condiciones de temperatura de 20 °C, por ello fue necesario realizar la corrección por temperatura utilizando la Ecuación 20 y con esto obtener el valor a condiciones de temperatura real.

$$K_{a_c}(d^{-1}) = K_{a_{20^\circ}} * 1.024^{(Tr-20^\circ C)} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

K_{a_c} : Valor de tasa de reaireación corregido

$K_{a_{20^\circ}}$: Valor de tasa de reaireación

empírico

T_r : Temperatura tomada en campo

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se realizó mediante la comparación del valor de la tasa de reaeración con los valores de los parámetros utilizados para la determinación de estas tasas, inicialmente se graficaron valores de k_a vs velocidad, k_a vs profundidad, k_a vs caudal y k_a vs distancia. Teniendo en cuenta la tendencia de los valores en cada una de la gráficas, se procedió a evaluar los datos dudosos por medio de un diagrama de caja el cual es un gráfico que está basado en cuartiles y mediante el cual se visualiza la distribución de un conjunto de datos, este grafico utiliza como medida de tendencia central la mediana, siendo el valor de la variable que deja el mismo número de datos antes y después que él. De acuerdo con esta definición el conjunto de datos menores o iguales que la mediana representarán el 50% de los datos, y los que sean mayores que la mediana representarán el otro 50% del total de datos de la muestra. [29]

Finalmente se identifican los datos atípicos en todas las gráficas y se eliminan para así obtener una tendencia más marcada y determinar la sensibilidad para cada uno de los parámetros en los diferentes tramos.

5. DESARROLLO CENTRAL

5.1. SELECCIÓN DE TRAMOS

5.1.1. CAMPAÑA DE RECONOCIMIENTO

En la campaña de reconocimiento se realizó un recorrido por los cuerpos de agua mientras se tomaban puntos de coordenadas con un GPS Garmin, adicionalmente se describían los sitios de interés de la zona y posibles puntos de muestreo, teniendo en cuenta que sea de fácil acceso y presente condiciones mínimas de seguridad para el equipo que realizó el muestreo.

Con ayuda de los sistemas de información geográfica se logró corroborar la campaña de reconocimiento y se realizaron los mapas de cada uno de los ríos y la quebrada, en la gráfica 4, 5, 6 y 7 se muestran dichos mapas.

La Tabla 4 muestra los datos levantados en campo para el río Torca y la Gráfica 4 muestra la ubicación de los puntos tomados durante la campaña de reconocimiento.

Tabla 4 datos de campaña de reconocimiento del río torca

	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	SITIO DE INTERÉS
1	4° 43' 39.37"	74° 01' 29.49"	2611	Carrera 7 con calle 153
2	4° 43' 44.5"	74° 01' 35.35"	2607	Carrera 7c con calle 154
3	4° 44' 01.54"	74° 02' 12.64"	2602	Carrera 15
4	4° 46' 11.43"	74° 02' 16.62"	2594	Club San Carlos - Makro
5	4° 46' 44.47"	74° 02' 27.35"	2588	Autopista norte

Gráfica 4 Ubicación geográfica de los puntos sobre el mapa del río Torca



La Tabla 5 muestra los datos levantados en campo para el río Molinos y la Gráfica 5 muestra la ubicación de los puntos sobre el río Molinos además del shape del río acoplado sobre una imagen satelital.

Tabla 5 datos de campaña de reconocimiento del río Molinos

	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	SITIO DE INTERÉS
1	4° 41' 11.71"	74° 02' 01.16"	2605	Carrera 7ma con calle 106
2	4° 41' 21.30"	74° 02' 10.54"	2603	Carrera 9na inicio subterráneo
3	4° 41' 37.08"	74° 02' 23.20"	2567	Carrera 13 fin subterráneo
4	4° 41' 52.62"	74° 03' 43.54"	2493	Calle 108 con carrera 53
5	4° 42' 02.36"	74° 03' 49.92"	2490	Calle 116 Con carrera 54 cerca al vertimiento al humedal Córdoba

Gráfica 5 Ubicación geográfica de los puntos sobre el mapa del río Molinos



La Tabla 6 muestra los datos levantados en campo para el río Arzobispo y la Gráfica 6 muestra la ubicación de los puntos sobre el mapa del río Arzobispo además del shape del río acoplado sobre una imagen satelital.

Tabla 6 datos de campaña de reconocimiento del río Arzobispo

	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	SITIO DE INTERÉS
1	4° 37' 24.55"	74° 03' 23.16"	2669	Carrera Circunvalar
2	4° 37' 28.86"	74° 03' 46.46"	2635	Inicio Canalización en Concreto
3	4° 37' 30.23"	74° 03' 49.52"	2625	Canalización ladrillo
4	4° 37' 41.27"	74° 04' 04.52"	2618	Subterráneo
5	4° 37' 49.92"	74° 04' 18.29"	2613	Carrera 19 con calle 43
6	4° 38' 03.78"	74° 04' 31.95"	2607	Carrera 24 con calle 45
7	4° 38' 21.76"	74° 04' 43.36"	2601	Vertimiento Carrera 30

Gráfica 6 Ubicación geográfica de los puntos sobre el mapa del río Arzobispo

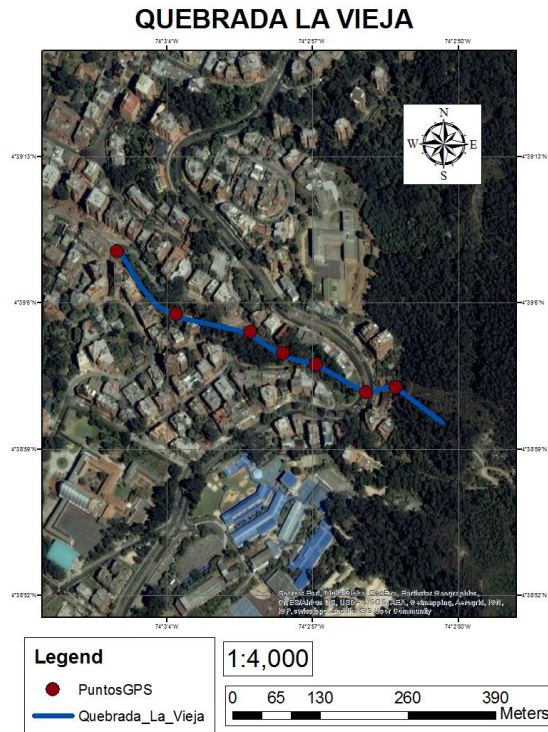


La Tabla 7 muestra los datos levantados en campo para la quebrada La Vieja y la Gráfica 7 muestra la ubicación de los puntos sobre el mapa de la quebrada La Vieja además del shape de la quebrada acoplado sobre una imagen satelital.

Tabla 7 datos de campaña de reconocimiento del río Arzobispo

	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	SITIO DE INTERÉS
1	4° 38' 58.69"	74° 02' 53.16"	2707	Arriba de Carrera Circunvalar
2	4° 39' 03.19"	74° 02' 56.96"	2710	Debajo de la Carrera Circunvalar
3	4° 39' 03.25"	74° 02' 58.97"	2695	Carrera 1ra Este
4	4° 39' 05.06"	74° 03' 01.95"	2683	Fin quebrada

Gráfica 7 Ubicación geográfica de los puntos sobre el mapa de la quebrada La Vieja



5.1.2. CURVA HIPSOMÉTRICA

La curva hipsométrica es una herramienta que permite realizar análisis de frecuencia de alturas o cotas de nivel como de pendientes propias de una sección a lo largo de un tramo de un río, esta curva se obtiene ubicando los valores medios de las cotas de nivel y el porcentaje de área implícita entre curvas de nivel, se establecen valores porcentuales acumulados del área de los cual se obtiene una gráfica que relaciona el porcentaje de área en relación con las cotas de nivel, en la Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 se muestran los datos usados para el cálculo de la curva hipsométrica y en la Gráfica 8, Gráfica 9, Gráfica 10 y Gráfica 11 se muestran las curvas hipsométricas para cada uno de los ríos y la quebrada.

Como primer criterio de selección de tramos, la curva hipsométrica permitió establecer los tramos para los muestreos, de modo que las zonas que más pendiente presentará a lo largo de esta curva, conformarían los tramos de estudio, en cada una de las gráficas de las curvas hipsométricas se muestran los tramos resultantes en color rojo.

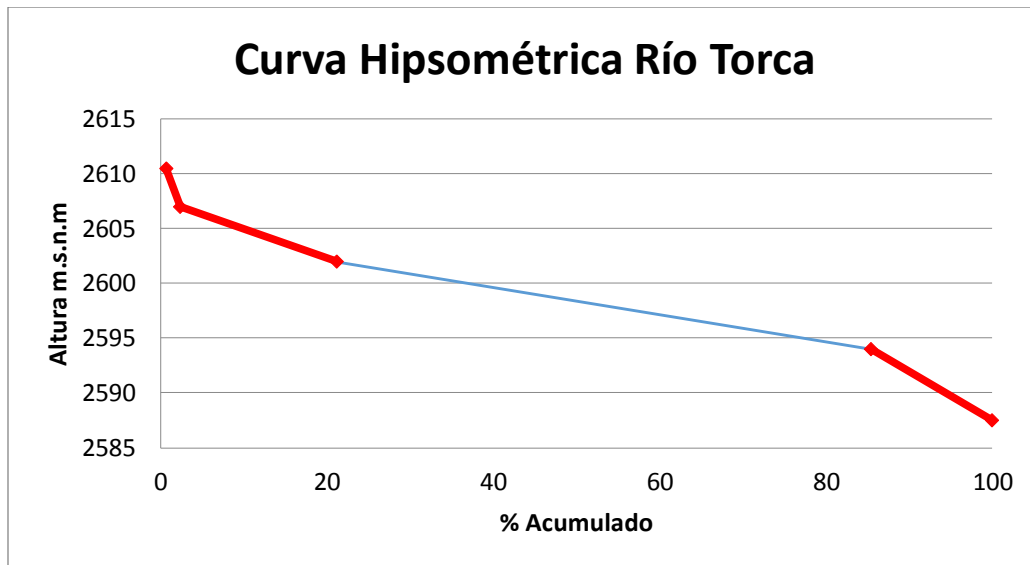
En las gráficas de la curva hipsométrica se establecen zonas de mayor pendiente en color rojo, en color azul las zonas en las cuales la pendiente resultaba ser muy suave y no representaba valores de turbulencia alto.

