



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES SOLUBLES EN LA CUENCA
BAJA DEL RÍO MALA, PROVINCIA DE CAÑETE, EN ÉPOCA
SECA”

Tesis para optar el título profesional de:
INGENIERO AMBIENTAL

Presentado por:

Bach. Diego Alonso Nakaya Yamashiro (ORCID 0000-0002-5109-
4946)

Bach. Stephany Milagros Saavedra Díaz (ORCID 0000-0002-0202-
2583)

Asesor:

Dr. Luis Carrasco Venegas (ORCID – 0000-0002-7832-3366)

Lima – Perú

2020

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 15 de enero de 2021.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dra. Susan Mery Medina Canzio
Miembro: Mg. Rose Mary Argomedo Alcántara
Miembro: Mg. Alexander Emanuel Díaz Sotil

Se reúnen para evaluar la tesis titulada: "Dispersión de contaminantes solubles en la cuenca baja del río Mala, provincia de Cañete, en época seca"

Presentada por los tesisistas:

- Diego Alonso Nakaya Yamashiro y Stephany Milagros Saavedra Díaz

Para optar al Título Profesional de ingeniera ambiental.

Asesorada por: Dr. Luis Americo Carrasco Venegas

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime (x) por mayoría simple () calificar a:

Tesisista: Diego Alonso Nakaya Yamashiro			Nota (en letras): Dieciocho	
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (x)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()	
Tesisista: Stephany Milagros Saavedra Díaz			Nota (en letras): Dieciocho	
Aprobado ()	Aprobado - Muy buena (x)	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()	

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



Dra. Susan Mery Medina Canzio
Presidenta del Jurado



Dr. Luis Americo Carrasco Venegas
Asesor



Mg. Rose Mary Argomedo Alcántara
Miembro del jurado



Mg. Alexander Emanuel Díaz Sotil
Miembro del jurado

AGRADECIMIENTO:

Agradecemos a todas las personas que nos dieron constantemente su apoyo y alentaron a alcanzar nuestro objetivo.

En primer lugar, al Dr. Luis Carrasco Venegas, por su orientación, paciencia y persistente interés sobre el desarrollo de esta tesis.

También a nuestros familiares por su incondicional soporte en el logro de este meta profesional.

Índice General

AGRADECIMIENTO:.....	2
I. RESUMEN.....	8
II. ABSTRACT	10
III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
IV. MARCO TEÓRICO	15
1. Contaminación de agua.....	15
2. Época seca.....	16
3. Morfología de ríos.....	17
4. Zona de mezcla	18
5. Modelación de transporte de contaminantes.....	18
6. Coeficiente de dispersión longitudinal	20
7. Trazadores	21
8. Método de lines	21
9. Antecedentes.....	22
V. OBJETIVOS	25
1. Objetivos generales:.....	25
2. Objetivos específicos:.....	25
VI. METODOLOGÍA.....	26

VII. RESULTADOS.....	35
1. Tramo N°1 irregular	35
1.1 Estación 1 - Tramo N°1.....	35
1.2 Estación 2 - Tramo N°1.....	37
1.3 Coeficiente de dispersión longitudinal tramo N° 1.....	39
1.4 Simulación de la dispersión de contaminantes tramo N°1	39
2. Tramo N°2 Regular.....	42
2.1 Estación 1 - Tramo N°2.....	43
2.2 Estación 2 - Tramo N°2.....	44
2.3 Coeficiente de dispersión longitudinal tramo N°2.....	45
2.4 Simulación de la dispersión de contaminantes tramo N°2	46
VIII. DISCUSIÓN	50
IX. CONCLUSIONES.....	57
X. RECOMENDACIONES	58
XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59
XII. ABREVIATURAS.....	69
XIII. ANEXOS:.....	70

Índice de figuras

Figura 1 <i>Vertimiento de efluentes en el río Mala</i>	14
Figura 2 <i>Mapa de tramos en la cuenca baja del río Mala</i>	26
Figura 3 <i>Tramo N°1 (Irregular)</i>	27
Figura 4 <i>Estaciones Monitoreo - Tramo N°1 (Irregular)</i>	29
Figura 5 <i>Tramo 2 (Regular)</i>	31
Figura 6. <i>Simulación de la dispersión del tramo N°1</i>	41
Figura 7 <i>Datos Simulación vs Datos Experimentales Tramo N°1</i>	42
Figura 8 <i>Simulación de la dispersión del tramo N°2</i>	47
Figura 9 <i>Datos Simulación vs Datos Experimentales Tramo N°2</i>	48
Figura 10 <i>Datos Experimentales Tramo N°1 y Tramo N°2</i>	49
Figura 11 <i>Datos simulados Tramo N°1 y Tramo N°2</i>	49

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Conductividad eléctrica de la estación 1 Tramo N°1</i>	35
Tabla 2 <i>Conductividad eléctrica de la estación 2 Tramo N°1</i>	37
Tabla 3 <i>Conductividad eléctrica de la estación 1 Tramo N°2</i>	43
Tabla 4 <i>Conductividad eléctrica de la estación 2 Tramo N°2</i>	44

Índice de Anexos

Anexo 1 Punto de inyección instantánea Tramo N°1	70
Anexo 2 Determinación experimental zona de mezcla Tramo N°1	70
Anexo 3 Muestreo de conductividad eléctrica en la estación 1 Tramo N°1	71
Anexo 4 Estación 1 del Tramo N°1	71
Anexo 5 Estación 2 del Tramo N°1	72
Anexo 6 Muestreo de conductividad eléctrica en la estación 2 del Tramo N°1	72
Anexo 7 Panorámica del tramo N°2	73
Anexo 8 Tuberías de descargas de efluentes del Tramo N°2.....	73
Anexo 9 De vista a nivel del Tramo N°2	74
Anexo 10 De vista a nivel del Tramo N°2	74
Anexo 11 Medición del largo del cauce para determinar velocidad del Tramo N°2	75
Anexo 12 Medición del largo del cauce para determinar velocidad del Tramo N°2	75
Anexo 13 Determinación de la velocidad en base a la inyección de rhodamina Tramo N°2.....	76
Anexo 14 Preparación de la mezcla para la inyección instantánea Tramo N°2	76
Anexo 15 Medición de la conductividad Tramo N°2	77
Anexo 16 Recopilación de datos en campo Tramo N°2.....	77

I. RESUMEN

El aumento de las actividades antropogénicas como son la agricultura, la ganadería y el desarrollo comercial e industrial son las esenciales fuentes de aportes de vertimientos líquidos, los cuales alteran la calidad de agua de ríos y mares generando el deterioro de la calidad de cuerpos hídricos. Bajo este contexto, la presente investigación tiene como finalidad generar modelos de simulación de dispersión mediante el uso de trazadores solubles vertidos en 2 cursos de agua (tramos), el primer tramo N°1 de un curso con secciones de áreas transversales variables (irregular), segundo tramo N°2 de un curso con secciones de áreas transversales con menos variabilidad (regular) del río Mala en época seca, mediante un método experimental, los cuales podrán ser luego usados como herramientas predictivas ante casos adversos ambientales.

En la experimentación se determinaron las características hidrodinámicas de dos tramos del río Mala, los marcadores utilizados fueron el cloruro de sodio (sal común) y la Rhodamina, estos se vertieron mediante una técnica de inyección instantánea, tomando muestras en 2 estaciones aguas abajo cada 30 segundos por cada curso o tramo de agua. Midiendo la conductividad eléctrica de las muestras *in situ*, se determinó la concentración del marcador en cada punto de recolección, y con ello se halló los coeficientes de dispersión longitudinal, el cual es un parámetro fundamental para los modelos de simulación.

Los resultados nos indican que los modelos de simulación se asemejan a una campana gaussiana; asimismo, los valores de los coeficientes de dispersión longitudinal fueron $0.177 \text{ m}^2/\text{s}$ y $2.05 \text{ m}^2/\text{s}$, para los tramos N°1 y N°2, respectivamente.

Se observa en los resultados que el modelo de simulación que más se ajusta a los datos experimentales es el modelo del tramo N°2, por ser un tramo regular y no presentar muchas variaciones en comparación con el tramo N°1.

Palabras claves: contaminantes en ríos, zona de mezcla, transporte y modelos de dispersión de contaminantes en agua, trazadores, coeficiente de dispersión.

II. ABSTRACT

The increase in anthropogenic activities such as agriculture, livestock and commercial and industrial development are the essential sources of contributions from liquid discharges, which alter the quality of water in rivers and seas, generating a deterioration in the quality of water bodies. Under this context, the present research aims to generate dispersion simulation models through the use of soluble tracers discharged into 2 water courses (sections), the first section No. 1 of a course with sections of variable cross-sectional areas (irregular) , second section N ° 2 of a course with sections of cross-sectional areas with less variability (regular) of the Mala River in dry season, through an experimental method, which can then be used as predictive tools in the event of adverse environmental cases. In the experimentation, the hydrodynamic characteristics of the two stretches of the Mala River were determined, the markers used were sodium chloride (common salt) and Rhodamine, and these were poured through an instant injection technique, taking samples in 2 downstream stations each 30 seconds for each course or section of water. Analysing the electrical conductivity of the samples *in situ*, the concentration of the tracer is determined at each collection point, and with it, the longitudinal dispersion coefficients are found, which is a fundamental parameter for the simulation models.

The results indicate that the simulation models resemble a Gaussian bell; likewise, the values of the longitudinal dispersion coefficients were 0.177 m²/s and 2.05 m²/s, for sections N°1 and N°2, respectively.

It is observed in the results that the simulation model that best adjusts to the experimental data is the model of section N° 2, as it is a regular section and does not present many variations compared to section N°1.

Keywords: pollutants in rivers, mixing zone, transport and dispersion models of pollutants in water, tracers, dispersion coefficient.

III. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la Organización de las Naciones Unidas (2015), la población se encuentra expuesta a sufrir una crisis global de agua en el año 2030, donde la disminución de los recursos hídricos de agua dulce podría llegar a ser de un 40%; por tanto, actualmente es necesario promocionar y acelerar iniciativas enfocadas en solucionar la contaminación en cuerpos hídricos.

Generalmente la contaminación en cuerpos hídricos es de origen antropogénico, según datos destacados por la Organización de las Naciones Unidas (2018), detallan que aproximadamente el 80% de las aguas residuales resultantes de la actividad humana son vertidas en los ríos sin tratamiento previo, afectando su capacidad de autodepuración y siendo contaminadas.

La calidad de agua de nuestro país se ha visto impactada negativamente por actividades extractivas como minería, industrias y por actividades productivas como la agricultura, por el uso de abonos sintéticos, plaguicidas y fertilizantes (Defensoría del Pueblo, 2015). Asimismo, según Aguafondo (2015), la calidad de los recursos hídricos tiene gran importancia dependiendo de la variedad de uso; sin embargo, Lima atraviesa problemas hídricos por contaminación, principalmente por las descargas generadas mencionadas.

La cuenca baja del río Mala, de acuerdo con la Resolución Jefatural N° 056-2018-ANA, y en concordancia con el numeral 3 del D.S. N° 004-2017-MINAM se encuentra en la Categoría 3 “Riego de vegetales y bebida de animales”; por tanto, este recurso es utilizado por los pobladores en las cosechas del distrito. Sin embargo, el río Mala actualmente se ve afectado por la exposición a efluentes provenientes de diversas actividades antropogénicas los cuales

descargan directamente al cauce, con un régimen continuo sin tratamiento alguno (ANA, 2015).

Actualmente, se busca reducir progresivamente la carga de contaminantes mediante la gestión y manejo de aguas residuales. Se tiene como gran interés el estudio de dispersión de contaminantes en un curso de agua mediante el uso de trazadores (Espinoza, Vinicio y Zavaleta, 2013). Por tanto, esta investigación usará “trazadores”, o sustancias específicas para “marcar” un contaminante, el cual podrá ser estudiado a través de sistemas o modelos matemáticos.

Se eligió la cuenca baja del río Mala, distrito de Mala, provincia de Cañete, por encontrarse principalmente expuesta a vertimientos de aguas residuales sin un tratamiento previo, entre las cuales incluye los vertimientos de aguas residuales domésticas y comerciales de la población de Mala (como se observa en la figura N°1), San Antonio, Calango, Joaquín, Ornas, Quinches, Huampará, Cochas, Ayavirí, Tanta y Quinti, las mismas que no cuentan con autorización de vertimientos (Autoridad Nacional de Agua [ANA], 2014).

Figura 1

Vertimiento de efluentes en el río Mala



El presente estudio podrá ser utilizado para evaluar el posible comportamiento de los vertimientos cercanos al área de estudio como se observa en la figura N°1, se podrá identificar posibles fuentes de contaminación y el posible efecto que puedan conllevar a la zona de estudio. Se realizará el estudio con marcadores debido a que es una técnica en el cual es posible simular el impacto de los vertimientos en la zona de estudio.

La aplicación de un modelo matemático servirá como una herramienta de simulación predictiva para evaluar la capacidad de dispersión de un contaminante en un cuerpo hídrico (río Mala), con similares características al del río mala en época seca, con lo cual podrá servir de base para diferentes escenarios de contaminación por efluentes (Cajas, 2014).

IV. MARCO TEÓRICO

1. Contaminación de agua

Según Mitra (2020), la contaminación de agua es definida como la presencia de sustancias químicas y biológicas en el agua ajenas a su composición original y puede presentar una amenaza para la salud humana y romper la armonía con el medio ambiente.

Esta presencia de sustancias o agentes externos a los cuerpos hídricos son principalmente resultado de las actividades humanas, siendo así las principales fuentes de contaminación de agua los efluentes industriales, provenientes de empresas manufactureras las cuales vierten sus desechos líquidos en algunos casos con tratamientos previos y otros no; efluentes domésticos, producto de usos humanos cotidianos; de la infiltración de fertilizantes, debido a actividades agrícolas y de derrames accidentales de petróleo que contaminan en gran medida el agua (Mitra, 2020).