- RÍO TORCA

Tabla 8 Datos para el cálculo de la curva hipsométrica del río Torca

N	COTA MÍNIMA	COTA MÁXIMA	COTA MEDIA	ÁREA ENTRE CURVAS	ACUMULADO ÁREA	% ACUMULADO	ÁREA ACUMULADA %
1	2585	2590	2588	0.0617	0.424	100	14.553
2	2590	2598	2594	0.2724	0.362	85	64.231
3	2598	2606	2602	0.0798	0.089	21	18.832
4	2606	2608	2607	0.0070	0.010	2	1.653
5	2613	2608	2611	0.0030	0.003	1	0.728
				0.4241			

Gráfica 8 Curva hipsométrica del río Torca



Para el río Torca se establecieron tres (3) tramos correspondientes a las pendientes más altas a lo largo de su longitud, además se aseguró que los sitios resultan de fácil acceso y con condiciones de seguridad óptimas para el muestreo.

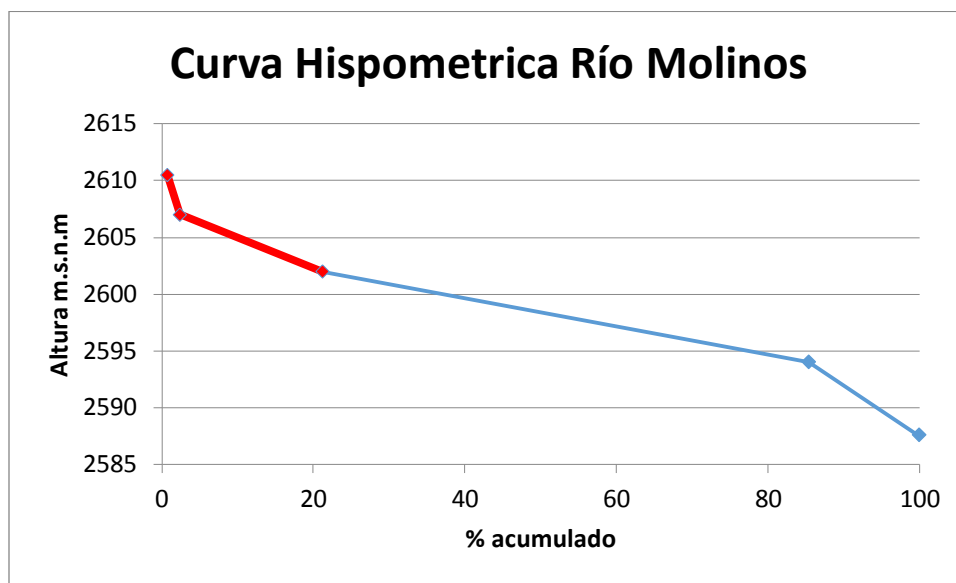
- RÍO MOLINOS

Tabla 9 Datos para el cálculo de la curva hipsométrica del río Molinos

N	COTA MÍNIMA	COTA MÁXIMA	COTA MEDIA	ÁREA ENTRE CURVAS	ACUMULADO ÁREA	% ACUMULADO	ÁREA ACUMULADA %
1	2585	2590	2588	0.061728	0.424153	100	14.553239
2	2590	2598	2594	0.27244	0.362425	85	64.2315391
3	2598	2606	2602	0.07988	0.089985	21	18.8328268
4	2606	2608	2607	0.007013	0.010105	2	1.6534128
5	2613	2608	2611	0.003092	0.003092	1	0.72898223
				0.424153			

Subterráneo

Gráfica 9 Curva hipsométrica del río Molinos



Para el río Molinos se establecieron dos (2) tramos iniciando desde el Cantón de Caballería del Ejército Nacional de Colombia, pues por cuestiones de acceso y seguridad no era posible realizar muestreos dentro de su jurisdicción. Los tramos

de estudio finalizan en la autopista norte debido que a partir de esta zona el río Molinos recibe efluentes de las quebradas de Santa Bárbara y Pedregal, siendo estas dos últimas las que representan picos de caudales más altos. [30]

Dentro de los tramos seleccionados se encuentra una zona de un subterráneo que pasa debajo de la avenida novena, debido al desconocimiento de esta zona se procedió a no incluirlo dentro de los tramos, es decir que se ubicó un tramo arriba del subterráneo y el siguiente aguas abajo del subterráneo hasta llegar a la autopista norte.

- RÍO ARZOBISPO

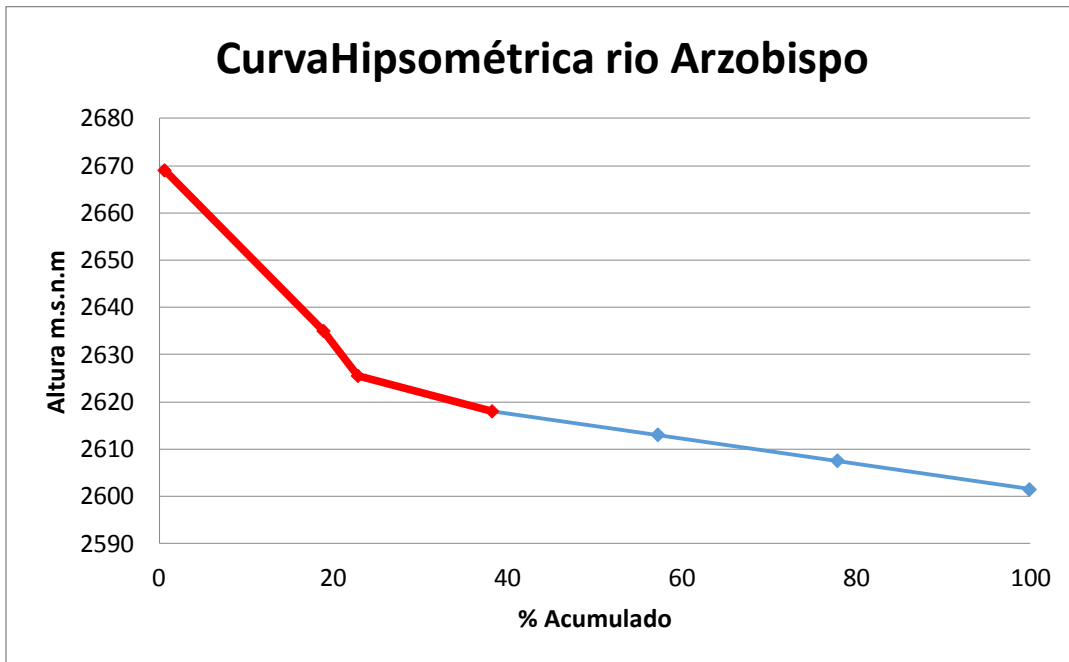
Tabla 10 Datos para el cálculo de la curva hipsométrica del río Arzobispo

N	COTA MÍNIMA	COTA MÁXIMA	COTA MEDIA	ÁREA ENTRE CURVAS	ACUMULADO O ÁREA	% ACUMULADO	ÁREA ACUMULADA %
1	2600	2603	2601.5	0.0421	0.1911	100	22.026
7	2603	2612	2607.5	0.0393	0.1490	78	20.588
6	2612	2614	2613	0.0366	0.1096	57	19.173
5	2614	2622	2618	0.0294	0.0730	38	15.39
4	2622	2629	2625.5	0.0075	0.0436	23	3.950
3	2629	2641	2635	0.0348	0.0360	19	18.249
2	2641	2697	2669	0.0011	0.0011	1	0.617
				0.1911			100

Subterráneo

material de canalización	Distancia (m)	%
sin canalizar	591.00	18.7857597
concreto	117.00	3.71900826
ladrillo	2438.00	77.495232

Gráfica 10 Curva hipsométrica del río Arzobispo



Para el río Arzobispo se establecieron dos (2) tramos en los cuales se seleccionaron los de pendiente más pronunciada, además se pretendió establecer una relación entre los diferentes materiales de las canalizaciones a lo largo del río Arzobispo, debido a que en la campaña de reconocimiento se evidenció la diversidad de estos materiales.

Por ellos se seleccionó un tramo con canalización en ladrillo y se buscó que el otro tramo fuera sin canalizar o en concreto, pero el tramo que posee canalización en concreto resultó ser muy corto, por ello se estableció que el otro tramo estuviera en la zona sin canalizar es decir arriba del Parque Nacional.

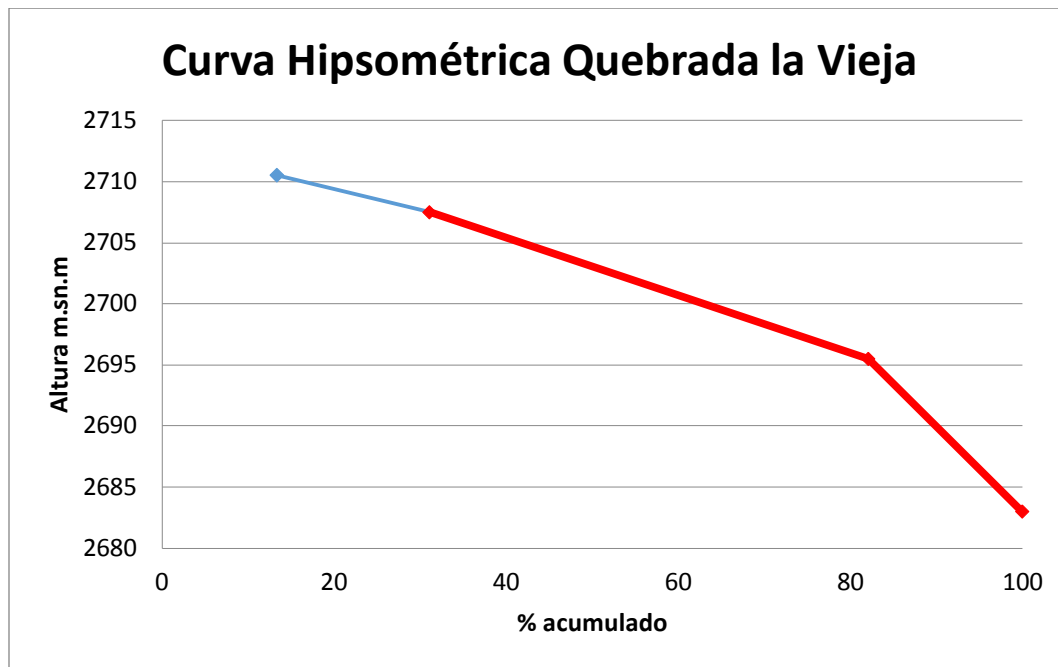
- QUEBRADA LA VIEJA

Tabla 11 Datos para el cálculo de la curva hipsométrica de la quebrada La Vieja

n	cota mínima	cota máxima	cota media	área entre curvas	Acumulado área	% acumulado	área acumulada %
4	2681	2685	2683	0.006	0.037	100	17.893
1	2685	2706	2695.5	0.019	0.030	82	51.013

3	2706	2709	2707.5	0.006	0.011	31	17.650
2	2709	2712	2710.5	0.005	0.005	13	13.442
				0.037			100

Gráfica 11 Curva hipsométrica de la quebrada La Vieja



Para la quebrada la vieja se establecieron dos (2) tramos en los cuales se seleccionaron los de pendiente más pronunciada, además de las condiciones de seguridad que para esta zona fueron más importantes, pues en la zona de arriba de la circunvalar no se podía realizar ningún muestreo.

5.1.3. LONGITUD DE MEZCLA

La longitud de mezcla para los ríos resultó ser un parámetro relevante pues se garantizó que los puntos de muestreo no sean menores a la longitud de mezcla para certificar un muestreo representativo. Previamente se establecieron distancias determinadas para cada uno de los ríos y la quebrada, es decir que para la quebrada La vieja se tomaron intervalos de distancia de 100 metros, para el río Arzobispo distancias de 400 metros y para los ríos Molinos y Torca una distancia de 500 metros. Debido a la morfología de los ríos y la quebrada resultaron un alto gradiente de longitudes de mezcla, es decir, longitudes de mezcla muy altas y otras por el contrario muy bajas, esto se debe a que la

longitud de mezcla está en función del ancho, profundidad y en un menor grado de la pendiente del terreno de los cuerpos de agua.

Tabla 12 Longitud de mezcla para los tramos del río Arzobispo

TRAMO	PROFUNDIDAD (M)	PENDIENTE	ANCHO (M)	ÁREA	VELOCIDAD (M/S)	E_{lat}	L_m (M)
1	0.150	0.129	1.150	0.173	0.400	0.039	1.34
2	0.240	0.028	0.400	0.096	0.700	0.037	0.30

Tabla 13 Longitud de mezcla para los tramos de la quebrada La Vieja

TRAMO	PROFUNDIDAD (M)	PENDIENTE	ANCHO (M)	ÁREA	VELOCIDAD (M/S)	E_{lat}	L_m (M)
1	0.140	0.176	1.250	0.175	0.200	0.041	0.756
2	0.200	0.145	1.200	0.240	0.222	0.064	0.500

Tabla 14 Longitud de mezcla para los tramos del río Torca

TRAMO	PROFUNDIDAD (M)	PENDIENTE	ANCHO (M)	ÁREA	VELOCIDAD (M/S)	E_{lat}	L_m (M)
1	0.070	0.021	1.620	0.113	0.620	0.005	32.083
2	0.170	0.004	6.800	1.156	0.120	0.008	67.584
3	0.220	0.003	10.400	2.288	0.210	0.010	218.424

Tabla 15 Longitud de mezcla para los tramos del río Molinos

TRAMO	PROFUNDIDAD (M)	PENDIENTE	ANCHO (M)	ÁREA	VELOCIDAD (M/S)	E_{lat}	L_m (M)
1	0.170	0.014	2.200	0.374	0.850	0.016	26.456
2	0.160	0.006	7.380	1.181	0.320	0.009	193.876

5.2. CAMPAÑAS DE MUESTREO

5.2.1. CALIBRACIÓN EQUIPOS DE LABORATORIO

Previo al muestreo se realizó una campaña de calibración de los equipos, en esta campaña se verificó los rangos de medición de cada uno de los equipos con el fin de establecer un control sobre el trazador, es decir, que al momento de inyectar el trazador este no supere los rangos de los límites de detección de los equipos.

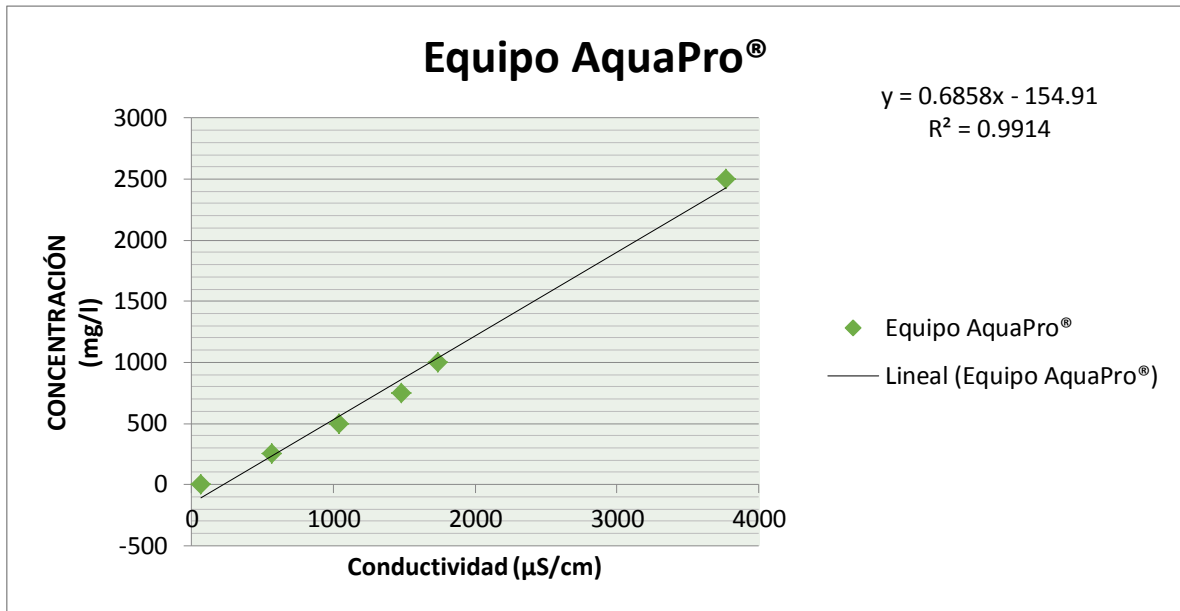
El proceso de calibración del equipo es básicamente simular las condiciones de concentración que se pueden presentar al momento del muestreo, se realizó una toma de datos y se realizó una curva de calibración, esta servirá como materia prima para hacer la conversión de unidades de conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a concentración (mg/l), la Tabla 16 muestra los datos de laboratorio y la Gráfica 12 los resultados, además la Gráfica 13 muestra el procedimiento seguido en el laboratorio y la Ecuación 21 resultante de la calibración.

Tabla 16 Datos de calibración del equipo

MUESTRA	SAL (g)	AGUA (ml)	CONCENTRACION (mg/l)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
				<i>Equipo AquaPro®</i>
1	0	200	0	63
2	0.05	200	250	563
3	0.1	200	500	1037
4	0.15	200	750	1477
5	0.2	200	1000	1738
6	0.5	200	2500	3769

Fuente: Autores

Gráfica 12 Curva de calibración del equipo



Fuente: Autores

$$y = 0.6858x - 154.91$$

sustituyendo:

Ecuación 21

$$\text{concentración} = 0.6858 * \text{Conductividad} - 154.91$$

Gráfica 13 Calibración del equipo en el laboratorio



5.2.2. MUESTREO DE TRAZADORES

Para este muestreo se siguió el procedimiento mencionado en la metodología y se obtuvieron datos de conductividad con intervalos de 10 segundos en cada punto e

muestreo, finalmente se realizaron mediciones iniciales de caudal. Estos datos se muestran en el ANEXO 1.

En la Gráfica 14, Gráfica 15, Gráfica 16 e Gráfica 17 se muestra el registro fotográfico de los procedimientos en campo para todos los muestreos.

Gráfica 14 Vertimiento en el río Arzobispo



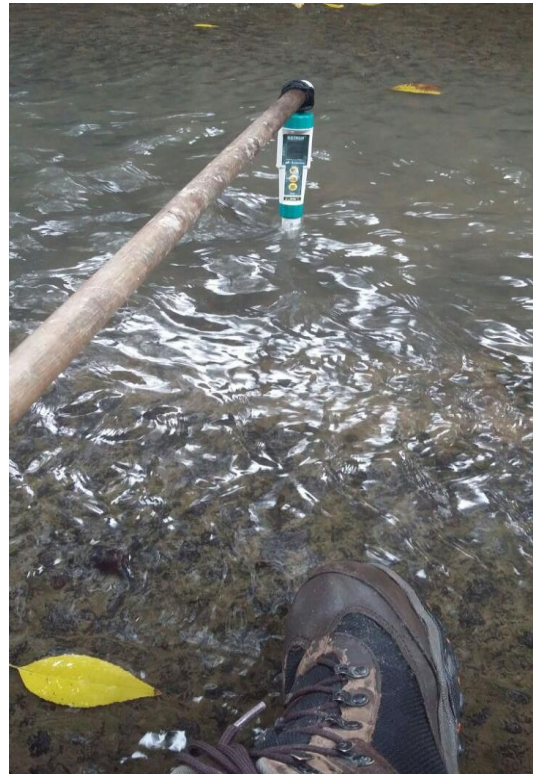
Gráfica 15 registro de conductividad río Arzobispo



Gráfica 16 registro conductividad río Torca



Gráfica 17 registro conductividad río Molinos



Los valores medidos en campos para el caudal difieren significativamente de los arrojados por el análisis de trazadores, por ello se realizaron una serie de

verificaciones para determinar la confiabilidad de los datos obtenidos en el muestreo de trazadores, se realizó una comparación por bibliografía de los datos de caudales históricos resultando una semejanza mayor a los valores de caudal obtenidos por análisis de trazadores y los valores de caudales obtenidos en campo se encuentran fuera de los rangos determinados por la bibliografía.