La contaminación de las aguas puede introducir, de modo directo o indirecto, materias o formas de energía en la misma (Menéndez, 2010). Por tanto, es importante evaluar el comportamiento y dispersión de contaminantes en los cuerpos de agua para luego proponer alternativas de cuidado de medios receptores.

La contaminación de los sistemas acuáticos están determinados por los tipos de fuentes externas, el transporte de sustancias y en la conversión química, biológica o bioquímica de estas sustancias (Sánchez, 2012). Los fenómenos de transporte pueden ser de tipo advectivo o de difusión. Este primer fenómeno, es el arrastre de una sustancia contaminante por el curso de agua debido a su flujo;

de solo existir este fenómeno, el contaminante sería constante y se transportaría a la misma velocidad que el agua.

El segundo tipo de fenómeno de transporte es la difusión, en el cual una sustancia química se dispersa según la diferencial de velocidades dadas por la fuerza de fricción en el cuerpo hídrico conocido como la Ley de Fick.

2. Época seca

Las cuencas hidrográficas presentan caudales muy variantes, los cuales están directamente relacionados con elementos meteorológicos como el régimen tropical (dos periodos estacionales: época lluviosa y seca), con el uso de suelo, con la disponibilidad de agua subterránea y con la geomorfología (Quesada et al. 2012)

Según el SENAMHI (2013), la época seca hace referencia al caudal más bajo o caudal mínimo de un río dentro del año hidrológico; asimismo, ocurre principalmente en los ríos de las vertientes del Pacífico y aquellos ubicados en la región andina generalmente durante los meses de mayo a noviembre; asimismo, durante la época sea, la humedad es baja, lo cual conlleva a que los ríos se sequen.

El ciclo hidrológico de la cuenca del río Mala, está influenciada por las características climatológicos del área, evaluados por las estaciones meteorológicas ubicadas a lo largo de la cuenca, las cuales han designado que el periodo de estiaje o época seca tiene una duración de 183 días entre los meses de junio a noviembre. Asimismo, en la desembocadura del río Mala, las precipitaciones son prácticamente nulas (ANA, 2015).

3. Morfología de ríos

Según Rocha (2013), los ríos no tienen estabilidad ni permanencia respecto a sus características, estos constantemente se modifican y se desplazan. Cuando se habla de la apariencia de los ríos, se hace mención a la forma de estos, donde es necesario considerar que los ríos no tienen la misma forma a lo largo de todo su trayecto, principalmente estos cambios son inducidos por factores naturales como climáticos, hidrológicos y tectónicos.

La morfología de ríos se encarga de estudiar la geometría de las secciones transversales y las características del perfil de los ríos. Las teorías analíticas se centran en los casos idealizados; asimismo, los datos de campo y laboratorio corresponden a canales rectos con secciones transversales casi invariantes. Sin embargo, estos canales también pueden presentar varias diferencias e irregularidades en dichas secciones (García & Maza, 1997). Como en los casos que han sido estudiado en la presente investigación, donde el tramo N° 1, presenta secciones trasversales variantes o irregulares y en el tramo N° 2, el cual presenta secciones regulares y casi invariantes.

4. Estándar de calidad ambiental agua (ECA-agua)

El Eca-agua indica los niveles de concentración de sustancias y/o elementos que el ambiente presenta en cantidades que no son riesgosas para la salud y el ambiente. El estándar de calidad de agua, regula 104 parámetros, los cuales son elementos de medición de naturaleza microbiológica y físico- química (MINAM, 2017).

5. Zona de mezcla

Se define como zona de mezcla aquella masa de agua en el cuerpo hídrico receptor en el que ocurre la dilución del efluente por fenómenos hidrodinámicos, de dispersión y variaciones espaciales geomorfológicas, donde la finalidad es delimitar una zona para la mezcla completa del vertimiento en el cuerpo hídrico receptor. Asimismo, la zona de mezcla es de gran importancia por servir de apoyo a las autoridades ambientales en la toma de decisiones sobre la autorización de vertimientos (Rodríguez, 2015).

En la zona de mezcla se permite que las concentraciones puedan superar el Eca-agua asignado al cuerpo de agua; sin embargo, se debe considerar que si se hace uso del recurso en esta zona para actividades humanas, representa un peligro para la salud de la población, siendo así fundamental restringir la extensión máxima de la zona de mezcla (MINAGRI, 2017).

Previo al estudio de la dispersión de contaminantes, es importante conocer cuáles son las zonas indicadas para la ubicación de los puntos de monitoreo en los cuerpos hídricos receptores de un vertimiento de agua residual, los cuales deben ser fuera de la zona de mezcla (ANA, 2016); en el caso de los cuerpos lóticos, se ubican los puntos de monitoreo a una distancia de 50 metros aguas arriba y a 200 metros aguas debajo del punto del vertimiento; sin embargo, estos puntos pueden variar dependiendo de la zona de mezcla, los cuales son válidos para el control de los estándares de calidad ambiental de agua (ANA, 2017).

6. Modelación de transporte de contaminantes

Los modelos pueden interpretarse como una representación matemática, conceptual o gráfica de un sistema; en los cuales se detallan las variables

independientes y dependientes de interés, sus características y restricciones mediante el uso de ecuaciones. Uno de los aspectos más importante de los modelos son las características o parámetros que el modelador considera más importante al momento de analizar sus relaciones e interacciones y en base a su análisis poder modelar escenarios futuros favorables o desfavorables. Existen diferentes tipos de modelo como son los descriptivos y los de simulación, en el tipo descriptivo únicamente se grafican los componentes del sistema, mientras que en los de simulación se imita el funcionamiento del sistema mediante variables y en base a ello se obtienen resultados predictivos cuyo resultado puede ser presentado en forma de datos numéricos o gráficos los cuales proporciona indicios aproximados de su comportamiento bajo diferentes manejos de sus variables (Calendaria et al., 2011)

Los modelos de dispersión son métodos para estimar la concentración de contaminantes a diversas longitudes de la fuente. En la elaboración de modelos se usan representaciones matemáticas de los factores que intervienen en la dispersión de contaminantes como son el coeficiente de dispersión longitudinal, la morfología de ríos entre otros (Rojas, 2017).

Para modelar el transporte de contaminantes en cuerpos lóticos se requiere conocer previamente los parámetros hidrológicos obtenidos en campo los cuales son el la velocidad, caudal y el coeficiente de dispersión. Asimismo, es necesario conocer también los parámetros geométricos (profundidad, anchura, sección transversal, pendiente) (Parsaie & Haghiabi, 2015). Para la determinación de la velocidad de un cuerpo lótico un método aplicado es el método de flotadores. Según el SENAMHI (2011) es un método de campo sencillo para medir el caudal de agua que pasa en una sección transversal del río. Este método usa materiales

sencillos los cuales pueden ser pelotas de plástico, botellas, troncos, otros; que se puedan observar a simple vista (Jaya, 2017).

7. Coeficiente de dispersión longitudinal

La dispersión longitudinal hace mención a los procesos de difusión y advección de partículas, siendo el corte referido a la advección de un fluido en un gradiente de velocidades y en diferentes coordenadas espaciales. Asimismo, la difusión hace referencia al movimiento de partículas al azar en base a la gradiente de concentración.

La dispersión longitudinal se puede expresar como la dispersión de una sustancia contaminante en la misma dirección del flujo o también llamado eje longitudinal. Inicialmente la pluma de contaminación presente un estado inicial con una concentración alta y pequeña varianza espacial. Sin embargo, estas condiciones iniciales varían con respecto al tiempo, donde aguas abajo se obtienen concentraciones más bajas pero con una mayor varianza espacial (Duarte, 2017).

El coeficiente de dispersión longitudinal (D) es un valor necesario para realizar predicciones para el transporte de contaminantes en un curso de agua, este parámetro puede ser hallado realizando un ensayo con el uso de colorantes o trazadores, donde se calcula la concentración del trazador en el cuerpo hídrico respecto al tiempo. Con los datos de concentración en el curso de agua, se halla el tiempo medio al centroide y la varianza temporal. Con estos valores se podrá calcular el coeficiente (Espinoza, Vinicio y Zavaleta, 2013).

8. Trazadores

Según Norzagaray y Llanes (2016), el trazador o marcador es una sustancia específica que sirve para "detectar" o hacer más fácilmente visible una fase específica o parte de un sistema denominado material marcado, estas sustancias o tintes son usados frecuentemente en las pruebas hidrológicas para observar el movimiento de agua superficial y subterránea, la absorción y no absorción de estas especies químicas. Las características más importantes de los trazadores más comúnmente utilizados son estabilidad física, biológica y química en el cuerpo hídrico, sin interacción y no retención en el terreno, débil adsorción y absorción, inalterabilidad del flujo superficial, fácil detección tanto cuantitativa y cualitativa, incluso a pequeñas concentración, ausencia o muy bajas concentraciones en las aguas naturales, no afectación hacia los seres vivos, facilidad en el transporte y manipulación. Asimismo, debe ser económicamente viable.

9. Método de lines

El método de lines lo establece Liskovets, donde a través de la discretización, una ecuación diferencial parcial es convertida en una ecuación diferencial ordinaria. Este método es de naturaleza mixta mediante el cual se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, el cual puede ser desarrollado de forma numérica o analítica. Para la presente investigación se usará dicho método para la solución de las ecuaciones diferenciales planteadas, para la simulación mediante el modelo matemático (Carrasco, 2018).

El método consiste en tomar tramos de longitud característica del problema, manteniendo la constante del tiempo. De este modo, la ecuación parcial es representada por un grupo de ecuaciones ordinarias, las cuales pueden unirse con la ecuación restante provenientes de la ecuación del balance de energía. La implementación del método fue exitosa y las predicciones alcanzadas con el modelo estudiado dan un alto porcentaje de confiabilidad, pues los resultados se ajustan a datos obtenidos en campo. Asimismo, las diversas simulaciones no muestran cambios importantes con pequeñas modificaciones en las diversas correlaciones utilizadas, como el coeficiente de difusión. Sin embargo, la correlación para el coeficiente de actividad es muy sensible a pequeños cambios en los parámetros. El método de líneas características es aplicable solamente a problemas con ecuaciones diferenciales para modelar los fenómenos de difusión-advención-reacción. Este método parte del hecho de un planteamiento con función escalar de la ecuación de la difusión-advención la cual puede eliminar el término no autoadjunto, el cual es causante de la asimetría en la matriz de rigidez y por tanto de la inestabilidad en la solución (Humberto et al., 2010).

10. Antecedentes

Investigaciones anteriores, como el trabajo de dispersión de contaminantes en cursos de agua en el río Chumbao, Perú (Quispe et al., 2016), vierte mediante un tubo de dos pulgadas cloruro de sodio, evaluando el parámetro de sólidos disueltos totales (mg/L) en un tramo de 100 metros, comprobando el modelo simple de dispersión gaussiana representa las condiciones observadas.

En los estudios realizados por Calvo (2010) en el río Chimbote, utiliza una técnica de trazadores combinada de Rhodamina B y Iodine 131 para ser estudiados en

mar. La Rhodamina, fue utilizada como un trazador visual y el Iodine tomó en consideración la dilución y el decrecimiento de concentración de bacterias (Calvo, 2010). Como limitantes de la investigación se tuvo el elevado costo de los trazadores y de los instrumentos de medición.

Según Botero (2005), realiza estudios de inyección instantánea de trazadores en ríos de la Montaña – Colombia, donde determina que los experimentos que usan trazadores pueden ser descritos como inyección de sustancias en un lugar particular del recorrido de una corriente y medición de la concentración de las sustancias aguas debajo de una cuenca. En su trabajo realiza experimentación de tipo in situ y ex situ, en donde determina que los datos más precisos son en las tomas de muestra in situ pero a su vez se necesita de mayor número de personas en campo.

En el estudio realizado por Claros et al. (2017) el río Huaura – Perú, seleccionan un tramo del río con las características de un fluido de turbulencia baja, tomando las muestras de agua durante el periodo de transición de estiaje a avenida, utilizando colorantes como trazadores debido al bajo caudal de la cuenca. En dicho trabajo concluyen que para una mejor precisa simulación de la ecuación de advección, será necesario una mayor toma de datos experimentales; asimismo, evalúan la composición del colorante y su interacción con el fluido. Este trabajo no evaluó una zona de mezcla previo al monitoreo.

El trabajo de Molina y Sierra (2009), realizado durante un año, utilizan como trazador la Rhodamina y mide parámetros como las tasas de aireación, donde simulan la dispersión de contaminantes durante la época seca y época de lluvia en el río Palomino Colombia. Determinan que la experimentación con trazadores

es realizada utilizando sustancias conservativas las cuales simulan el recorrido de contaminantes en el agua. En el presente trabajo se establece una relación con los coeficientes de reaeración obtenidos, donde luego se realiza un análisis de los resultados y sus condicionales de calidad del cuerpo hidrico. Sin embargo, esta técnica requiere de instrumentos de medición como fluorómetros, los cuales son de altos costos y podrían ser una limitante de investigación.

La presente investigación simula la dispersión de contaminantes en la cuenca baja del río Mala, ubicada en la zona centro del Perú. Políticamente la cuenca recorre tres provincias: Yauyos, Cañete y Huarochirí y veinte distritos. La cuenca baja del rio Mala es de fácil acceso, ubicada en el km 85 de la Panamericana Sur (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 2007).