Tabla 17 Comparación de Caudales de los diferentes cuerpos de agua superficiales

FUENTE	RÍO ARZOBISPO (m ³ /s)	RÍO MOLINOS (m ³ /s)	QUEBRADA LA VIEJA (m ³ /s)	RÍO TORCA (m ³ /s)
Medido en campo	0.004	0.007	0.002	0.014
Bibliografía(*)	0.0286	0.0527	0.0190	0.209
Trazadores	0.0189	0.0877	0.0142	0.183

(*) Fuente: [31]

5.3. ANÁLISIS DE TRAZADORES

En una hoja de cálculo se digitaron los datos de conductividad y se realizó la correspondiente conversión a concentración teniendo en cuenta la ecuación de la curva de calibración del equipo, como se mencionó en el numeral 6.2.1.

Los parámetros de calibración del modelo como el tiempo de viaje, retraso advectivo y coeficiente de dispersión resultaron ser aceptables en función del estado de ganancia estable (SSG) pues todas las calibraciones experimentaron estar en un rango de 0,95 a 1,05. [2]

Posteriormente se realizó la calibración de cada tramo por medio de los software mencionados en el numeral 5.3, lo que permitió determinar velocidad media, caudal, coeficiente de dispersión longitudinal, obteniendo los mejores valores posibles para la función objetivo que en este caso es el coeficiente de determinación R^2 . Los archivos arrojados por el software en el cual se encuentran la compilación de todos los valores obtenidos de R^2 se encuentran en el ANEXO 2. Los mejores resultados arrojados se muestran en la Tabla 18.

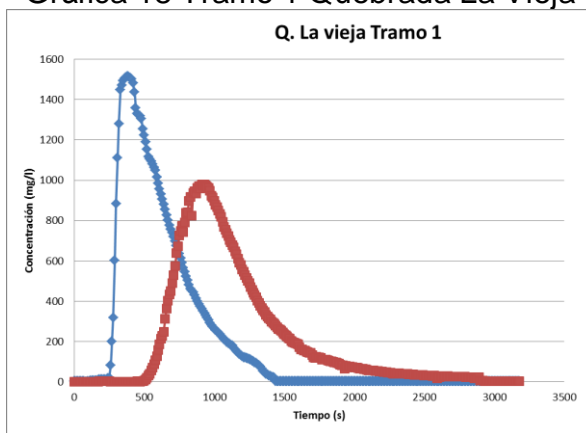
Tabla 18 mejores valores de calibración por tramo

	TIEMPO DE VIAJE (s)	RETRASO ADVECTIVO (s)	COEFICIENTE DE DISPERSIÓN (Adimensional)
Q. vieja Tramo 1	539	902	0.40
Q. vieja Tramo 2	181	547	0.66
R. Arzobispo Tramo 1	279	602	0.53
R. Arzobispo Tramo 2	177	895	0.80

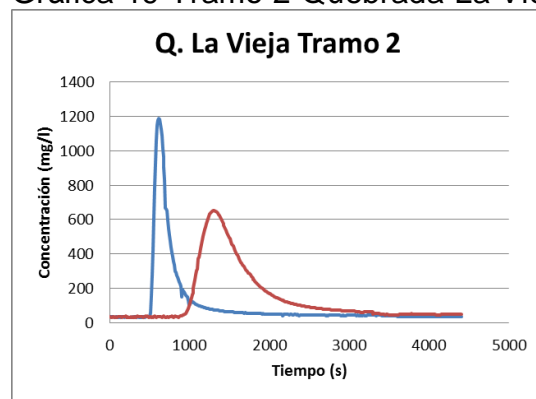
R. Molinos Tramo 1	9.89	603	0.98
R. Molinos Tramo 2	718	760	0.054
R. Torca Tramo 1	253	577	0.56
R. Torca Tramo 2	203	998	0.79
R. Torca Tramo 3	8.46	2673	0.99

Las gráficas 6 y 7 presentan el comportamiento de los trazadores en los tramos de estudio de la quebrada la vieja.

Gráfica 18 Tramo 1 Quebrada La Vieja



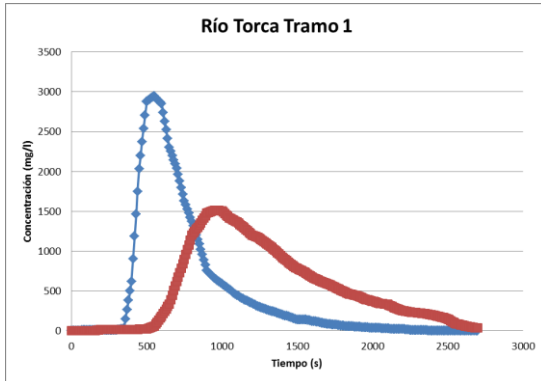
Gráfica 19 Tramo 2 Quebrada La Vieja



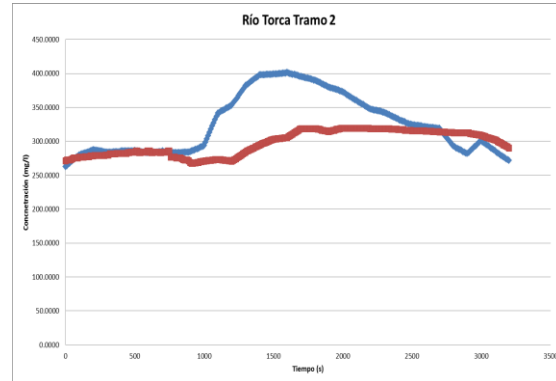
Se observa que en el tramo 1 predomina el transporte advectivo, ya que las curvas tienen a ser más empinadas, mientras que en el tramo 2 se aprecia el efecto de la dispersión longitudinal, el cual se evidencia por la forma más achatada de la concentración en el punto de muestreo 2, las colas en las curvas, representan el efecto de las zonas muertas posibles en el cuerpo de agua.

Las gráficas 8, 9 y 10 presentan el comportamiento de los trazadores en los tramos de estudio del río Torca.

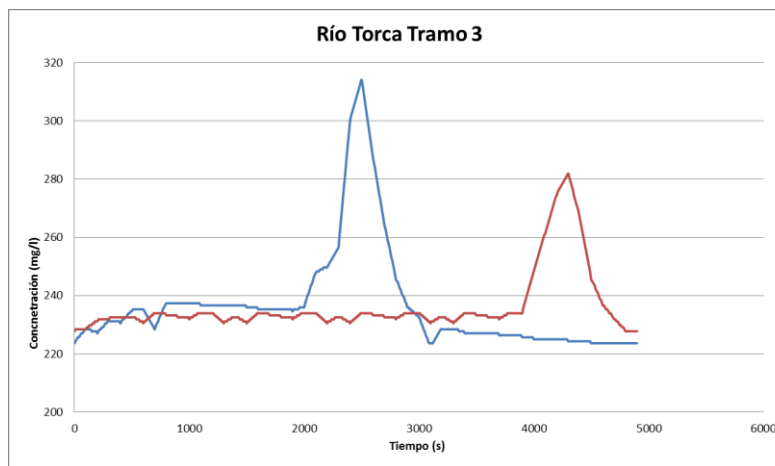
Grafica 1 Tramo 1 río Torca



Grafica 2 Tramo 2 río Torca

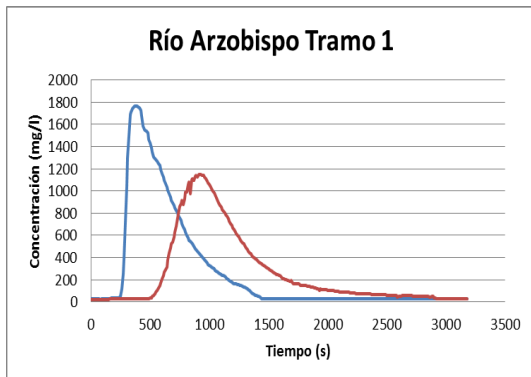


Grafica 3 Tramo 3 río Torca

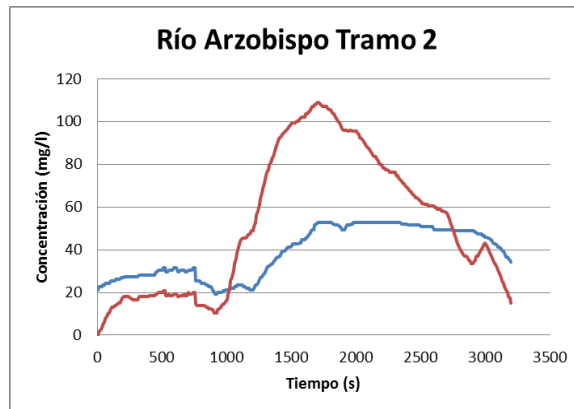


Las gráficas correspondientes al río torca presentan comportamiento menos homogéneos, sin embargo se puede apreciar la predominancia del transporte por dispersión longitudinal en los tramos 1 y 2 y por advección el tramo 3. En este caso no se presentan colas, por lo que se infiere que no hay presencia de zonas muertas.

Grafica 4 Tramo 1 río Arzobispo

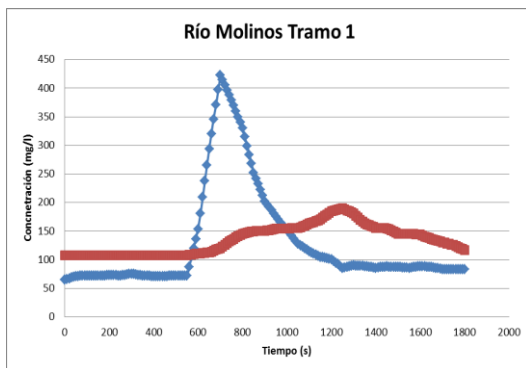


Grafica 5 Tramo 2 río Arzobispo

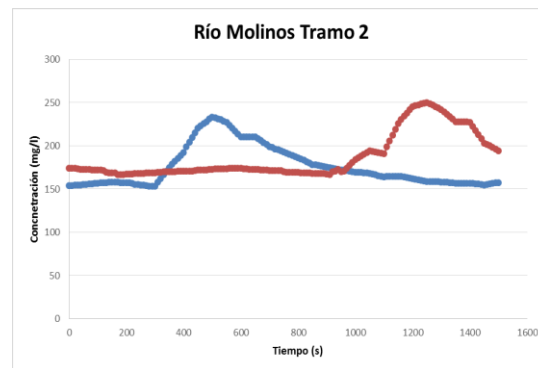


En el río arzobispo se presenta en el primer tramo dominancia de transporte advectivo y presencia de colas marcadas, indicando zonas muertas en este segmento, mientras que en el tramo 2 predomina el transporte dispersivo y no se evidencian zonas muertas

Grafica 6 Tramo 1 río Molinos



Grafica 7 Tramo 2 río Molinos



Para el río molinos se presenta similitud en los segmentos, predominando el transporte advectivo y sin presencia notoria de zonas muertas.

5.4. SELECCIÓN DE ECUACIONES DE TASAS DE REAIREACIÓN

Teniendo en cuenta las características evaluadas en cada uno de los tramos de los ríos, las cuales se muestran en la Tabla 20, Tabla 21, Tabla 22 y Tabla 23, se realizó una matriz de criterios o rangos de aplicabilidad previamente establecida para cada ecuación, en la Tabla 19 se muestra un ejemplo de los rangos de aplicabilidad para las ecuaciones empíricas. De este modo se indican las características propias de los ríos y la quebrada y posteriormente se compararon con los rangos de aplicabilidad de cada una de las ecuaciones empíricas encontradas en la bibliografía, que se encuentra en el ANEXO 3 para cada una de las ecuaciones.

Tabla 19 ejemplo rangos de aplicabilidad

Condicional	Usar
$0.708 < Q < 85$	$k_a = 0.1772 * \left(\frac{H}{t}\right)$
$0.028 < Q < 0.28$	$k_a = 0.3609 * \left(\frac{H}{t}\right)$

Tabla 20. Características propias de la quebrada La Vieja

CARACTERÍSTICAS		TRAMO 1		TAMO 2	
		PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
Velocidad media	m/s	0,06	0,056	0,06875	0,04739
Profundidad	m	0,2	0,27	0,16	0,25
Ancho	m	1,2	1	1,5	0,9
Caudal	m ³ /s	0,014402	0,01529	0,0165	0,010664
Pendiente	m/m	0,01	0,01	0,01	0,012
Longitud del tramo	m	100	100	100	100
Coef. Dispersion Longitudinal	m ² /s	0,66	0,66	0,401	0,401
Tiempo entre centroides Trazadores	días	0,00300926	0,00300926	0,01064	0,01064

Tabla 21. Características propias del Río Arzobispo

CARACTERÍSTICAS		TRAMO 1		TAMO 2	
		PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
Velocidad media	m/s	0,03874	0,044298	0,1423	0,4476
Profundidad	m	0,17	0,25	0,07	0,2
Ancho	m	1,9	1,5	1,2	0,4
Caudal	m ³ /s	0,012516	0,0132894	0,01195	0,03581
Pendiente	m/m	0,011	0,016	0,012	0,014
Longitud del tramo	m	400	400	400	400
Coef. Dispersion Longitudinal	m ² /s	0,5357	0,5357	0,801	0,801
Tiempo entre centroides Trazadores	días	0,00373843	0,00373843	0,00445	0,00445

Tabla 22 Características propias del Río Molinos

CARACTERÍSTICAS		TRAMO 1		TAMO 2	
		PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4
Velocidad media	m/s	0,06124	0,13894	0,20581	0,23984
Profundidad	m	0,1	0,17	0,09	0,07
Ancho	m	5,65	3,4	6,3	7,1

Caudal	m ³ /s	0,03460254	0,08031125	0,116698	0,119203
Pendiente	m/m	0,02	0,016	0,009	0,01
Longitud del tramo	m	500	500	500	500
Coef. Dispersion Longitudinal	m ² /s	0,9835	0,9835	0,05436	0,05436
Tiempo entre centroides Trazadores	días	0,00405093	0,00405093	0,0072338	0,0072338

Tabla 23 Características propias del Río Torca

CARACTERÍSTICAS		TRAMO 1		TRAMO 2		TRAMO 3	
		PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6
Velocidad media	m/s	1,364526	1,03046	0,0966	0,2191	0,08053	0,12979
Profundidad	m	0,07	0,09	0,15	0,19	0,22	0,4
Ancho	m	1,62	1,52	6,8	5,65	10,4	5,5
Caudal	m ³ /s	0,1547372	0,1409682	0,0985478	0,23525	0,184265	0,2855387
Pendiente	m/m	0,2	0,17	0,008	0,009	0,008	0,009
Longitud del tramo	m	500	500	500	500	500	500
Coef. Dispersion Longitudinal	m ² /s	0,560968	0,560968	0,795986	0,795986	0,996833	0,996833
Tiempo entre centroides Trazadores	días	0,00641204	0,00641204	0,00579861	0,00579861	0,0134375	0,0134375

Como resultado de la evaluación de criterios de aplicabilidad las ecuaciones seleccionadas fueron las siguientes:

- Bansal
- Bennet y Rathbun
- Churchil et al.
- Grant
- Isaac y Gaudy
- Langbein y Durum
- Long
- Negulescu y Rojanski
- O'Connor-Dobbins
- Owens et al.
- Owens-Gibbs
- Padden y Gloyna
- Parkhurs y Pomeroy
- Thackston-Dawson
- Tsvoglou y Wallace
- Tsvoglou-Neal

5.5. CALCULO DE TASAS DE REAIREACIÓN

La estimación de las tasa de reaireación se realizó con ayuda de una hoja de cálculo, en la hoja de entrada se introdujeron los valores de los parámetros resultantes del análisis de trazadores y los medidos en campos, paralelamente en la hoja de tasas de reaireación se realizó una introducción de cada una de las ecuaciones seleccionadas, también se programaron los parámetros necesarios para determinar cada una de las ecuaciones por medio de condicionales, los cuales según el caso llaman los datos ingresados en la hoja de entrada.

Para cada una de las tasas de reaireación determinadas se realizó una nueva hoja llamada “corrección” en donde se procedió a programar la ecuación necesaria para hacer la corrección por temperatura. Para la mayor claridad en el ANEXO 5 se muestra la hoja de cálculo programada.

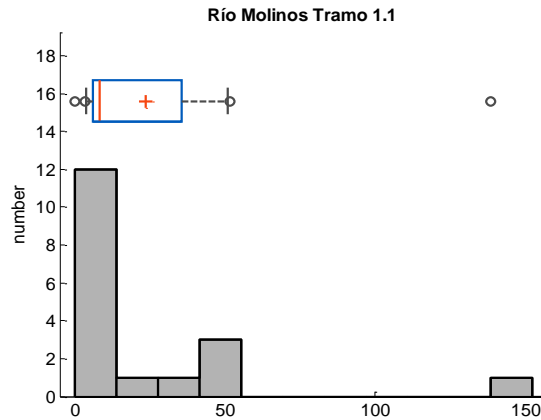
Basados en los resultados de las tasas de reaireación algunos resultados se encontraron fuera del rango a los cuales fueron diseñados, es el caso de las ecuaciones de Negulescu y Rojanski además de Parkhurs y Pomeroy. Las metodologías que permiten la derivación de estas ecuaciones predictivas, están basados en reaireación en ríos, a diferencia de la ecuación de Negulescu y Rojanski la cual fue determinada a partir de datos de desoxigenación del agua con sulfito de sodio y fue realizada en canales de laboratorio, adicionalmente la ecuación de Parkhurs y Pomeroy fue derivada a partir de observaciones del déficit de oxígeno en alcantarillados, de lo anterior se puede inferir que las estimaciones realizadas para el caso de Bogotá representan una baja correlación para estas estimaciones de las ecuaciones empíricas de los autores mencionados anteriormente [32].

5.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A partir de los valores obtenidos por medio de las hojas de cálculo para los valores de las tasas de reaireación con cada una de las ecuaciones seleccionadas, se realizó un diagrama de caja por cada tramo de estudio, lo que proporciona una visión general de la simetría de la distribución de los datos, además permite visualizar la presencia de valores atípicos y finalmente permite ver como es la dispersión de los puntos con la mediana.

La Gráfica 20 muestra un ejemplo de las gráficas obtenidas, en este caso para el tramo 1 del río Molinos. Las gráficas de todos los tramos de estudio se encuentran en el ANEXO 4.

Gráfica 20 Diagrama de caja trama 1 río Molinos



Por medio del diagrama de caja se establecieron los puntos atípicos y se determinó la mediana para cada uno de los puntos de muestreo, variable utilizada como medida de tendencia central.

La Tabla 24 presenta los datos obtenidos para la mediana en cada uno de los puntos de muestreo tomados por tramo en cada cuerpo de agua superficial, así como también el autor de la ecuación por medio de la cual se obtuvieron los datos más cercanos a la misma. De este modo se establece los valores más próximos a la mediana de todas las K_a estimadas, estableciendo como criterio el diagrama de cajas y la agrupación de los datos, es decir, que se establecen como rango los valores más próximos a la mediana la cual se encuentra dentro del cuartil 1 y cuartil 3, en la tabla 24 se establece el valor de la mediana y los datos superiores e inferiores con sus respectivos autores.

Tabla 24 Mediana obtenida y autor de la ecuación.