La cuenca del rio Mala presenta un caudal muy variante, debido principalmente a las características climatológicas. Se han identificado durante el ciclo anual tres periodos en la cuenca: avenidas, estiaje y transición entre avenidas y estiaje, siendo las descargas máximas entre enero y marzo y las descargas mínimas entre julio y setiembre.

V. OBJETIVOS

1. Objetivos generales:

La presente investigación tiene como objetivos generales los siguientes:

- Simular la dispersión de contaminantes solubles mediante trazadores en la cuenca baja del río Mala durante la época seca de un curso irregular.
- Simular la dispersión de contaminantes solubles mediante trazador en la cuenca baja del río Mala durante la época seca de un curso regular.

2. Objetivos específicos:

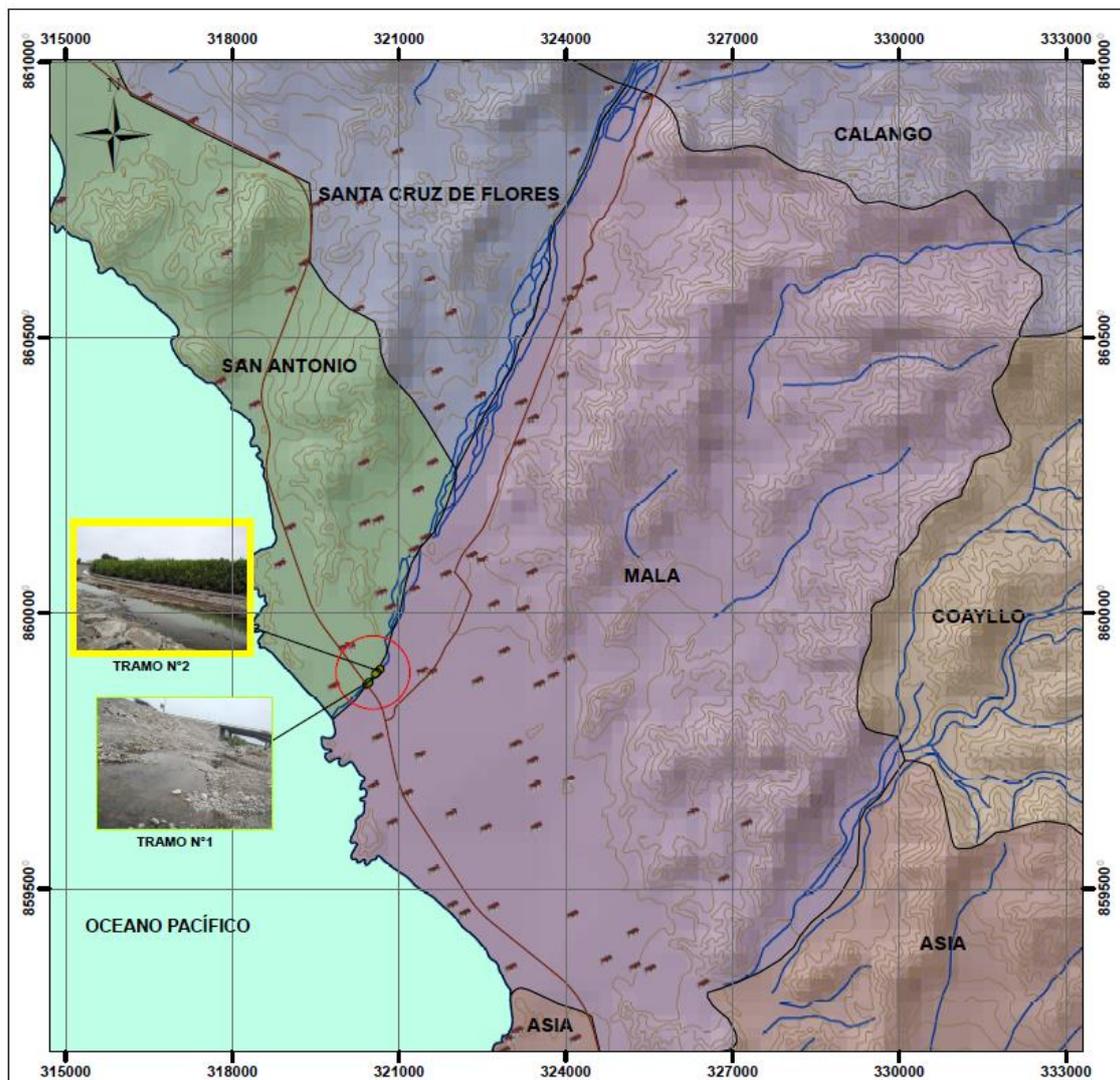
- Determinar las características hidrodinámicas del río Mala en época de seca en un curso irregular y regular.
- Obtener el coeficiente de dispersión longitudinal mediante el trazador cloruro de sodio en un curso irregular y regular.
- Analizar el proceso de dispersión de contaminantes mediante modelos unidimensionales.

VI. METODOLOGÍA

Se realizó una primera campaña el día 18 de julio de 2020, donde se visitó la cuenca baja del río Mala, se identificaron y georreferenciaron los 2 tramos, con el uso de un GPS (celular), donde posteriormente se realizarían las experimentaciones.

Figura 2

Mapa de tramos en la cuenca baja del río Mala



En la segunda campaña de fecha 25 de julio de 2020, se realizó la experimentación en el tramo N°1 (Figura 3) cuyo cauce es irregular. Se inició determinando el punto de vertimiento el cual fue georreferenciado con las

coordenadas $76^{\circ}39'11.714''\text{W}$, $12^{\circ}40'13.588''\text{S}$, la estación 1 con las coordenadas $76^{\circ}39'12.492''\text{W}$, $12^{\circ}40'14.604''\text{S}$ y la estación 2 con las coordenadas $76^{\circ}39'13.056''\text{W}$, $12^{\circ}40'15.047''\text{S}$. A continuación, se obtuvieron las características hidrodinámicas del río, donde se midió el ancho del río, el largo del tramo y la profundidad media.

Figura 3

Tramo N°1 (Irregular)



De la misma forma, la velocidad media se obtuvo mediante el método del flotador (SENAMHI, 2011), se calculó el tiempo de recorrido del trazador Rhodamina a lo largo de dos puntos. Con el dato de la velocidad media, se multiplicó por el área de la sección transversal del río, obteniéndose el caudal del tramo N°1.

Una vez obtenidas las características hidrodinámicas del río, se determinó la zona de mezcla experimentalmente vertiendo 50 litros de agua con 6 gr de

Rhodamina, observando la zona en la cual se mezclaba completamente. Se procedió a medir dicha la longitud con una huincha, esta medida fue comparada con lo obtenido de forma empírica mediante la siguiente ecuación (1) propuesta por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (ANA, 2017):

$$L_O = \frac{(W)^2 \times u}{8 \times \pi \times D_y} \quad (\text{ecuación 1})$$

En donde:

Lo: Longitud de la zona de mezcla en metros

W: Ancho mínimo del río en metros aguas abajo

u: Velocidad media del flujo del río en el vertimiento en metros por segundos (m/s)

Dy: Coeficiente de dispersión lateral aguas abajo del vertimiento en m²/s.

Calculado mediante la siguiente ecuación:

$$D_y = c \times d \times u^* \quad (\text{ecuación 2})$$

c: factor de irregularidad del cauce (varía desde 0.1 hasta valores mayores a 1)

d: profundidad media del río aguas abajo del vertimiento en metros

u: velocidad de corte en metros por segundos, que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$u^* = \sqrt{(g \times d \times s)} \quad (\text{ecuación 3})$$

g: aceleración de la gravedad = 9.81 m/s²

s: Pendiente del cauce aguas abajo del vertimiento.

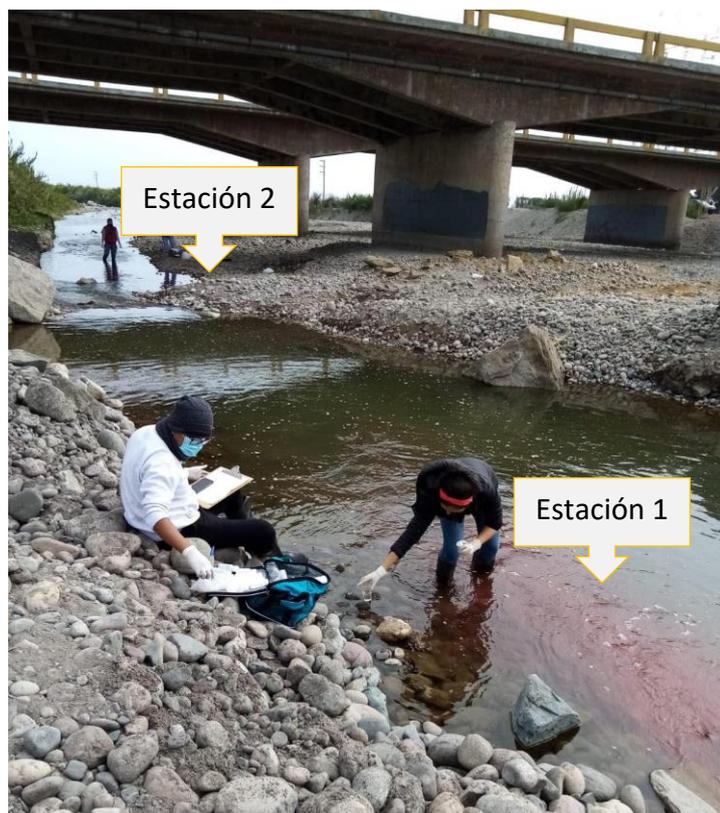
La estación 1 fue ubicada 40 metros aguas abajo del vertimiento, donde se halló la velocidad media de la estación 1,

La estación 2 fue ubicada 60 metros aguas abajo del vertimiento. Al igual que en la estación 1, se halló la velocidad media de la estación 2. (Figura 4)

Ambas estaciones fueron establecidas tomando en cuenta el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA,2016) los cuales se encuentran fuera de la zona de mezcla.

Figura 4

Estaciones Monitoreo - Tramo N°1 (Irregular)



Para la simulación del efluente, se preparó una mezcla con dos trazadores. Se vertió 100 L de agua de río con la mezcla de 6 kg de cloruro de sodio y 12 gr de Rhodamina, el cual fue vertido en 3.5 segundos. La concentración de la sal común fue establecida en cumplimiento con la normativa D.S. N° 004-2017-

MINAM del ECA agua categoría 3. La concentración de Rhodamina utilizada fue establecida de acuerdo con su ficha técnica de seguridad del químico biodegradable. Con estos datos se procedió a calcular el caudal con la concentración de cloruro de sodio con la finalidad de hallar la concentración en el punto de vertimiento.

Se halló la concentración inicial en el punto de vertimiento aplicando la fórmula de balance de masas.

$$C_m = \frac{(Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2)}{(Q_1 + Q_2)} \quad (\text{ecuación 4})$$

En donde:

C_m : Concentración de la mezcla

Q_1 : caudal del río

C_1 : concentración del río

Q_2 : caudal del efluente

C_2 : concentración del efluente

Se monitoreó la conductividad de la sal en la estación 1 y 2 en simultaneo con el uso de un conductímetro cada 30 segundos en un periodo total de 25 minutos, se realizaron tres repeticiones. El trazador Rhodamina tuvo como finalidad la simulación cualitativa del efluente.

En la segunda campaña de fecha 01 de agosto de 2020, se realizó la experimentación en el tramo N°2, el cual fue un tramo de cauce regular (Figura 5). Se debe tener en cuenta que en cada campaña se requirió del trabajo de seis personas.

Figura 5

Tramo 2 (Regular).



Al igual que en el tramo N°1, se determinó el punto de vertimiento el cual fue georreferenciado con las siguientes coordenadas $76^{\circ}39'5.04''W$, $12^{\circ}40'6.062''S$, la estación 1 con las coordenadas $76^{\circ}39'6.946''W$, $12^{\circ}40'7.828''S$ y la estación 2 con las coordenadas $76^{\circ}39'7.836''W$, $12^{\circ}40'8.731''S$, en donde se obtuvieron las características hidrodinámicas del río.

La preparación del efluente tuvo las mismas características (concentración y volumen) que en el tramo N°1.

Se halló la concentración inicial en el punto de vertimiento con la misma metodología del tramo N°1.

Para el regular, tramo N°2, la estación 1 fue colocada 80 metros aguas abajo del vertimiento teniendo las siguientes, la velocidad media fue hallada siguiendo los pasos del tramo N°1. La estación 2 fue colocada 120 metros aguas abajo del vertimiento; al igual que la estación 1, se halló la velocidad media de la estación 2, repitiendo el mismo método.

Ambas estaciones fueron establecidas tomando en cuenta el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA,2016) los cuales se encuentran fuera de la zona de mezcla.

Se monitoreó la conductividad de la sal en las estaciones 1 y 2 del tramo N°2 en simultaneo, al igual que en el tramo N°1.

Con los resultados de concentración y tiempo se halló el coeficiente de dispersión longitudinal para ambos tramos, aplicando el método de momentos estadísticos. Obteniéndose datos como la varianza temporal y la varianza espacial. (Carrasco, 2018).

$$D_L = \frac{1}{2} \times \frac{\partial \sigma_x^2}{\partial t} \quad (\text{Ecuación 5})$$

En donde:

D_L : coeficiente de dispersión longitudinal

σ_x^2 : varianza espacial de las partículas difundidas

t: tiempo

$$\sigma_x^2 = U^2 \times \sigma_t^2 \quad (\text{Ecuación 6})$$

En donde:

U^2 : Velocidad media de vida entre dos puntos a lo largo del río Mala

σ_t^2 : varianza temporal, la cual está definido por la siguiente integral

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (t - t_p)^2 \times C(x, t) \partial t}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(x, t) \partial t} \quad (\text{Ecuación 7})$$

T_p : tiempo de travesía del centroide

$$t_p = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t \times C(x,t) \partial t}{\int_{-\infty}^{+\infty} C(x,t) \partial t} \quad (\text{Ecuación 8})$$

En donde el denominador de la ecuación 7 y 8 es conocido como el momento estadístico de orden cero y la ecuación 8 es conocido como el momento estadístico de orden 1, mientras que la ecuación 7 es conocido como el momento de estadístico 2.