Punto de muestreo	Mediana	Dato Superior	Autor	Dato Inferior	Autor
Q. vieja Tramo 1 punto 1	7,607	5,928	Tsivoglou y Wallace	9,285	Thackston-Dawson
Q. vieja Tramo 1 punto 2	5,139	4,391	O'Connor-Dobbins	5,888	Thackston-Dawson
Q. vieja Tramo 2 punto 1	4,676	4,532	Tsivoglou-Neal	4,820	Isaac y Gaudy
Q. vieja Tramo 2 punto 2	4,012	3,283	Thackston-Dawson	4,742	Tsivoglou y Wallace
R. Arzobispo Tramo 1 Punto 1	6,664	6,353	Thackston-Dawson	6,974	Tsivoglou y Wallace
R. Arzobispo Tramo 1 Punto 2	6,701	5,928	Tsivoglou y Wallace	7,474	Thackston-Dawson
R. Arzobispo Tramo 2 Punto 1	25,179	22,298	Langbein y Durum	28,060	Negulescu y Rojanski
R. Arzobispo Tramo	19,236	17,360	Langbein y	21,112	Isaac y Gaudy

2 Punto 2			Durum		
R. Molinos Tramo 1 Punto 1	8,041	7,913	Tsivoglou-Neal	8,170	Isaac y Gaudy
R. Molinos Tramo 1 Punto 2	9,064	8,363	Isaac y Gaudy	9.7653	Grant
R. Molinos Tramo 2 Punto 1	27,623	23.0868	Langbein y Durum	32,159	Isaac y Gaudy
R. Molinos Tramo 2 Punto 2	46,108	37.58	Langbein y Durum	54,635	Isaac y Gaudy
R. Torca Tramo 1 Punto 1	216,988	213,817	O'Connor-Dobbins	220,159	Langbein y Durum
R. Torca Tramo 1 Punto 2	123,413	115,592	O'Connor-Dobbins	131,233	Langbein y Durum
R. Torca Tramo 2 Punto 1	7,459	7,015	Thackston-Dawson	7,904	Isaac y Gaudy
R. Torca Tramo 2 Punto 2	10,832	10,503	Isaac y Gaudy	11,161	Tsivoglou-Neal
R. Torca Tramo 3 Punto 1	4,158	3,810	Churchill et al.	4,506	Grant
R. Torca Tramo 3 Punto 2	2,964	2,964	Thackston-Dawson	2,964	Thackston-Dawson

La Tabla 25 presenta la tendencia y el número de veces que los autores de las ecuaciones se acercan más a la medida de tendencia central utilizada, con esto se establece la frecuencia de cercanía a la tendencia utilizada, es decir, se da como resultado los autores que más se aproximan teóricamente a la tasa de reaireación estimada. Se puede decir que la ecuación de Isaac y Gaudy al igual que Thackston-Dawson implican una tendencia más acertada en un 40%, teniendo un total de 39 tasas de reaireación calculada para los ríos y la quebrada.

Tabla 25 Tendencia de autores de ecuaciones más cercanos a la mediana.

Tsivoglou y Wallace	Churchill et al.	Grant	Isaac y Gaudy	Langbein y Durum
1	1	2	8	6
Negulescu y Rojanski	O'Connor-Dobbins	Thackston-Dawson	Tsivoglou y Wallace	Tsivoglou-Neal
1	3	8	3	3

Se puede evidenciar que las ecuaciones de Isaac y Gaudy y de Tsivoglou y Wallace son las ecuaciones en las cuales se obtienen valores de K_a con un valor que más se aproxima teóricamente sobre el conjunto de ecuaciones.

Como se mencionó anteriormente, por medio del diagrama de caja se identificaron los puntos atípicos. La ecuación de los autores Negulescu y Rojanski arrojaron los

valores atípicos superiores en la mayoría de los casos y la ecuación de los autores Parkhurs y Pomeroy arrojaron los valores atípicos inferiores.

Al evaluar los parámetros al interior de cada una de las ecuaciones de los cuales es función la tasa de reaireación, se evidencio que la ecuación de Negulescu y Rojanski es la única que incorpora el parámetro del coeficiente de dispersión longitudinal el cual fue calibrado por medio de los software de la universidad de los Andes, sin embargo los valores de la función objetivo no fueron satisfactorios lo que pudo provocar un valor simulado que se encuentra muy alejado del valor real. En el caso de la ecuación de Parkhurs y Pomeroy se incluyen parámetros hidráulicos como el número de Froude y la pendiente, en la Tabla 26 se muestra la sobre estimación de la K_a para el caso de la ecuación de Negulescu y Rojanski y la subestimación para la ecuación de Parkhurs y Pomeroy.

Tabla 26 estimación de la tasa de reaireación para el río Torca con las ecuaciones de Negulescu y Rojanski y Parkhurs y Pomeroy

	TRAMO 1.1	TRAMO 1.2	TRAMO 1.3	TRAMO 1.4	TRAMO 1.5	TRAMO 1.6
Negulescu y Rojanski DL	22226,00	9336,33	121,563	314,193	60,61	49,803
Parkhurs y Pomeroy	0,06129	0,042909	0,01059	0,01137	0,00674	0,00443

Finalmente se realizó el análisis de sensibilidad de los parámetros, mediante la comparación del valor de la tasa de reaireación con los valores de los parámetros utilizados para la determinación de estas tasas, se graficaron valores de k_a vs velocidad, k_a vs profundidad, k_a vs caudal y k_a vs distancia de todos los cuerpos de agua superficiales simultáneamente, omitiendo los valores atípicos identificados mediante el diagrama de caja.

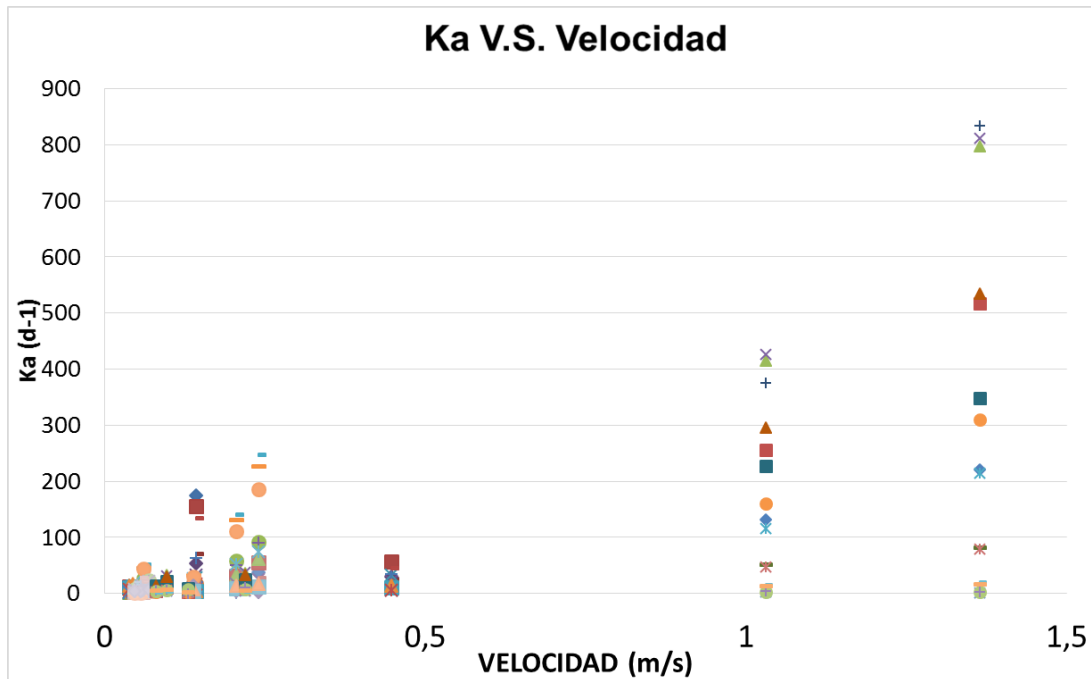
Para mayo entendimiento de las gráficas y su relación con los autores en la Gráfica 21 se muestra la leyenda correspondiente a las graficas

Gráfica 21 leyenda autores

◆ O'Connor-Dobbins	■ Bennet y Rathbun S
■ Churchill et al.	▲ Bennet y Rathbun
▲ Owens-Gibbs	× Tsvoglou y Wallace
× Owens et al.	× Bansal
× Langbein y Durum	● Grant
● Isaac y Gaudy	+ Tsvoglou-Neal
+ Negulescu y Rojanski	- Long
- Padden y Gloyna	- Thackston-Dawson

La Gráfica 22 presenta la relación de la estimación de K_a con el parámetro de velocidad

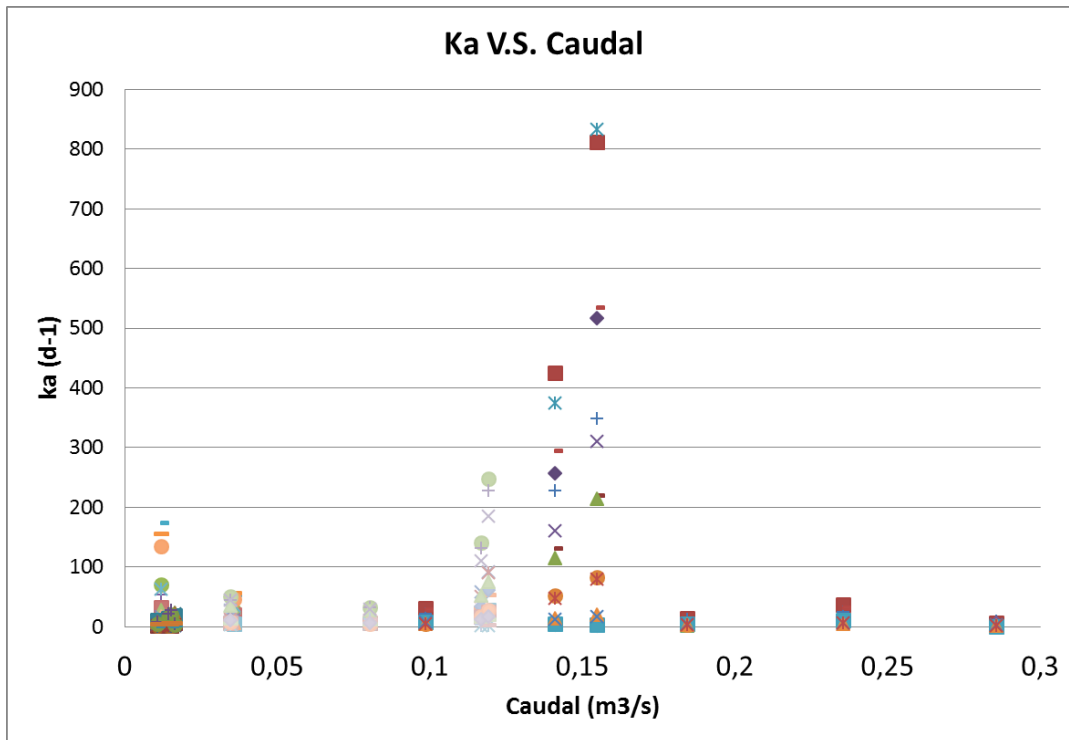
Gráfica 22 Tasa de reaireación vs. Velocidad