Con los valores de los coeficientes conocidos, se realiza el modelamiento y simulación de la dispersión de los trazadores. Aplicando la siguiente ecuación diferencial (9) para el desarrollo del modelo unidimensional.

En donde:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -V_x \times \frac{\partial c}{\partial x} + D_L \times \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (\text{Ecuación 9})$$

C: concentración

Vx: velocidad media del río

DL: coeficiente de dispersión longitudinal

T: tiempo

La ecuación N°9, fue desarrollada por medio del método de líneas, el cual consiste en discretizar la fórmula para simplificar la ecuación en términos simples algebraicos.

$$\frac{dCi}{dt} = -V_i \frac{(C_i - C_{i-1})}{\Delta x} + D_L \left(\frac{C_{i+1} - 2C_i + C_{i-1}}{\Delta x^2} \right) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Al desarrollar la ecuación 10, se obtiene un sistema de ecuaciones ordinarias lineales, los cuales son ingresados al software matemático Polymath Professional versión 6.1 para la obtención de la simulación de la dispersión de contaminantes.

VII. RESULTADOS

1. Tramo N°1 irregular

En el tramo N°1, el caudal fue de 0.3556 m³/s, con velocidades que variaban desde 0.43 m/s a 0.1 m/s, con una velocidad promedio de 0.24 m/s para todo el tramo N°1, presentando anchos irregulares que variaban desde 2.5 a 5 metros, donde se determinó que el ancho promedio fue de 3.5 metros para el presente tramo. Asimismo, las profundidades variaban desde 0.3 a 0.45 metros.

La zona de mezcla hallada experimentalmente tuvo una longitud de 25 metros, mientras que la hallada empíricamente mediante la ecuación 1 fue de 15 metros.

1.1 Estación 1 - Tramo N°1

Los resultados de las concentraciones de salinidad en base al tiempo de la estación 1 para cada repetición y el promedio al final del día se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 1

Conductividad eléctrica de la estación 1 Tramo N°1.

ESTACION N°1				
tiempo (segundos)	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 1	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 2	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 3	Promedio de Conductividad eléctrica (μS/cm)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90.0	42.0	22.0	0.0	21.3
120.0	530.0	366.0	204.0	366.7
150.0	586.0	896.0	796.0	759.3
180.0	474.0	530.0	474.0	492.7
210.0	366.0	410.0	474.0	416.7
240.0	270.0	366.0	410.0	348.7
270.0	170.0	270.0	270.0	236.7
300.0	136.0	170.0	236.0	180.7

330.0	104.0	136.0	204.0	148.0
360.0	103.0	100.0	170.0	124.3
390.0	103.0	98.0	120.0	107.0
420.0	100.0	82.0	136.0	106.0
450.0	22.0	62.0	104.0	62.7
480.0	22.0	62.0	104.0	62.7
510.0	22.0	62.0	104.0	62.7
540.0	22.0	62.0	82.0	55.3
570.0	22.0	62.0	82.0	55.3
600.0	0.0	42.0	82.0	41.3
630.0	0.0	42.0	82.0	41.3
660.0	0.0	42.0	82.0	41.3
690.0	0.0	0.0	82.0	27.3
720.0	0.0	0.0	62.0	20.7
750.0	0.0	0.0	62.0	20.7
780.0	0.0	0.0	62.0	20.7
810.0	0.0	0.0	42.0	14.0
840.0	0.0	0.0	42.0	14.0
870.0	0.0	0.0	42.0	14.0
900.0	0.0	0.0	42.0	14.0
930.0	0.0	0.0	42.0	14.0
960.0	0.0	0.0	42.0	14.0
990.0	0.0	0.0	42.0	14.0
1020.0	0.0	0.0	42.0	14.0
1050.0	0.0	0.0	42.0	14.0
1080.0	0.0	0.0	42.0	14.0
1110.0	0.0	0.0	42.0	14.0
1140.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1170.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1200.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Con los datos de la Tabla 1, se calculó el momento estadístico de orden cero de la ecuación 7 y 8; obteniendo un valor de 118900 uS*s/cm. Para el cálculo del tiempo de travesía del centroide (t_p) (ecuación 8) o también llamado momento de estadístico de orden 1, se determinó un tiempo de 277.63 segundos. Asimismo, la varianza temporal se calculó mediante la ecuación 7 y tuvo como resultado 39657.897 seg^2 .

1.2 Estación 2 - Tramo N°1

Los resultados de las concentraciones de salinidad en base al tiempo de la estación 2 para cada repetición y el promedio final del día se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 2

Conductividad eléctrica de la estación 2 Tramo N°1

ESTACION N°2				
tiempo (segundos)	Conductividad eléctrica (µS/cm) Repetición 1	Conductividad eléctrica (µS/cm) Repetición 2	Conductividad eléctrica (µS/cm) Repetición 3	Promedio de Conductividad eléctrica (µS/cm)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0
240.0	0.0	0.0	0.0	0.0
270.0	22.0	42.0	42.0	35.3
300.0	62.0	42.0	142.0	82.0
330.0	82.0	42.0	142.0	88.7
360.0	136.0	104.0	204.0	148.0
390.0	139.0	170.0	204.0	171.0
420.0	249.0	236.0	264.0	249.7
450.0	270.0	270.0	264.0	268.0
480.0	270.0	270.0	324.0	288.0
510.0	270.0	270.0	324.0	288.0
540.0	277.0	236.0	304.0	272.3
570.0	256.0	236.0	264.0	252.0
600.0	236.0	204.0	304.0	248.0
630.0	204.0	170.0	234.0	202.7
660.0	204.0	170.0	202.0	192.0
690.0	204.0	170.0	200.0	191.3
720.0	156.0	170.0	200.0	175.3
750.0	136.0	104.0	164.0	134.7
780.0	104.0	104.0	142.0	116.7

810.0	136.0	104.0	100.0	113.3
840.0	130.0	100.0	100.0	110.0
870.0	82.0	82.0	164.0	109.3
900.0	62.0	62.0	164.0	96.0
930.0	62.0	62.0	164.0	96.0
960.0	62.0	62.0	136.0	86.7
990.0	62.0	62.0	136.0	86.7
1020.0	42.0	62.0	136.0	80.0
1050.0	42.0	62.0	136.0	80.0
1080.0	42.0	62.0	136.0	80.0
1110.0	42.0	62.0	136.0	80.0
1140.0	42.0	42.0	136.0	73.3
1170.0	42.0	42.0	104.0	62.7
1200.0	42.0	42.0	104.0	62.7
1230.0	0.0	42.0	136.0	59.3
1260.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1290.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1320.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1350.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1380.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1410.0	0.0	0.0	104.0	34.7
1440.0	0.0	0.0	82.0	27.3
1470.0	0.0	0.0	82.0	27.3
1500.0	0.0	0.0	82.0	27.3
1530.0	0.0	0.0	82.0	27.3
1560.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1590.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1620.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1650.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1680.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1710.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1740.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1770.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1800.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1830.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1860.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1890.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1920.0	0.0	0.0	62.0	20.7
1950.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1980.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2010.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2040.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Se trabajó con el promedio de los datos de la Tabla 2, donde se calculó el momento estadístico de orden cero de la ecuación 7 y 8; obteniendo un valor de 157440 uS*s/cm. Para el cálculo del tiempo de travesía del centroide (tp) (ecuación 8) o también llamado momento estadístico de orden 1, fue de 749.3 segundos. Asimismo, la varianza temporal se calculó mediante la ecuación 7 y tuvo como resultado 132655.383 seg².

1.3 Coeficiente de dispersión longitudinal tramo N° 1

Con los datos obtenidos del tiempo de travesía del centroide o también llamado momento estadístico de orden 1, la varianza temporal de las 2 estaciones y la velocidad media (U) entre la estación 1 y 2, cuyo resultado fue de 0.042 m/s, se procedió a calcular el coeficiente de dispersión longitudinal mediante la ecuación 5, cuyo resultado obtenido fue 0.177 m²/s.

1.4 Simulación de la dispersión de contaminantes tramo N°1

Con el valor del coeficiente de dispersión longitudinal se procedió a la simulación mediante la ecuación 10. Para este caso se tomó tramos de 4 metros hasta completar 60 metros, las velocidades se colocaron en el rango de 0.17 a 0.5 m/s.

Para este primer tramo se obtuvieron 15 ecuaciones discretizadas con el uso de la ecuación 10, las cuales se detallan a continuación:

$$d(C1)/d(t) = -V1 * (C1 - C0) / DX + DISP_X * (C2 - 2 * C1 + C0) / DX ^ 2$$

$$d(C2)/d(t) = -V2 * (C2 - C1) / DX + DISP_X * (C3 - 2 * C2 + C1) / DX ^ 2$$

$$d(C3)/d(t) = -V3 * (C3 - C2) / DX + DISP_X * (C4 - 2 * C3 + C2) / DX ^ 2$$

$$d(C4)/d(t) = -V4 * (C4 - C3) / DX + DISP_X * (C5 - 2 * C4 + C3) / DX ^ 2$$

$$d(C5)/d(t) = -V5 * (C5 - C4) / DX + DISP_X * (C6 - 2 * C5 + C4) / DX ^ 2$$

$$d(C6)/d(t) = -V6 * (C6 - C5) / DX + DISP_X * (C7 - 2 * C6 + C5) / DX ^ 2$$

$$d(C7)/d(t) = -V7 * (C7 - C6) / DX + DISP_X * (C8 - 2 * C7 + C6) / DX ^ 2$$

$$d(C8)/d(t) = -V8 * (C8 - C7) / DX + DISP_X * (C9 - 2 * C8 + C7) / DX ^ 2$$

$$d(C9)/d(t) = -V9 * (C9 - C8) / DX + DISP_X * (C10 - 2 * C9 + C8) / DX ^ 2$$

$$d(C10)/d(t) = -V10 * (C10 - C9) / DX + DISP_X * (C11 - 2 * C10 + C9) / DX ^ 2$$

$$d(C11)/d(t) = -V11 * (C11 - C10) / DX + DISP_X * (C12 - 2 * C11 + C10) / DX ^ 2$$

$$d(C12)/d(t) = -V12 * (C12 - C11) / DX + DISP_X * (C13 - 2 * C12 + C11) / DX ^ 2$$

$$d(C13)/d(t) = -V13 * (C13 - C12) / DX + DISP_X * (C14 - 2 * C13 + C12) / DX ^ 2$$

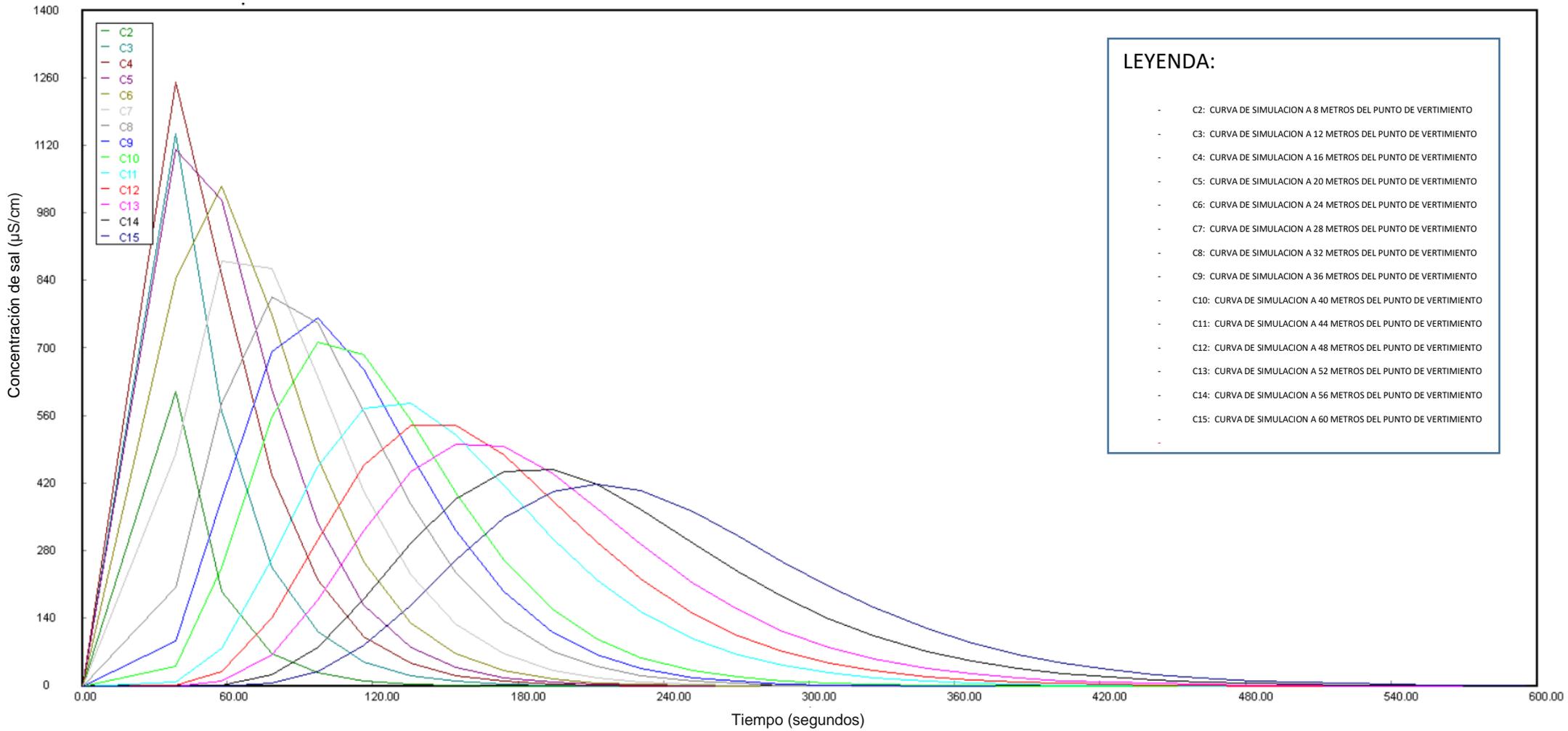
$$d(C14)/d(t) = -V14 * (C14 - C13) / DX + DISP_X * (C15 - 2 * C14 + C13) / DX ^ 2$$

$$d(C15)/d(t) = -V15 * (C15 - C14) / DX + DISP_X * (C16 - 2 * C15 + C14) / DX ^ 2$$

Como concentración inicial se tomó 8823 us/cm, obtenido mediante la fórmula de balance de masa (ecuación 4), mientras que las velocidades se colocaron al azar en un rango de 0.5 a 0.1 m/s. Estos datos fueron puestos en el software Polymath profesional, se puede observar la simulación en la Figura 6.