Se observa que a medida que aumenta la velocidad el valor de la tasa de reaireación aumenta, lo que supone una tendencia creciente, lo que indica que la velocidad es un parámetro que está relacionado directamente con la estimación de K_a , esto debido a de acuerdo con los perfiles de velocidad obtenidos, se puede inferir que en todos los tramos la distribución de la velocidad muestra unos perfiles uniforme, de igual manera se observa que el progresivo aumento de la velocidad, puede llegar a estimular procesos de transferencia de oxígeno, como lo son las turbulencias.

La Gráfica 23 presenta la relación del parámetro de caudal con K_a .

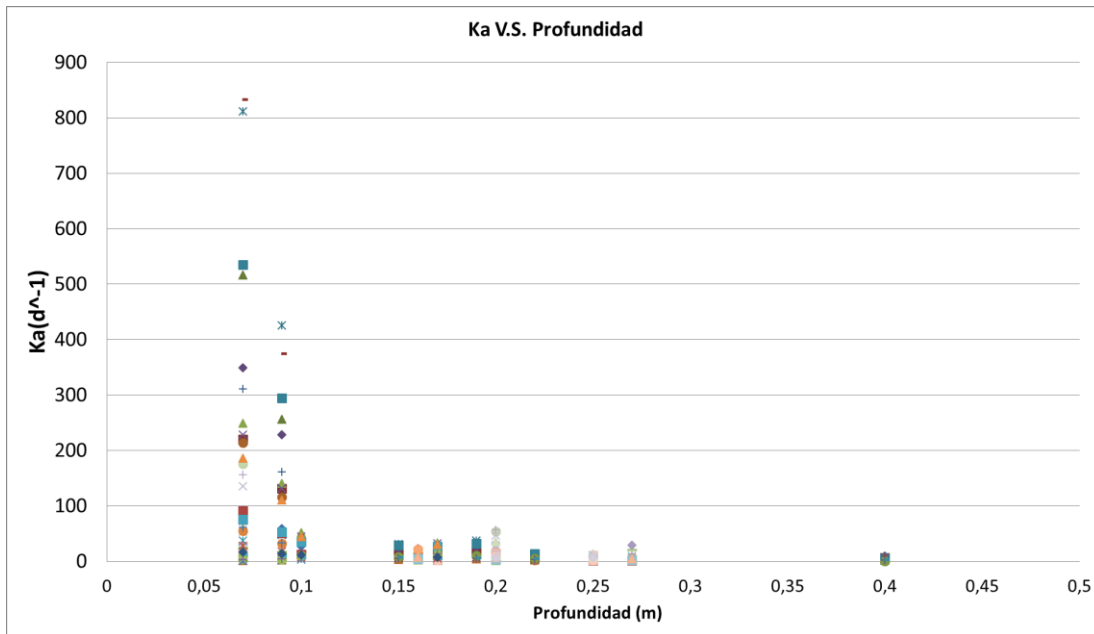
Gráfica 23 Tasa de reaireación vs. Caudal



En este caso el variable de caudal presenta un aumento de la tasa de reaireación en un rango de caudal específico, al alejarse tanto hacia la izquierda como hacia la derecha se aprecia una disminución del valor de la misma. Se infiere que el caudal también es un parámetro con una fuerte relación con la Ka , se establece que para los caudales más altos y más bajos hay mayor agrupación de datos entre los resultados.

La Gráfica 24 presenta la relación del parámetro de profundidad con la estimación de K_a .

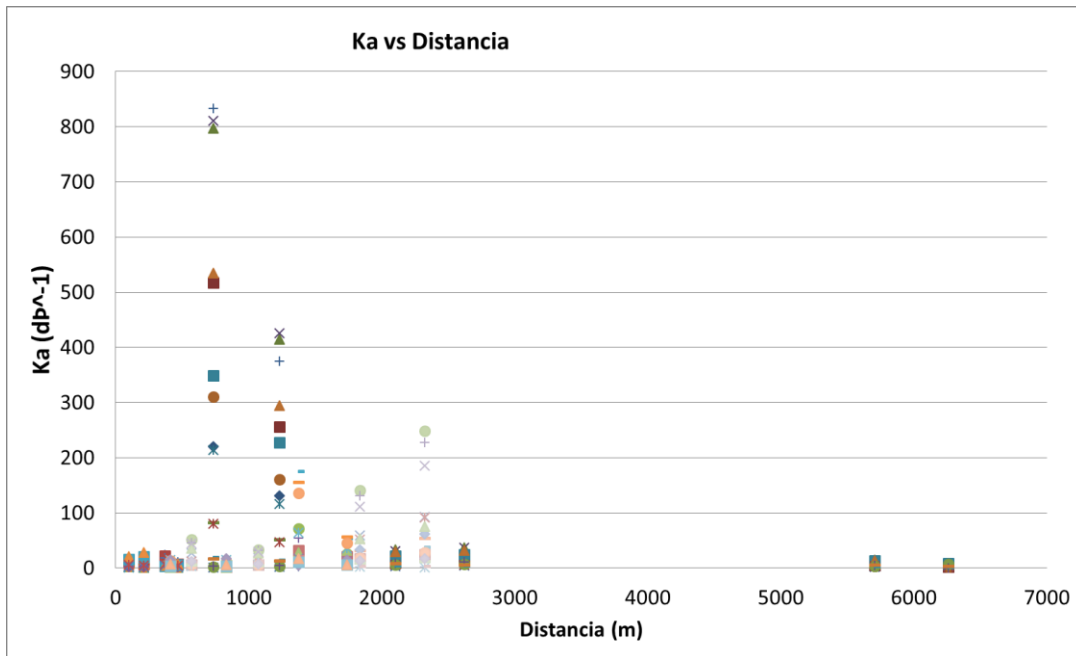
Gráfica 24 Tasa de reaireación vs. Profundidad



Al igual que en el caso del caudal, la profundidad presenta rangos en los que se aprecia un aumento significativo de k_a , este parámetro es el mayor dependencia en los procesos de reaireación, por lo tanto se puede decir que es el parámetro hidráulico más importante, ya que se establece claramente que en las zonas menos profundas la eficiencia de la transferencia de oxígeno con la atmosfera es más alto, así como en las zonas más profundas resulta ser menor la reaireación.

La Gráfica 25 presenta la relación del parámetro de distancia con la estimación de K_a .

Gráfica 25 Tasa de reaireación vs. Distancia



A diferencia de los demás parámetros, la distancia no presenta tendencia alguna por lo que se infiere que es un parámetro con poca relación, este puede ser un parámetro relevante en zonas de alta montaña y con pendiente muy pronunciadas ya que facilita la turbulencia y del mismo modo la reaireación.

6. IMPACTO SOCIAL Y HUMANÍSTICO

Los modelos de transporte de contaminantes y de calidad del agua permiten dimensionar y diseñar soluciones estructurales y no estructurales requeridas para alcanzar estándares de calidad de agua bajo diferentes requerimientos, el presente proyecto aporta a la investigación básica necesaria para la adecuada alimentación de información de estos modelos, los cuales permiten establecer la necesidad del tratamiento así como el nivel requerido del mismo, integrando parámetros como lo son la cantidad y calidad de los vertimientos, la capacidad de asimilación de la fuente receptora, y los usos destinados aguas abajo.

Las investigaciones locales como la plasmada en el presente documento, permiten disminuir la brecha de desconocimiento de los ecosistemas propios, lo que permite utilizar información con incertidumbre menor que al utilizar estudios internacionales de ecosistemas que debido a condiciones climáticas, geográficas y culturales no se asemejan a los encontrados en el país.

Todo lo anterior, teniendo en cuenta que los recursos para inversiones en saneamiento son limitados y es fundamental establecer parámetros de priorización, para realizar inversiones eficientes y de mayor impacto, que se traducirán en el mejoramiento de la calidad del agua con mejoría en la diversidad y presencia de biodiversidad, y así mismo en la mejoría de la calidad de vida de las personas, debido a la disminución de la exposición a enfermedades relacionadas con el saneamiento básico precario y la no disponibilidad de agua potable o con condiciones tales que no permitan el uso en agricultura, industria y recreación.