Figura 6.

Simulación de la dispersión del tramo N°1.



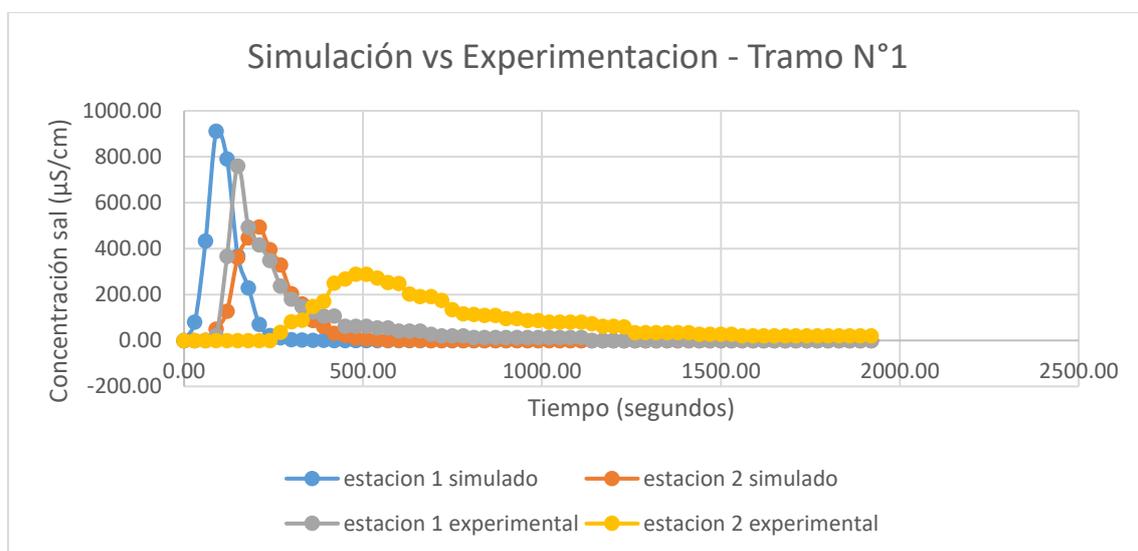
LEYENDA:

- C2: CURVA DE SIMULACION A 8 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C3: CURVA DE SIMULACION A 12 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C4: CURVA DE SIMULACION A 16 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C5: CURVA DE SIMULACION A 20 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C6: CURVA DE SIMULACION A 24 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C7: CURVA DE SIMULACION A 28 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C8: CURVA DE SIMULACION A 32 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C9: CURVA DE SIMULACION A 36 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C10: CURVA DE SIMULACION A 40 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C11: CURVA DE SIMULACION A 44 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C12: CURVA DE SIMULACION A 48 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C13: CURVA DE SIMULACION A 52 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C14: CURVA DE SIMULACION A 56 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
- C15: CURVA DE SIMULACION A 60 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO

Teniendo en cuenta que los datos C10 (40 metros) y C15 (60 metros) Figura 6 corresponden a los datos simulados de la estación 1 y estación 2, respectivamente, se realizó la Figura 7 para la comparación de los datos obtenidos experimentalmente y los simulados.

Figura 7

Datos Simulación vs Datos Experimentales Tramo N°1



2. Tramo N°2 Regular

En el tramo N°2, el caudal fue de 0.29 m³/s, con velocidades que variaban desde 0.51 m/s a 0.4 m/s con una velocidad promedio de 0.44 m/s para todo el tramo N°2, con anchos irregulares que variaban desde 2.2 a 2.5 metros, se determinó que el ancho promedio fue de 2.2 metros para el presente tramo. Asimismo, las profundidades variaban desde 0.3 a 0.4 metros.

La zona de mezcla hallada experimentalmente tuvo una longitud de 40 metros, mientras que la hallada empíricamente, mediante la ecuación 1, fue de 20 metros.

2.1 Estación 1 - Tramo N°2

Los resultados de las concentraciones de salinidad en base al tiempo de la estación 1 para cada repetición y el promedio final del día se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3

Conductividad eléctrica de la estación 1 Tramo N°2

ESTACION N°1				
tiempo (segundos)	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 1	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 2	Conductividad eléctrica (μS/cm) Repetición 3	Promedio de Conductividad eléctrica (μS/cm)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	204.0	20.0	20.0	81.3
180.0	71.0	248.0	60.0	126.3
210.0	994.0	454.0	774.0	740.7
240.0	530.0	1176.0	972.0	892.7
270.0	346.0	620.0	508.0	491.3
300.0	236.0	388.0	366.0	330.0
330.0	136.0	282.0	214.0	210.7
360.0	100.0	82.0	148.0	110.0
390.0	82.0	82.0	148.0	104.0
420.0	62.0	60.0	114.0	78.7
450.0	62.0	60.0	40.0	54.0
480.0	42.0	20.0	40.0	34.0
510.0	42.0	20.0	40.0	34.0
540.0	22.0	0.0	20.0	14.0
570.0	22.0	0.0	20.0	14.0
600.0	22.0	0.0	20.0	14.0
630.0	22.0	0.0	20.0	14.0
660.0	22.0	0.0	0.0	7.3
690.0	22.0	0.0	0.0	7.3
720.0	22.0	0.0	0.0	7.3
750.0	22.0	0.0	0.0	7.3
780.0	0.0	0.0	0.0	0.0

810.0	0.0	0.0	0.0	0.0
840.0	0.0	0.0	0.0	0.0
870.0	0.0	0.0	0.0	0.0
900.0	0.0	0.0	0.0	0.0
930.0	0.0	0.0	0.0	0.0
960.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Se trabajó con el promedio de los datos de la Tabla 3, donde se calculó el momento estadístico de orden cero de la ecuación 7 y 8; obteniendo un valor de 101080 $\mu\text{S}\cdot\text{s}/\text{cm}$. Para el cálculo del tiempo de travesía del centroide (t_p) (ecuación 8) o también llamado momento de estadístico de orden 1, el resultado fue de 290.3 segundos. Asimismo, la varianza temporal se calculó mediante la ecuación 7 y tuvo como resultado 8029.3 seg^2 .

2.2 Estación 2 - Tramo N°2

Los resultados de las concentraciones de salinidad en base al tiempo de la estación 2 para cada repetición y el promedio final del día se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 4

Conductividad eléctrica de la estación 2 Tramo N°2.

ESTACION N°2				
tiempo (segundos)	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Repetición 1	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Repetición 2	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) Repetición 3	Promedio de Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
60.0	0.0	0.0	0.0	0.0
90.0	0.0	0.0	0.0	0.0
120.0	0.0	0.0	0.0	0.0
150.0	0.0	0.0	0.0	0.0
180.0	0.0	0.0	0.0	0.0
210.0	0.0	0.0	0.0	0.0

240.0	0.0	20.0	40.0	20.0
270.0	40.0	40.0	130.0	70.0
300.0	432.0	410.0	658.0	500.0
330.0	852.0	852.0	600.0	768.0
360.0	754.0	952.0	544.0	750.0
390.0	488.0	658.0	432.0	526.0
420.0	368.0	432.0	346.0	382.0
450.0	304.0	324.0	324.0	317.3
480.0	222.0	282.0	228.0	244.0
510.0	162.0	228.0	128.0	172.7
540.0	94.0	194.0	128.0	138.7
570.0	94.0	128.0	94.0	105.3
600.0	62.0	115.0	58.0	78.3
630.0	40.0	94.0	38.0	57.3
660.0	40.0	62.0	20.0	40.7
690.0	40.0	62.0	20.0	40.7
720.0	20.0	40.0	20.0	26.7
750.0	20.0	40.0	20.0	26.7
780.0	20.0	40.0	0.0	20.0
810.0	20.0	40.0	0.0	20.0
840.0	20.0	40.0	0.0	20.0
870.0	20.0	40.0	0.0	20.0
900.0	20.0	40.0	0.0	20.0
930.0	20.0	20.0	0.0	13.3
960.0	20.0	20.0	0.0	13.3

Se trabajó con el promedio de los datos Tabla 4, donde se calculó el momento estadístico de orden cero de la ecuación 7 y 8; obteniendo un valor de 132430 $\mu\text{S}^*\text{s}/\text{cm}$. Para el cálculo del tiempo de travesía del centroide (t_p) (ecuación 8) o también llamado momento estadístico de orden 1, fue de 430.18 segundos. Asimismo, la varianza temporal se calculó mediante la ecuación 7 y tuvo como resultado 15044.3196 seg^2 .

2.3 Coeficiente de dispersión longitudinal tramo N°2

Con los datos obtenidos del tiempo de travesía del centroide o también llamado momento estadístico de orden 1, la varianza temporal de las 2 estaciones y la velocidad media (U) entre la estación 1 y 2, cuyo resultado fue de 0.286 m/s, se

procedió a calcular el coeficiente de dispersión longitudinal mediante la ecuación 5, cuyo resultado obtenido fue 2.05 m²/s.

2.4 Simulación de la dispersión de contaminantes tramo N°2

Con el valor del coeficiente de dispersión longitudinal se procedió a la simulación mediante la ecuación 10. Para este caso se tomó tramos de 10 metros hasta completar 120 metros, las velocidades se colocaron en el rango de 0.44 a 0.5 m/s.

Para este segundo tramo se obtuvieron 12 ecuaciones discretizadas con el uso de la ecuación 10, las cuales se presentan a continuación:

$$d(C1)/d(t) = -V1 * (C1 - C0) / DX + DISP_X * (C2 - 2 * C1 + C0) / DX ^ 2$$

$$d(C2)/d(t) = -V2 * (C2 - C1) / DX + DISP_X * (C3 - 2 * C2 + C1) / DX ^ 2$$

$$d(C3)/d(t) = -V3 * (C3 - C2) / DX + DISP_X * (C4 - 2 * C3 + C2) / DX ^ 2$$

$$d(C4)/d(t) = -V4 * (C4 - C3) / DX + DISP_X * (C5 - 2 * C4 + C3) / DX ^ 2$$

$$d(C5)/d(t) = -V5 * (C5 - C4) / DX + DISP_X * (C6 - 2 * C5 + C4) / DX ^ 2$$

$$d(C6)/d(t) = -V6 * (C6 - C5) / DX + DISP_X * (C7 - 2 * C6 + C5) / DX ^ 2$$

$$d(C7)/d(t) = -V7 * (C7 - C6) / DX + DISP_X * (C8 - 2 * C7 + C6) / DX ^ 2$$

$$d(C8)/d(t) = -V8 * (C8 - C7) / DX + DISP_X * (C9 - 2 * C8 + C7) / DX ^ 2$$

$$d(C9)/d(t) = -V9 * (C9 - C8) / DX + DISP_X * (C10 - 2 * C9 + C8) / DX ^ 2$$

$$d(C10)/d(t) = -V10 * (C10 - C9) / DX + DISP_X * (C11 - 2 * C10 + C9) / DX ^ 2$$

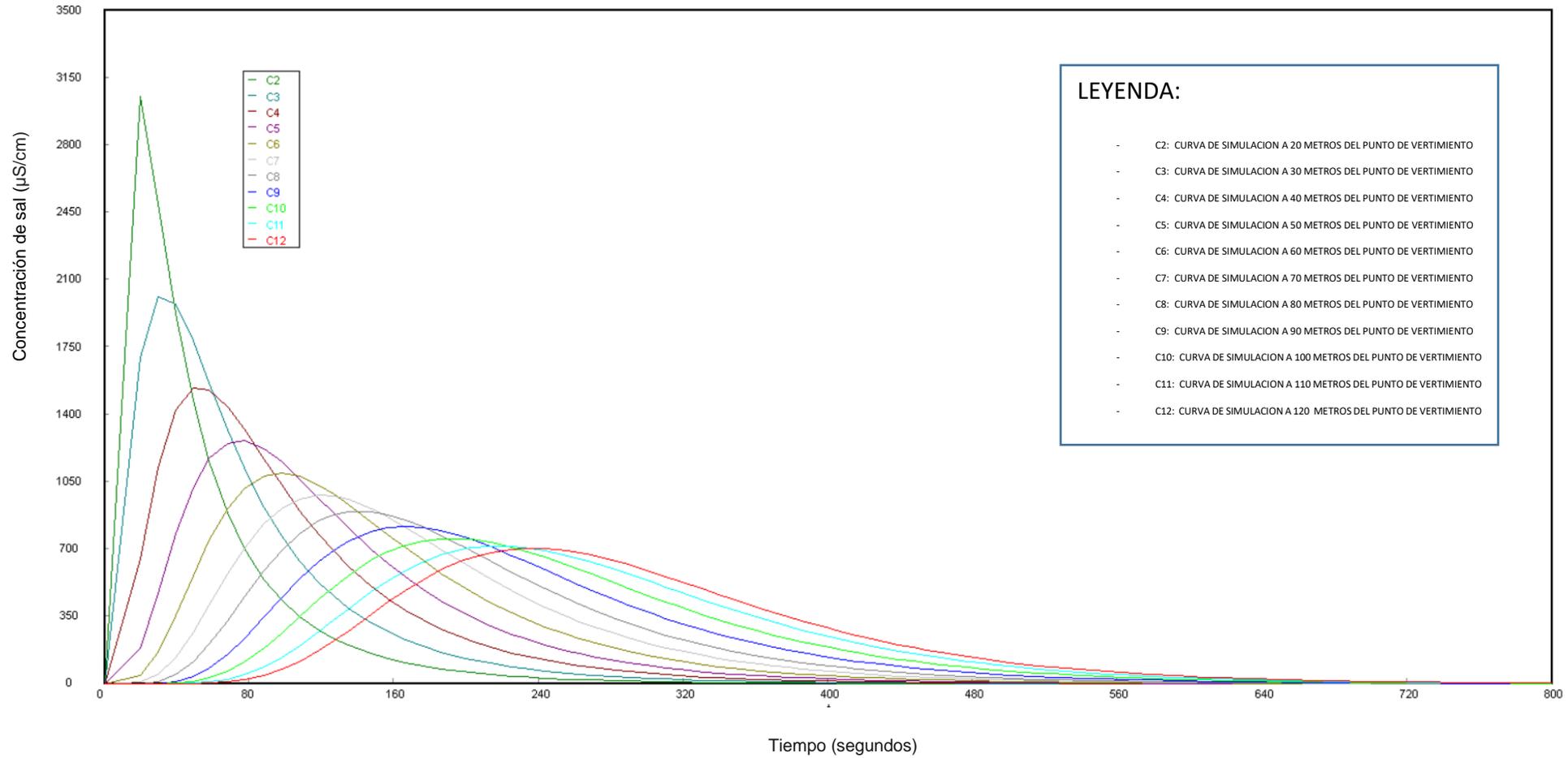
$$d(C11)/d(t) = -V11 * (C11 - C10) / DX + DISP_X * (C12 - 2 * C11 + C10) / DX ^ 2$$

$$d(C12)/d(t) = -V12 * (C12 - C11) / DX + DISP_X * (C13 - 2 * C12 + C11) / DX ^ 2$$

Como concentración inicial se tomó 10780.5 us/cm, obtenido mediante la fórmula de balance de masa (ecuación 4) mientras que las velocidades se colocaron al azar en un rango de 0.51 a 0.44 m/s. Estos datos fueron puestos en el software Polymath profesional. La simulación se observa en la Figura 8.

Figura 8

Simulación de la dispersión del tramo N°2

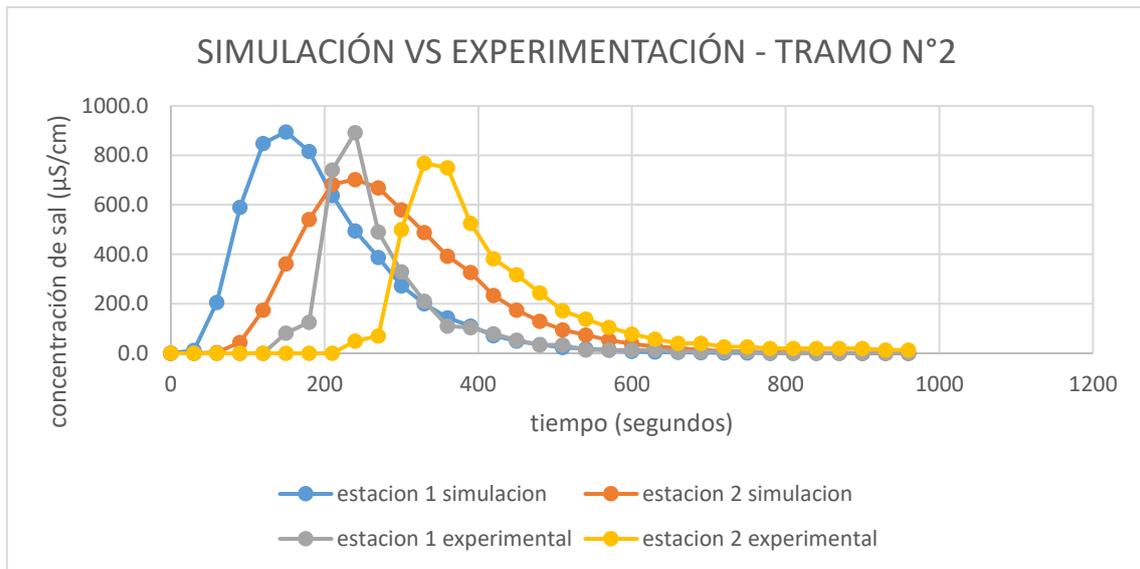


- LEYENDA:**
- C2: CURVA DE SIMULACION A 20 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C3: CURVA DE SIMULACION A 30 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C4: CURVA DE SIMULACION A 40 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C5: CURVA DE SIMULACION A 50 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C6: CURVA DE SIMULACION A 60 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C7: CURVA DE SIMULACION A 70 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C8: CURVA DE SIMULACION A 80 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C9: CURVA DE SIMULACION A 90 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C10: CURVA DE SIMULACION A 100 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C11: CURVA DE SIMULACION A 110 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO
 - C12: CURVA DE SIMULACION A 120 METROS DEL PUNTO DE VERTIMIENTO

Teniendo en cuenta que los datos C10 (80 metros) y C12 (120 metros) de la Figura 8, corresponden a los datos simulados de la estación 1 y estación 2, respectivamente, se realizó la Figura 9 para la comparación de los datos obtenidos experimentalmente y los simulados

Figura 9

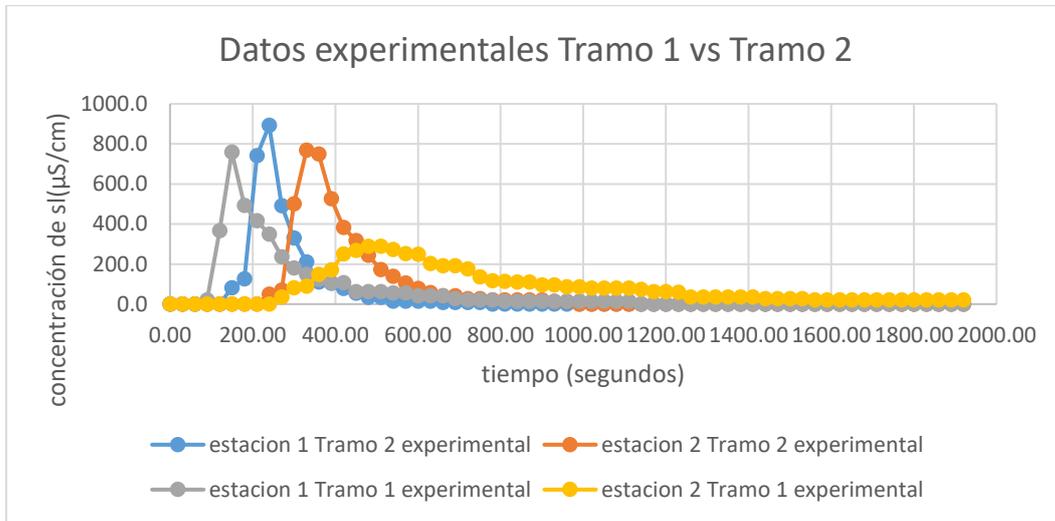
Datos Simulación vs Datos Experimentales Tramo N°2



En la Figura 10, se muestran las comparaciones de los datos experimentales obtenidos en campo de los tramos N°1 y N°2 en sus respectivas estaciones:

Figura 10

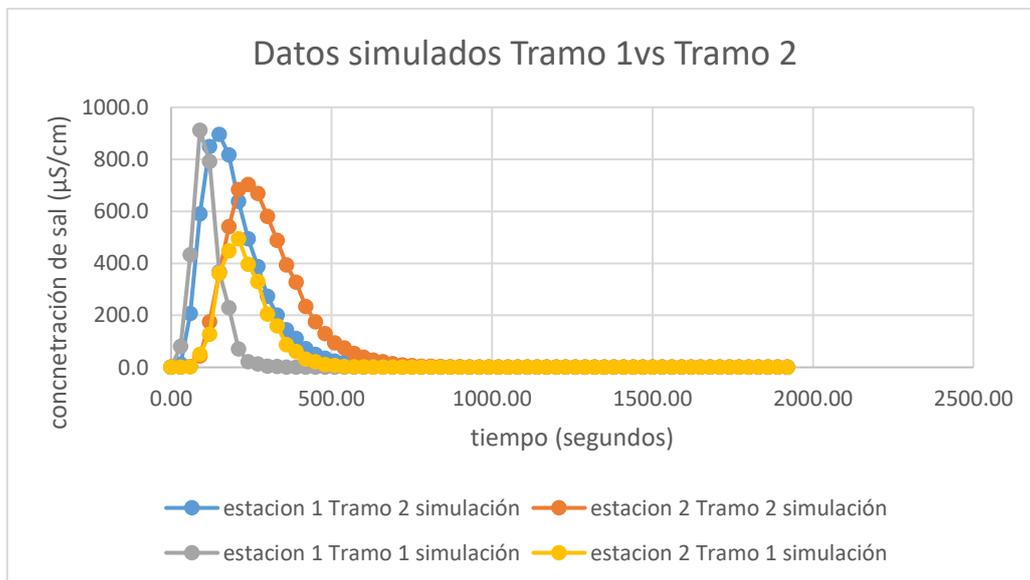
Datos Experimentales Tramo N°1 y Tramo N°2



En la Figura 11 se muestran las comparaciones en los datos simulados obtenidos en las estaciones de los tramos 1 y 2.

Figura 11

Datos simulados Tramo N°1 y Tramo N°2



VIII. DISCUSIÓN

Según el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la calidad de los recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016), indican que la longitud de zona de mezcla completa de un vertimiento se puede determinar de forma analítica mediante su ecuación propuesta (ecuación 1). Para el presente trabajo, mediante el desarrollo de la ecuación 1, se obtuvo como resultado una longitud de zona de mezcla de 15 y 20 metros para el tramo N°1 y N°2, respectivamente. Sin embargo, durante la experimentación en campo, se determinó una longitud de zona de mezcla de 25 y 40 metros para el tramo N°1 y N°2, respectivamente. Por tanto, es importante contrastar la información obtenida empíricamente con la experimental, debido a que la fórmula no toma en cuenta la morfología del río, principalmente los anchos del cuerpo hídrico y las gradientes de velocidades. Asimismo, es relevante indicar que este trabajo cumple con el Protocolo de Monitoreo Nacional para el monitoreo de calidad de agua establecido por el ANA, obteniéndose resultados más cercanos a la realidad nacional.

Asimismo, en el trabajo de Zeunert et al., (2020), indica que al aplicar la ecuación en mención (ecuación 1), es importante considerar que se asume una mezcla inmediata en dirección lateral y vertical; por tanto, en la práctica, esta ecuación solo se puede aplicar a ríos muy estrechos y poco profundos, puesto que en caudales grandes de ríos, se deberían utilizar modelos y ecuaciones bidimensionales; por tanto, estas consideraciones cumplen con las características de la cuenca baja del río Mala.

Según los resultados del trabajo de Botero (2005), las concentraciones del contaminante fueron superiores en las estaciones de monitoreo más próximas a las zonas de vertimiento, teniéndose un 40% de concentración más elevado en

las estaciones N°1 con respecto a las estaciones N°2, las cuales se encontraban distanciadas en 39 metros. Sin embargo, en los resultados experimentales del presente trabajo (Figura 10), se puede observar que en el tramo N°1, la diferencia de concentración del contaminantes entre la estación N°1 y estación N°2, las cuales se encontraban distanciadas por 20 metros, supera ampliamente el 40% indicado por Botero, mientras que en el tramo N°2, la diferencia de concentración del contaminante entre estaciones es menor a este 40%, a pesar de encontrarse a una distancia de 40 metros. Según este contraste, nuestros resultados no se asemejan a lo experimentados por Botero, esto se debe principalmente a que el tramo N° 1 presenta muchas zonas muertas y gradientes de velocidades diferenciadas, en contraste con el tramo N°2 el cual presenta una morfología regular. Asimismo, según se puede observar en esta Figura 10, que los valores más altos de concentración se encontraron en el tramo N°2, pese a que las estaciones en este tramo estuvieron más alejadas del punto de vertimiento en comparación con el tramo N°1. Se debe resaltar que en este trabajo se demuestra la influencia de la morfología de los tramos de río con respecto a la diferencia de concentraciones en la estación 1 y 2.

De igual forma, se observa en la Figura 10, de la estación 2 del tramo N°1, presenta una campana de gauss más extensa a comparación de las demás curvas de las otras estaciones, esto puede deberse no solo a las zonas muertas, sino también a que esta zona presentaba más sedimentos como rocas o piedras de mayor dimensión lo cual provocaba los pequeños remolinos en el cual retenía parte del contaminante, esto también se ve demostrado en el trabajo de Park & Seo (2018), donde obtuvieron resultados similares a la estación 2 del tramo N°1, el cual atribuyen ésta campana extensa a los remolinos que pueden causar

dichos sedimentos. Cabe resaltar que estos parámetros no son considerados en los modelos matemáticos tradicionales, debido a esto pueden generarse muchas variaciones en las simulaciones como se observa en el presente trabajo.