7. CONCLUSIONES

- A partir de la Identificación de las ecuaciones empleadas para el cálculo de tasa de reaireación se seleccionaron las ecuaciones que según las características propias de los cuerpos de agua son aplicables para los ríos: Molinos, Torca, Arzobispo y la quebrada La Vieja, en la ciudad de Bogotá de los siguientes autores: O'Connor-Dobbins, Churchil et al, Owens-Gibbs, Owens et al., Langbein y Durum, Isaac y Gaudy, Negulescu y Rojanski, Padden y Gloyna, Parkhurs y Pomeroy, Bennet y Rathbun, Tsivoglou y Wallace, Bansal, Grant, Tsivoglou-Neal, Long y Thackston-Dawson.
- Para realizar los muestreos se seleccionaron dos tramos para los ríos: Molinos, Arzobispo y la quebrada La Vieja, y tres tramos para el río Torca teniendo en cuenta el fácil acceso, la longitud de mezcla y los lugares con mayores pendientes.
- Se calcularon las tasas de reaireación correspondiente para cada uno de los cuerpos de agua superficiales de estudio, obteniendo valores entre 3.283 - 9.285 para la quebrada La Vieja, 5.928 – 28.060 para el río Arzobispo, 7.913 – 54.63 para el río Molinos y 2.964 – 220 para el río Torca.
- El análisis de sensibilidad permitió determinar que los parámetros que determinan variaciones significativas en las tasas de reaireación son: Velocidad, caudal y profundidad, y que la distancia no representa una fuerte incidencia en el cálculo de las tasas de reaireación.
- La ecuación de los autores Negulescu y Rojanski arrojaron los valores atípicos superiores en la mayoría de los casos y la ecuación de los autores Parkhurs y Pomeroy arrojaron los valores atípicos inferiores.
- Las ecuaciones de Isaac y Gaudy y de Tsivoglou y Wallace son las ecuaciones en las cuales se obtienen valores de K_a con un valor representativo al conjunto de ecuaciones.
- La determinación de tasas de reaireación de ecosistemas locales permite disminuir el uso de ecuaciones empíricas predictivas, las cuales al ser aplicadas en condiciones diferentes de las que fueron obtenidas generan valores con incertidumbres altas

8. RECOMENDACIONES:

- Se recomienda el uso de diferentes tipos de trazadores conservativos y no conservativos con el fin de aumentar la certidumbre en los datos.
- Se recomienda el uso de equipos que faciliten el registro de datos en campo con periodicidades tan altas, ya que hacerlo con equipos sin memoria interna aumenta los errores humanos y dificulta la logística del muestreo.
- Se recomienda revisar el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal y su calibración para futuras aplicaciones para determinar las tasas de reaireación en ríos con condiciones similares a los cuerpos superficiales de la ecuación de los autores Negulescu y Rojanski.
- Se recomienda utilizar las ecuaciones de Isaac y Gaudy y de Tsivoglou y Wallace para determinar las tasas de reaireación en ríos con condiciones similares a los cuerpos superficiales de estudio en el presente proyecto ya que son las ecuaciones en las cuales se obtuvieron valores de K_a con un valor más representativo al conjunto de ecuaciones.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. A. Siera Ramírez, *Calidad del agua - evaluación y diagnóstico*, Medellín: Ediciones de la U, 2011.
- [2] L. A. Camacho, *Notas de clase curso de modelación de la calidad de agua en ríos*, Bogotá, 2016.
- [3] S. C. McCutcheon y J. L. Martin, *Hydrodynamics and transport for water quality modeling*, Florida: Lewis Publishers, 1999.
- [4] W. J. Weber, *Control de la Calidad del Agua Procesos Físicoquímicos*, New York: REVERTÉ S.A., 2003.
- [5] G. De la Lanza Espino, C. Cáceres Martínez, S. Adame Martínez y S. Hernández Pulido, «Diccionario de Hidrología y ciencias afines,» Plaza y Valdez, p. 68.
- [6] L. A. Camacho, *Presentación: Movimiento y transformación de contaminantes el ambiente*, Bogotá, 2016.
- [7] T. H. M. Rientjes y R. H. Boekelman, *Hydrological models*, Delft: TU Delft, 1998.
- [8] L. Stroosnijder y L. A. Eppink, *Principles of soil and Water conservation*, Wageningen (Holanda): Wageningen Agricultural University, 1993.
- [9] B. Cox, «A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers,» *ELSEVIER*, pp. 303-334, 2003.
- [1] G. Kiely, *Advances in water Resources*, 1999.
- 0]
- [1] Universidad Nacional Abierta y a Distancia, «Lección 17. Calidad del Agua,» [En línea]. Available: http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358001/Material_didactico/leccin_17_calidad_del_agua.html. [Último acceso: 20 Julio 2016].
- [1] Universidad Nacional Abierta y a Distancia , «Lección 18. Tipos de Contaminantes del Agua,» [En línea]. Available: http://dateca.unad.edu.co/contenidos/358001/Material_didactico/leccin_18_tipos_de_contaminacin_del_agua.html. [Último acceso: 21 julio 2016].
- [1] C. Gualtieri , P. Gualteri y P. D. Guelfo, «Dimensional Analysis of reaeration rate in streams,» *journal of environmental engineering*, Napoli, 2002.
- [1] J. R. Anguiano Valencia, «Determinación del coeficiente de reaeración en un tramo corto de un río caudaloso con flujo turbulento, mediante el uso de los trazadores hexafluoruro de azufre (SF6) y Rodamina WT,» *M CIA Maestría En Ciencias en Ingeniería Ambiental*, Michoacán, 2012.
- [1] S. Silva, F. Fernandes, V. Soccol y D. Morita, «Principais do tratamento biológico de aguas residuárias,» vol. 6, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental , 2001, p. 140.
- [1] J. Suárez y N. Fernández Añón, «Modelos de Calidad de Aguas - Master en Ingeniería

- 6] del Agua,» Universidade da Coruña, Coruña, 2009.
- [1 B. Demars y J. Manson, «Temperature dependence of stream aeration coefficients and
7] the effect of water turbulence: A critical review,» *ELSEVIER*, pp. 1-15, 2012.
- [1 S. M. Kashefipour y R. A. Falconer, «Longitudinal dispersion coefficients in natural
8] channels,» *PERGAMON-Water Research*, pp. 1596-1608, 2001.
- [1 C. Peña, *Notas de clase modelación y simulación ambiental*, Bogotá, 2015.
9]
- [2 s. Chapra y R. J. Wilcock, «Transient storage and gas transfer in Lowland stream,»
0] *Journal environmental engineer*, Hamilton, 2000.
- [2 L. A. Camacho y M. M. Cantor, *Calibración y análisis de la capacidad predictiva de
1] modelos de transporte de solutos en un río de montaña Colombiano*, Medellín:
AVANCES EN RECURSOS HDRAULICOS, 2006.
- [2 T. Geoffery, «The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe,» de *Proceedings
2] of the london mathematical society*, Londres, 1954, pp. 446-463.
- [2 R. A. Gonzales, *Determinación del comportamiento de la fracción dispersiva en ríos
3] característicos de montaña*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad De
Ingeniería, 2008.
- [2 J. E. Holguín Gonzales, «Determinación de la tasa de reaireación en un río de
4] montaña colombiano mediante el uso de trazadores,» Bogotá, 2003.
- [2 J. Racca, «Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de
5] modelos digitales del terreno,» Instituto de Fisiografía y geología, Rosario, 2007.
- [2 H. Fisher, «Dispersion Predictions in Natural Streams,» *Journal of the Sanitary
6] Engineering Division*, 1968.
- [2 R. O. Rodriguez Villamil, «Implementación de un software didáctico para la modelación
7] de transporte de solutos,» Universidad De los Andes, Bogota, 2003.
- [2 C. A. Niño Mendez, «Análisis de Trazadores,» Universidad de los Andes, Bogotá,
8] 2004.
- [2 M. R. Spiegel, «Theory and problems of statistics,» McGraw-Hill, Mexico DF, 1991.
9]
- [3 Secretaría Distrital de Ambiente, «Formulación del plan de ordenación y manejo de la
0] cuenca del río Salitre en el perímetro urbano del distrito capital,» Alcaldía Mayor de
Bogotá - Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, 2008.
- [3 Alcaldía Mayor de Bogotá y Universidad de los Andes, «Calidad del Recurso Hídrico,»
1] Secretaría Distrital de Ambiente, Bogotá, 2011.
- [3 Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y Universidad del Valle, «Estudio
2] del proceso de reaireación en el río Cauca,» Santiago de Cali, 2007.
- [3 C. L. Clark y Y.-s. Fok, «Stream waste assimilative capacity analysis using reaeration
3] coefficients measured by tracer techniques,» *Journal Of the American Water resources
association*, Hawaii, 1983.

- [3 IDEAM, «Estudio Nacional del Agua 2014,» Bogotá, 2015.
4]
- [3 Departamento Nacional de Planeación - Consejo Nacional de política económica y
5] social, «ACCIONES PRIORITARIAS Y LINEAMIENTOS PARA LA FORMULACIÓN
DEL PLAN NACIONAL DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES,» BOGOTÁ, 2002.
- [3 J. E. Palumbo y L. C. Brown, «Assessing the Performance of Reaeration Prediction
6] Equations,» *American Society of Civil Engineers*, pp. 1-8, 2013.
- [3 A. F. Nadal , A. M. Conssavella y N. B. Larrosa, «Determinación de la tasa de
7] reaeración y modelación hidrodinámica de un tramo del río Tercero (Ctalamochita),»
Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, 2014.
- [3 G. A. ARENAS FAURA, «ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LA TASA DE
8] REAIREACIÓN EN RÍOS DE MONTAÑA,» Bogotá, 2005.
- [3 S. C. Chapra, *Surface Water-Quality Modelling*, New York: The McGraw-hill
9] Companies, InC, 1997.
- [4 S. Chapra , «Surface water-quality modeling,» McGraw-Hill, New York, 1997.
0]
- [4 S. J. Arceivala, «Wastewater treatment and disposal. Engineer and Ecology in pollution
1] control,» New York, Marcel Dekker, 1981, p. 892.
- [4 S. R. Qasim, «Wastewater treatment plants: planning, design and operation holt,» New
2] York, Rinehart and Winston, 1985.
- [4 A. Orozco Jaramillo, «Bioingeniería de Aguas residuales,» Bogotá, ACODAL, 2014, p.
3] 30.
- [4 L. A. Camacho, «Calibración y comparación de modelos de transporte de solutos en
4] ríos de montaña,» XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA,
Guayana -Venezuela, 2006.

10. ANEXOS

ANEXO 1 – Datos de conductividad tomados en campo.

ANEXO 2 – Resultado de análisis de trazadores.

ANEXO 3 – matriz de evaluación de criterios técnicos de aplicabilidad para las ecuaciones empíricas de las tasas de reaireación.

ANEXO 4 – diagrama de cajas con puntos atípicos.

ANEXO 5- Hoja de Caculo tasas de reaireación