El coeficiente de dispersión longitudinal se obtuvo mediante el método experimental de momentos estadístico; sin embargo, existen diferentes metodologías empíricas para hallar este parámetro pero se optó por calcular este coeficiente de forma experimental debido que los métodos empíricos difieren significativamente del valor real, como lo explica el trabajo Haghiabi (2017), en donde se demuestra estadísticamente que existe una baja correlación entre el valor real del coeficiente de dispersión longitudinal y los obtenidos en base a fórmulas empíricas, demostrando así la importancia de hallar este parámetro de forma experimental.

Haciendo una comparación de los resultados obtenidos en base al coeficiente de dispersión longitudinal con el trabajo realizado por Zenclussen et al. (2015), observamos que el coeficiente de dispersión longitudinal del presente trabajo (0.18 y 2.05 m²/s) fue menor en ambos tramos al obtenido en el trabajo de dicho autor (4.17m²/s). Esto se puede deber a que la velocidad del cuerpo hídrico del trabajo de Zenclussen es mayor al del presente trabajo, siendo este un parámetro importante que influye en el valor del coeficiente de dispersión longitudinal. En base a lo expuesto, se demuestra la importancia del parámetro de velocidad con relación a la determinación del coeficiente de dispersión longitudinal, debido a que el tramo N°1 del presente experimento tuvo la menor velocidad y por ende el menor coeficiente de dispersión longitudinal.

Asimismo, el coeficiente de dispersión longitudinal se verá afectado por los parámetros geométricos como son la profundidad y el ancho del río, siendo

parámetros fundamentales en el cálculo del coeficiente de dispersión longitudinal según lo demuestra Zeng & Huai (2014), donde se observa la influencia de estos parámetros en el coeficiente de dispersión en ríos de Estados Unidos y Reino Unido, demostrando la correlación de estos parámetros en el valor del coeficiente de dispersión longitudinal. En el presente trabajo se corrobora la importancia de estos parámetros al momento de obtener los valores del coeficiente de dispersión longitudinal.

En el trabajo de Molina y Sierra (2019), realizado en el río Palomino - Colombia durante la época seca, hallaron un coeficiente de dispersión longitudinal con una variación de 0.230 m²/s a 0.647 m²/s, donde dichos autores infieren que hay una baja probabilidad de dispersión de solutos a lo largo del cauce. Las características de la cuenca Palomino (anchos de río y época de la experimentación) son similares a las características de la cuenca Mala, donde la presente investigación determina un coeficiente de dispersión longitudinal de 0.177 m²/s y 2.05 m²/s para los tramos N°1 y N°2 respectivamente, presentando de igual forma una baja dispersión de solutos o contaminantes. Por tanto, el presente modelo podría ser aplicable en ríos de condiciones morfológicas similares durante época seca, como es el caso del río Palomino.

En el presente trabajo, se utilizó como trazador cualitativo a la Rhodamina debido a que no requiere equipos de medición sofisticados por ser detectable a simple vista. Al igual que en el trabajo presentado por Claros et al. (2017), el cual utilizó un colorante rojo como trazador, que tiene similares características a la Rhodamina, siendo ambos una alternativa económica para evaluar la dispersión de contaminantes solubles. Sin embargo, en trabajos como los de Meddah et al. (2015) y Junior et al. (2020), utilizaron la Rhodamina como trazador cuantitativo,

donde miden la longitud de onda y fluorescencia del químico; no obstante, se hace mención que este método requiere de equipos de campo y de laboratorio sofisticados, elevando así los costos de investigación.

Respecto a la medición cuantitativa del contaminante, el presente trabajo utilizó como trazador al cloruro de sodio o sal común por presentar alta eficiencia, bajo costo y principalmente por ser efectiva en ríos con bajos caudales. El trabajo de Quispe et al. (2016), de igual forma, utilizó la sal común como trazador por presentar un caudal de 0.16 m³/s, similar al del presente trabajo (0.29 y 0.36 m³/s). Por tanto, se puede determinar que la sal común es aplicable como trazador en ríos con caudales que varían entre 0.16 a 0.36 m³/s. Asimismo, en trabajos realizados con coeficiente de dispersión bajos (0.44 m²/s), presentado en el trabajo de Caamaño et al. (2020), recomienda el uso del cloruro de sodio en cuerpos hídricos pequeños, poco profundos y en épocas de estiaje.

Según el trabajo de investigación realizado por Chang (2011), la simulación de dispersión de contaminantes, puede ser realizada de forma tridimensional tomando como referencia los ejes X (longitudinal), Y (lateral o ancho) y Z (profundidad o vertical). Sin embargo, la presente investigación se enfocó en simular la dispersión de contaminantes de forma longitudinal (eje X), debido a que los tramos N°1 y N°2 del río no presentaban un ancho y profundidad significativa durante la época seca, por lo cual se asume una mezcla completa instantánea durante el vertimiento, como según lo explica Díaz, et al (2014).

En la Figura 9, se puede observar que en el tramo N°2 existe una menor diferencia entre los resultados de concentración del contaminante obtenidos de forma numérica (simulación) y experimental en comparación con la Figura 7, tramo N°1, teniéndose una menor diferencia entre los puntos pico de

concentración y logrando estabilizarse en un periodo más corto de tiempo, lo cual es debido principalmente a que el tramo N°2 es de morfología regular y no presenta muchas variaciones, por lo cual hay mayor similitud con los modelos de simulación puesto que estos no toman en cuenta las variaciones morfológicas en los cuerpos hídricos.

En el presente trabajo se utilizó el programa Polymath para la modelación de datos como se observa en la figura 6 y 8. Comparando con las simulaciones generadas en los diferentes trabajos como el de Chang (2011), Quispe et al. (2016) y Claros et al. (2017), los cuales realizaron las simulaciones mediante el programa Excel, vemos claramente que los trabajos expuestos solo realizaron la simulación en las estaciones que midieron los datos, mientras que en el presente trabajo no solo se simuló los datos en las estaciones establecidas, sino que se pudo simular las concentraciones en diferentes posiciones del río. Esto posiblemente se deba a que el Polymath puede recrear de forma instantánea la simulación de datos, a diferencia del programa Excel en el cual requiere de mayor demanda de procesamiento de datos.

En el presente trabajo se modeló la dispersión de contaminantes mediante modelo de líneas para la dispersión unidimensional, el cual resolvió las ecuaciones mediante la discretización de la ecuación de balance de masa, obteniendo el mejor ajuste para el tramo N°2, como se muestra en la Figura 9 de los presentes resultados. Sin embargo, comparando con otros modelos numéricos como el de Meddah et al. (2015) en el cual desarrollaron su modelamiento mediante el método Line Matrix, basado en un esquema eléctrico y el trabajo realizado por Seifi & Riahi (2018) los cuales desarrollaron el modelo de PIS-ANFIS-GA, basado en un software de inteligencia artificial, donde se

observó que el mejor modelo que se ajustaron a sus datos experimentales fue el de Meddah et al. El presente trabajo mostró similitudes en cuanto al ajuste de los datos simulados con el trabajo de Seifi & Riahi. En los 3 trabajos se utilizaron metodologías numéricas, donde en el trabajo de Meddadh se encontró que su modelo tiene un mejor ajuste a los datos experimentales. Por lo cual, se debe investigar y desarrollar diferentes metodologías de modelamiento para poder encontrar el mejor ajuste para la simulación de cada cuerpo hídrico.

En el presente trabajo se utilizó la ecuación de balance de masa (ecuación 9), debido a que no reacciona químicamente con el agua y se conservación a través del tiempo. Sin embargo, esta ecuación puede variar en base a las características fisicoquímicas y biológicas de los trazadores, como en los trabajos de Carrasco (2020) y Mara et al. (2020), los cuales simulan la dispersión del contaminante mediante el uso de materia orgánica como trazador y considera los parámetros de oxigenación y desoxigenación modificando así la ecuación de balance de masas. Se puede resaltar que es necesario evaluar las características fisicoquímicas de los trazadores.

En el trabajo de Cardini et al. (2004), se realizó el monitoreo del contaminante en intervalos de tiempo de una hora debido a las características hidrodinámicos del cauce. En comparación con el presente trabajo, se tomó las muestras de agua en un intervalo de 30 segundos, hasta llegar a un aproximando de 25 minutos; esto es debido a que el trabajo de Cardini, toma mayor cantidad de estaciones de monitoreo y a una mayor distancia del vertimiento, por lo cual se demuestra que las características hidrodinámicas y la ubicación de las estaciones de monitoreo, tienen impacto en la toma de medición de muestra.

IX. CONCLUSIONES

1. Se obtuvo experimentalmente las características hidrodinámicas del río Mala en época seca de un tramo irregular (N°1) y regular (N°2). Asimismo, con el uso de trazadores cloruros de sodio y Rhodamina, se pudo determinar que las concentraciones de las estaciones 1 y 2 del tramo regular (N°2) fueron mayores que las concentraciones de las estaciones 1 y 2 del tramo irregular (N°1), lo cual se debe básicamente a la influencia de la morfología del río y las zonas muertas.
2. Se obtuvieron los coeficientes de dispersión longitudinal los cuales fueron de 0.18 m²/s y de 2.05 m²/s para el tramo irregular (N°1) y regular (N°2), respectivamente, indicando que el tramo irregular presenta más baja probabilidad de dispersión de solutos de forma longitudinal. Asimismo, con estos datos hallados, se logró simular la dispersión de contaminantes solubles a través de un modelo matemático en los dos tramos estudiados. Se debe tener en cuenta que los parámetros del modelo pueden usarse a ríos con similares características hidrodinámicas al presente trabajo.
3. Se realizó el modelamiento de la dispersión unidimensional específicamente en la dirección del flujo, puesto que tanto el ancho como la profundidad del río no fueron significativas en este estudio.

X. RECOMENDACIONES

- Previo a la experimentación en campo se requiere de una logística precisa. Se necesita tener en cuenta la cantidad de personas necesarias para cada función como toma de datos, personas en el punto de vertimiento y en las zonas de muestreo. Asimismo, requiere evaluar la condición de los equipos, instrumentos y las cantidades de los trazadores.
- Tener en cuenta las accesibilidad al río, debido a que pueda presentar dificultades para su ingreso. Asimismo, se debe tener en cuenta que las condiciones del río pueden variar en días; por tanto, las fechas de las campañas de experimentación deben ser próximas.
- Llevar repuestos adicionales de reactivos químicos, equipos, instrumentos, otros; puesto que se pueden presentar inconvenientes durante la experimentación.
- Tener en cuenta el protocolo de monitores de calidad de agua: uso de guantes, mascarillas, botas, otros.
- Previo a la experimentación, es de relevante importancia comunicar a las pobladores de zonas aledañas sobre el estudio que se está realizando para evitar posibles conflictos.

XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquafondo. (2015). *Módulo para la creación de materiales de difusión sobre el problema hídrico en Lima y Callao*. Recuperado el 14 de junio de 2019 de https://aquafondo.org.pe/wp-content/uploads/2015/11/4._La_contaminacion_de_los_rios_de_Lima.pdf
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014). *Resultado del segundo monitoreo de la calidad de agua en la cuenca del río Mala (realizado del 10 al 14 de marzo de 2014)*. Recuperado el 24 de junio de 2018 de <http://catalogoelectronico.ana.gob.pe/handle/ANA/2519?show=full>
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2015). *Evaluación de recursos hídricos en las cuencas Mala, Omas y Chilca*. Recuperado el 10 de Octubre de 2020 de: http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/321/browse?rpp=20&offset=20&etal=-1&sort_by=-1&type=subject&value=Fuentes+contaminantes&order=ASC
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2016). *Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales*. Recuperado el 23 de mayo 2019 de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/protocolo_nacional_para_el_monitoreo_de_la_calidad_de_los_recursos_hidricos_superficiales.pdf
- Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Recuperado el 23 de mayo 2019 de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/900>

- Autoridad Nacional de Agua (ANA). (2018). Resolución Jefatural N°056-2018-ANA. Recuperado el 10 de junio de 2019 de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/r.j._056-2018-ana_0.pdf
- Botero, J. (2005). *Estudios de inyección instantánea de trazadores en ríos de montaña*. Colombia: Universidad de los Andes. Recuperado el 24 de agosto de 2020 de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22506/u270678.pdf?sequence=1>
- Caamaño, D., Fuentes, F., Alcayaga, H. & Tranmer, A. (2020). *The influence of pool-riffle morphological features on river mixing*. *Water*, 12(4), 1145. Recuperado el 24 de agosto de 2020 de <https://doi.org/10.3390/w12041145>
- Carrasco, L. (2018). *Modelamiento de los Fenómenos de Transporte*. Lima: Peru. Macro.
- Carrasco, L. (2020). *Modelamiento y simulación de los procesos de desoxigenación y reoxigenación de los cuerpos de agua por presencia de carga orgánica*. Universidad Nacional del Callao: Perú. Recuperado el 24 de agosto de 2020 de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/5130>
- Cajas, D. (2014). *Dispersión de polución en medio acuático, aproximación numérica y simulación computacional- Bahía de Buenaventura-Colombia*. CONAMA (1). Recuperado el 24 de junio de 2019 <http://www.conama.org/conama/download/files/conama2014/CT%202014/1896711767.pdf>

Calendaria, B., Ruiz, O., Gallardo, F., Perez, P., Martínez, A. & Vargas, L.(2011).

Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. Mexico. Recuperado el 11 de octubre de 2020

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000300004

Calvo, C. (2010). *Estudios de dispersión de contaminantes y declinación*

bacteriana en la bahía del mar de Chimbote – Perú. Recuperado el 20 de

septiembre de 2020 de:

https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieria/article/view/440/435

Cardini, J. C., Zabalett, A., Oliver, N. M. & Mársico, D. P. (2004). *Efecto de los*

coeficientes de dispersión sobre la modelación bidimensional del transporte

de contaminantes. Recuperado el 20 de septiembre de 2020 de:

<http://190.114.221.84/handle/20.500.12272/2907>

Claros, E., Cipriano, J., Cabello, J., Chirito, S., Ramírez, F., León, R., Ramos, K.

& Gonzales, Y. (2017). *Modelación de la dispersión de contaminantes del*

agua de la cuenca del Rio Huaura–2017. Recuperado el 15 de junio de 2020

de <http://200.48.129.167/handle/UNJFSC/2064>

Chang, E. (2011). *Simulación de la dispersión de contaminantes en un*

río (Master's thesis). Recuperado el 20 de septiembre de 2020 de:

<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/8115/echang.pdf?sequence=1>

Díaz, J., Caminal, F., Barchiesi, G., Herrero, H. & García, C. (2014).

Determinación del Coeficiente de Dispersión Longitudinal en ríos usando

ADCP. Recuperado el 19 de Septiembre de 2020 de <https://www.ina.gob.ar/ifrh-2014/Eje4/4.22.pdf>

Defensoría del Pueblo (2015). *Conflictos sociales y recursos hídricos*. Recuperado el 25 de julio de 2020 de <https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2018/05/IA-Conflictos-por-Recursos-Hidricos.pdf>

Duarte, D.(2017). *Metodología para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal en el río magdalena a partir de ADCP*. Colombia: Recuperado el 11 de octubre de 2020 <https://es.scribd.com/document/452571096/METODOLOGIA-PARA-LA-ESTIMACION-DEL-COEFICIENTE-DE-DISPERSION-LONGITUDINAL-EN-EL-RIO-MAGDALENA>

Espinoza, R., Vinicio, A. & Zavaleta, R. (2013). *Caracterización hidrodinámica y dispersión de contaminantes de la parte alta del río Suquiapa, Santa Ana*. San Salvador: Universidad El Salvador. Recuperado el 11 de octubre de 2020 http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4958/1/Caracterizaci%C3%B3n_hidrodin%C3%A1mica_y_dispersi%C3%B3n_de_contaminantes_de_la_parte_alta%20del%20r%C3%ADo%20Suquiapa%2C%20Santa%20Ana.pdf

Sánchez, J. G. & Álvarez, J. A. M. (1997). *Morfología de ríos: capítulo 11 del Manual de ingeniería de ríos*. Instituto de Ingeniería de UNAM.

Guido, P. (2015). *Curso básico de hidráulica fluvial*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado el 25 de julio de 2020 de <https://www.imta.gob.mx/potamologia/images/potamologia/CV-profesores-curso/DR.%20PEDRO%20ANTONIO%20GUIDO%20ALDANA.pdf>

- Haghiabi, A. H. (2017). Modeling river mixing mechanism using data driven model. *Water Resources Management*, 31(3), 811-824. Recuperado el 10 de Octubre de 2020 de <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1475-7>
- Humberto, C., Garzón, D. & Mantilla, J.(2010). *Comparación del método de líneas características y el método Petrov Galerkin en contracorriente para problemas de advección dominante*. Recuperado el 10 de Octubre de 2020 de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfiua/n52/n52a12.pdf>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA). (2007). *Evaluación de los recursos hídricos de la cuenca del Río Mala*. Recuperado el 24 de mayo de 2019 de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/estudio_hidrologico_mala_0_0.pdf
- Jaya, F. (2017). *Estudio de los sólidos suspendidos en el agua del rio Tabacay y su vinculación con la cobertura vegetal y usos del suelo en la microcuenca*. Ecuador: Universidad de Cuenca. Recuperado el 20 de agosto de 2020 <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/28542/1/Trabajo%20de%20titulacio%20n.pdf>
- Júnior, G. & Monteiro, C. (2020). *Suspended movement of pollutant and sediment in open channel flow as stochastic process*. Sapporo: Japón. Recuperado el 20 de octubre de 2020 <https://iahrapd2020.xsrv.jp/proceedings/pdf/1-2-23.pdf>
- Mara, D., Vicente, C., Kaviski, E. & Fontane, D. (2020). *Transformation rates of pollutants in rivers for water quality modelling under unsteady state: a calibration method*. *Journal of Hydrology*, 124769. Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169420302298?via%3Dihub>

Meddah, S., Saidane, A., Hadjel, M. & Hireche, O. (2015). Pollutant dispersion modeling in natural streams using the transmission line matrix method. *Water*, 7(9), 4932-4950. Recuperado el 15 de junio de 2020 de <https://doi.org/10.3390/w7094932>

Menéndez, A. (2010). *Transporte de contaminantes en el medio acuático*. Recuperado el 15 de junio de 2020 de http://www.redmodelacion.com.ar/images/pdf/docencia/utn/Apunte_Contam_Aguas.pdf

Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo 004-2017- MINAM. Recuperado el 24 de junio de 2019 de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-agua-establecen-disposiciones>

Ministerio del Ambiente (2017). *Estándares de calidad ambiental, evidencia científica y gradualidad para un ambiente saludable*. Lima: Peru. Recuperado el 30 de octubre de 2020 de: <http://www.minam.gob.pe/estandares-de-calidad-ambiental/wp-content/uploads/sites/146/2017/06/Preguntas-frecuentes.pdf>

Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). (2017). *Guía para la determinación de la zona de mezcla y la evaluación del impacto de un vertimiento de aguas residuales tratadas a un cuerpo natural de agua*. Recuperado el 20 de julio de 2020 de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/per172178anx.pdf>

Mitra, A., Calma, M. & Prasad, S. (2020). *Natural resources and their ecosystem services*. Bangalore, India: Editorial H.S.R.A.

Molina, G. & Sierra, D. (2019). *Determinación de las tasas de reaireación (Ka) evaluadas por ecuaciones empíricas y semi-empíricas para el estudio de contaminantes por medio de trazadores del río Palomino, La Guajira*. Colombia: Universidad Santo Tomas.

Norzagaray, M. Llanes, O. & Muñoz, P. (2013). *Estimación de la dispersividad hidrodinámica usando trazadores*. México: Editorial Verlag. Recuperado el 25 de julio de 2020 de https://www.researchgate.net/publication/318795972_Estimacion_de_la_dispersividad_hidrodinamica_usando_trazadores/link/597fa267458515687b4bcc81/download

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2015). *Informe de las Naciones Unidas sobre Los Recursos Hídricos En El Mundo*. Recuperado de http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/SC/images/WWDR_2015Facts_Figures_SPA_web.pdf

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Recuperado el 14 de junio de 2020 de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Park, I. & Seo, I. W. (2018). Modeling non-Fickian pollutant mixing in open channel flows using two-dimensional particle dispersion model. *Advances in water resources*, 111, 105-120. Recuperado el 14 de junio de 2020 de <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.035>

- Parsaie, A. & Haghiabi, A. H. (2015). Principle Component Analysis of Longitudinal Dispersion Coefficient Parameters. *J Waste Resources*, 5(186), 2. Recuperado el 25 de septiembre de 2020 de <http://dx.doi.org/10.4172/2252-5211.1000186>
- Quesada, M. E. & Waylen, P. R. (2012). Annual and Seasonal Hydrological Differences in Adjacent Regions: A Study of the Virilla and Grande de San Ramon River Basins (Costa Rica). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 21(2), 167-175. Recuperado el 25 de septiembre de 2020 de <http://ref.scielo.org/nvp7y9>
- Quispe, W., Herrera, L., Sichez, J., Parodi, M., Matar, M., Gomez, J., Calcagno, G., Barrea, L., Mechini, M. & Luccini, E. (2016). *Dispersión de contaminantes en cursos de agua: estudios en el río Chumbao, Perú*. Recuperado el 25 de julio de 2019 de <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/5744>
- Rojas, Freddy. (2017). “*Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en lima metropolitana*”. Universidad Nacional Agraria La Molina: Peru. Recuperado el 10 de octubre de 2020 de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3809/rojas-chavez-freddy-jesus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rocha, A. (2013). *La morfología fluvial y su incidencia en la estabilidad de las obras viales*. Universidad Andina del Cusco: Perú.
- Rodríguez, A., Garcia, A. & Álvarez, C. (2015). Definition of mixing zones in rivers. *Environ Fluid Mech* (16), 209–244 Recuperado el 10 de octubre de 2020 de [10.1007/s10652-015-9425-0](https://doi.org/10.1007/s10652-015-9425-0)

- Sanchez, J. (2012). *Transporte de contaminantes*. España: Universidad de Salamanca. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de http://hidrologia.usal.es/temas/Transporte_de_contaminantes.pdf
- Seifi, A. & Riahi-Madvar, H. (2018). Improving one-dimensional pollution dispersion modeling in rivers using ANFIS and ANN-based GA optimized models. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(1), 867-885. Recuperado el 15 de agosto de 2020 de <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3613-7>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2011). *Guía de hidrometría para la estimación de caudal por el método de flotadores*. Recuperado el 24 de junio de 2019 de https://www.senamhi.gob.pe/usr/cdc/AFORO_X_FLOTADORES.pdf?fbclid=IwAR14oXNtNxN0q7_7VMARKzdfDDSyG80ihooFVTW9AKS6z44UdVtUMx56ACw
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2013). *Evaluación hidrológica estacional a nivel nacional año hidrológico 2012- 2013*. Recuperado el 16 de agosto de 2020 <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02611SENA-27092013.pdf>
- Zenclussen, C., Palman, L., Montagnini, M., Pez, M., Álvarez, A., & Trento, A. (2015). *Ensayo de trazadores para determinación del coeficiente de dispersión longitudinal*. Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Zeng, Y. & Huai, W. (2014). Estimation of longitudinal dispersion coefficient in rivers. *Journal of Hydro-environment Research*, 8(1), 2-8. Recuperado el 16 de agosto de 2020 <https://doi.org/10.1016/j.jher.2013.02.005>

Zeunert, S. & Gunter, M. (2020). *Influence of the spatial and temporal monitoring design on the identification of an instantaneous pollutant release in a river. Advances in Water Resources, 146, 103788.* Recuperado el 08 de octubre de 2020 <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103788>

XII. ABREVIATURAS

m/s metros por segundo

gr gramos

L litros

Kg kilogramos

ECA Estándar de Calidad Ambiental

N número

m³/s metros cúbicos por segundo

GPS sistema de posicionamiento global

μS/cm microSiemens por centímetro

m/s² metros por segundos al cuadrado

XIII. ANEXOS:

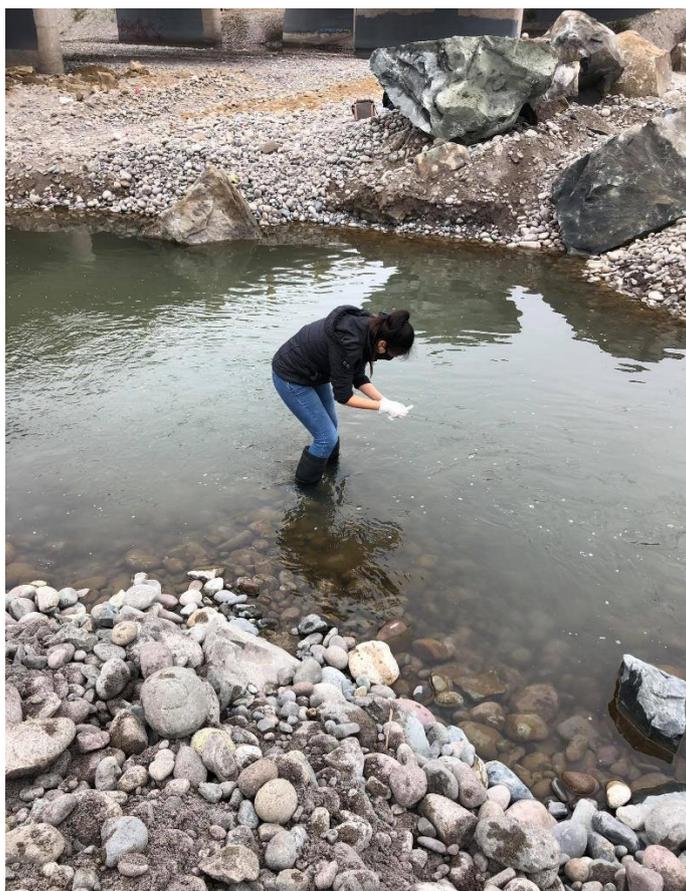
Anexo 1 Punto de inyección instantánea Tramo N°1



Anexo 2 Determinación experimental zona de mezcla Tramo N°1



Anexo 3 Muestreo de conductividad eléctrica en la estación 1 Tramo N°1



Anexo 4 Estación 1 del Tramo N°1



Anexo 5 Estación 2 del Tramo N°1



Anexo 6 Muestreo de conductividad eléctrica en la estación 2 del Tramo N°1



Anexo 7 Panorámica del tramo N°2



Anexo 8 Tuberías de descargas de efluentes del Tramo N°2



Anexo 9 De vista a nivel del Tramo N°2



Anexo 10 De vista a nivel del Tramo N°2



Anexo 11 Medición del largo del cauce para determinar velocidad del Tramo N°2



Anexo 12 Medición del largo del cauce para determinar velocidad del Tramo N°2



Anexo 13 Determinación de la velocidad en base a la inyección de rhodamina
Tramo N°2



Anexo 14 Preparación de la mezcla para la inyección instantánea Tramo N°2



Anexo 15 Medición de la conductividad Tramo N°2



Anexo 16 Recopilación de datos en campo Tramo N°2

